



การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนจาก
ผักตบชวา



โดย
นายดิลก สะแสงตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การจัดสัมนาในน้ำเสียด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วย
ไนโตรเจนจากผักตบชวา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

REMOVAL OF DYES FROM WASTEWATER USING N-DOPED MESOPOROUS
CARBON DERIVED FROM WATER HYACINTH IN CONTINUOUS SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา
โดย	ดิลก สะแสงตา
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เหมะปะบุตร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมะปะบุตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์มานพ ปานะโปย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี)

61402210 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : การดูดซับ, ผักตบชวา, คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน, เมทิลีน บลู, โรดามีน บี, มาลาไคท์ กรีน

นาย ดิลก สะแสงดา: การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยระบบต่อเนื่องโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เข้มชะปะบุตร

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน ซึ่งเตรียมจากผักตบชวา ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการจัดการขยะมูลฝอยจากวัชพืช โดยการเปลี่ยนผักตบชวาให้กลายเป็นคาร์บอนรูพรุนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมคาร์บอนรูพรุนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจนที่อุณหภูมิการกระตุ้น (600-800 องศาเซลเซียส) และปริมาณเมลามีน (ที่เป็นแหล่งของไนโตรเจน) แตกต่างกัน และศึกษาปัจจัยในกระบวนการดูดซับที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู มาลาไคท์ กรีน และโรดามีน บีโดยใช้คาร์บอนรูพรุนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมได้มาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมในระบบแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง โดยผันแปรปริมาณของตัวดูดซับ (ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (200, 250, 300, 400 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม (5, 10, 15 และ 18 มิลลิลิตรต่อนาที) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน ส่งผลให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มีขนาดรูพรุนมีโซเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีน พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มีขนาดรูพรุนมีโซลดลง โดยคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้อัตราส่วนของผักตบชวา โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และ เมลามีน เท่ากับ 1 : 1 : 1 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการกระตุ้นที่ 800 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มีขนาดรูพรุนมีโซสูงสุด จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสีทั้งสามชนิด เวลาเบรคทู และค่า T สูงที่สุด นอกจากนี้เพื่อศึกษากราฟเบรคทูและพารามิเตอร์ในการออกแบบกระบวนการดูดซับในงานวิจัยนี้ได้ใช้โมเดล Bohart-Adams, Yoon-Nelson, Thomas และ Dose-Response พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม สีย้อมเมทิลีนบลูมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_0) ประมาณ 558 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 2 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม 18 มิลลิลิตรต่อนาที) สำหรับสีย้อมมาลาไคท์กรีนมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด

ประมาณ 961 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 2 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม 18 มิลลิลิตรต่อนาที) และสีย้อมโรดามีนบีมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด ประมาณ 553 มิลลิกรัมต่อกรัม (ที่ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ 4 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของสารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตรต่อนาที) ทั้งสัโมเดลให้ความสัมพันธ์ที่น่าพอใจของข้อมูลคอลัมน์ที่ได้จากการทดลองโดยมี R^2 มากกว่า 0.98 ซึ่งบ่งบอกถึงความเหมาะสมสำหรับการออกแบบและการขยายสำหรับกระบวนการขนาดใหญ่ได้



61402210 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Adsorption, Water Hyacinth, N-doped Mesoporous Carbon, Methylene Blue, Rhodamine B, Malachite Green

MR. DILOK SASAENGTA : REMOVAL OF DYES FROM WASTEWATER USING N-DOPED MESOPOROUS CARBON DERIVED FROM WATER HYACINTH IN CONTINUOUS SYSTEM THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR BUSSARIN KSAPABUTR, Ph.D.

In this work, N-doped mesoporous carbon derived from water hyacinth has been developed as an effective method for aquatic weed waste management. Water hyacinth was converted into N-doped mesoporous carbon for using as an efficient and sustainable adsorbent material. The purpose of this study is to investigate the preparation of N-doped porous carbon at various activation temperature (600 - 800 °C) and melamine contents and the effect of process factors on the adsorption of three dyes including methylene blue (MB), malachite green (MG) and rhodamine B (RhB) in continuous fixed-bed column. The amount of adsorbents (bed height; 1, 2, 3 and 4 cm.), initial concentration of dye solution (200, 250, 300 and 400 mg/L), and flow rate of dye solution (5, 10, 15 and 18 mL/min) were varied. With increasing activation temperature, the specific surface area and mesopore volume increased. Meanwhile, the increase in melamine content resulted in the decrease in specific surface area and mesopore volume. The N-doped mesoporous carbon with highest specific surface area and mesopore volume was obtained using water hyacinth, potassium hydroxide and melamine in a ratio of 1 : 1 : 1 by weight under activation process at 800 °C, leading to highest adsorption capacity, breakthrough time and T value. Moreover, to investigate the breakthrough curves and characteristic parameters for process design, Bohart-Adams, Yoon-Nelson, Thomas, and Dose-Response models were applied to experimental breakthrough data. The increase in bed height, dye concentration and flow rate resulted in improved adsorption capacity. The maximum adsorption capacity (Q_0) of ~558 mg/g for MB dye (at 2 cm bed height, 300 mg/L initial concentration and 18 mL/min flow rate), ~961 mg/g for MG dye (at 2 cm bed height, 300 mg/L initial concentration and 18 mL/min flow rate) and ~553 mg/g for RhB dye (at 4 cm bed height, 300 mg/L initial concentration and 10 mL/min

flow rate) was observed. All four models provided a satisfactory correlation of experimental column data with $R^2 > 0.98$, suggesting its suitability for the design and large-scale process.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เหมะปะบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปยและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการวิจัย การวิเคราะห์ผลการวิจัยและการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนมอบบรมสั่งสอน อดทนดูแลผู้วิจัยด้วยความหวังดี เปรียบเสมือนลูกหลานคนหนึ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ที่สละเวลาในการตรวจสอบและแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ เพื่อนำมาปรับปรุงงานวิจัยให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เคยอบรมสั่งสอนให้ความรู้และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งการสนับสนุนทางด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา สำหรับคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกทางด้านจัดหาวัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานในทุกๆ ด้าน

ขอบคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยทุนการศึกษา จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (PETROMAT) และทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนักศึกษาปริญญาโท มหาบัณฑิต จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ขอขอบคุณครอบครัว คุณพ่อคุณแม่ และพี่สาวที่คอยให้กำลังใจและเตือนสติผู้วิจัยในการทำงานตลอดการวิจัยจนเสร็จสิ้นลง ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ และทุกๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ สำหรับความห่วงใย ความมีน้ำใจ ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ดิลก สะแสงตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuffs).....	5
2.2 การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment).....	10
2.3 คาร์บอนกัมมันต์หรือถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal).....	11
2.5 คาร์บอนเจือด้วยไนโตรเจน (N-doped carbon).....	24
2.4 การดูดซับ (Adsorption).....	25
2.5 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm).....	30
2.6 เส้นโค้งเบรคทู (Breakthrough curve).....	32
2.7 ชีวมวล (Biomass).....	34
2.8 สูตรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ.....	40

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	51
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	52
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.5 การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่มีปริมาณ ไนโตรเจนแตกต่างกันจากวัตถุดิบผักตบชวา	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	59
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนเจือด้วยไนโตรเจน	59
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดสีของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	121
5.1 ข้อเสนอแนะ	122
ภาพผนวก ก	123
ภาพผนวก ข	126
ภาพผนวก ค	128
รายการอ้างอิง.....	144
ประวัติผู้เขียน	154

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางแสดงกลุ่มของสีย้อมแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี	5
ตารางที่ 2 ตารางแสดงสารกระตุ้นที่ใช้ในกระบวนการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์	21
ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในกระบวนการ CVD ตัวแปรต่าง ๆ ที่คำนวณหาพื้นที่สัมผัสได้จากไอโซเทิร์มของการดูดซับ/การคายซับของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โครงสร้างของคอมโพสิตวัดจาก XRD.....	44
ตารางที่ 4 ข้อมูลพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดเฉลี่ยของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาและคาร์บอนกัมมันต์เจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา	62
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของอะตอมที่ตรวจพบที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS	65
ตารางที่ 6 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	72
ตารางที่ 7 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	75
ตารางที่ 8 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	78
ตารางที่ 9 ข้อมูล 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model.....	81
ตารางที่ 10 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ	

Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	84
ตารางที่ 11 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	87
ตารางที่ 12 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	90
ตารางที่ 13 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อม MB โดยการแปรผันปริมาณการเจือในโตรเจนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	93
ตารางที่ 14 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	96
ตารางที่ 15 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model.....	99
ตารางที่ 16 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model....	102
ตารางที่ 17 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model....	105

ตารางที่ 18 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น RhB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	108
ตารางที่ 19 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MG 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model....	111
ตารางที่ 20 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของ สารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	114
ตารางที่ 21 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของ สารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	117
ตารางที่ 22 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของ สารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model	120
ตารางที่ 23 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารเมทิลีนบลู.....	123
ตารางที่ 24 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารโรดามีนบี	124
ตารางที่ 25 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารมาลาโคท์กรีน.....	125

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างเมทิลีนบลู	7
ภาพที่ 2 โครงสร้างของมาลาไคท์กรีน	8
ภาพที่ 3 โครงสร้างโรดามีนบี	9
ภาพที่ 4 อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน	12
ภาพที่ 5 แผนภาพเฟสของคาร์บอนที่สภาวะต่างๆ	14
ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เฟสของคาร์บอนที่คำนวณได้กับแรงดันและความร้อนของ ศูนย์กลางโลก.....	14
ภาพที่ 7 แผนผังการผลิตคาร์บอนกัมมันต์	15
ภาพที่ 8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์เมื่อกระบวนการทางความร้อนแตกต่างกันของซีมวอล	16
ภาพที่ 9 ภาพการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิต่างๆ	18
ภาพที่ 10 แผนผังขั้นตอนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ	20
ภาพที่ 11 แผนผังขั้นตอนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี	21
ภาพที่ 12 ปฏิกริยาการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในเซลล์ลูโลส	22
ภาพที่ 13 องค์ประกอบต่างๆ ของอะตอมไนโตรเจนที่เจืออยู่.....	25
ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสามารถในการเคลื่อนที่เมื่อขนาดเปลี่ยนแปลงไป	27
ภาพที่ 15 ภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าหาตัวดูดซับ	27
ภาพที่ 16 แบบจำลองแสดงการดูดซับ.....	28
ภาพที่ 17 รูปแบบจำลองช่องว่างภายในของคาร์บอนกัมมันต์.....	28
ภาพที่ 18 ไอโซเทิร์มของการดูดซับต่างๆ.....	32
ภาพที่ 19 รูปแบบการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ในคอลัมน์จนถึงจุดหมดสภาพ	33
ภาพที่ 20 วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของการใช้เชื้อเพลิงจากซีมวอล	34

ภาพที่ 21 ผักตบชวาที่เจริญเติบโตตามที่อยู่อาศัย	36
ภาพที่ 22 สายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส	37
ภาพที่ 23 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสทั่วไปสามชนิด	38
ภาพที่ 24 แบบจำลองลิแกนด์โดยสมมุติ	39
ภาพที่ 25 แบบจำลองคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน, กำมะถัน	42
ภาพที่ 26 ความจุของสีย้อมต่อพื้นที่ผิวการดูดซับที่ตำแหน่งสมดุล: สีฟ้าเมทิลีนบลู (แถบสีเทา) โรดามีนบี (แถบสีขาว) ค่าการดูดซับสัมบูรณ์อยู่ในแท่ง	43
ภาพที่ 27 รูปภาพจำลองโครงสร้างการดูดซับสีย้อม	44
ภาพที่ 28 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในการทดลอง X3 และ N-doped carbon (N8.8/4 และ N8.8/3) สำหรับ: (a) เมทิลีนบลู, (b) เมทิลออเรนจ์ และ (c) ฟิวซินเอซิด	45
ภาพที่ 29 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมทั้งสามที่ใช้ในงานนี้ ขนาดโมเลกุลประมาณด้วยซอฟต์แวร์ ChemBioDraw	45
ภาพที่ 30 ภาพประกอบแผนผังของ NPS ที่มีขนาดแตกต่างกันประสิทธิภาพในการดูดซับของสีย้อมประเภทกรดและสมบัติการแยกด้วยแม่เหล็ก	46
ภาพที่ 31 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลและ (b) เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก Fe-NMCNs-3-0.2 และภาพถ่ายของตัวอย่างในสารละลายกรดสีแดงโดยแยกด้วยแม่เหล็ก (ภาพแทรก)	46
ภาพที่ 32 ผลของ pH เริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW	48
ภาพที่ 33 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW	49
ภาพที่ 34 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW	49
ภาพที่ 35 ผลของเวลาในการสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW	49

ภาพที่ 36 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสี ย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW.....	50
ภาพที่ 37 แผนผังแสดงการทดลอง.....	53
ภาพที่ 38 ส่วนประกอบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ (หมายเลข 1 ขวดเก็บสารละลายสีย้อม หมายเลข 2 เครื่องสูบลม (Pump) หมายเลข 3 คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ หมายเลข 4 ขวดเก็บสาร ตัวอย่าง)	56
ภาพที่ 39 การเตรียมผักตบชวา (WH)	56
ภาพที่ 40 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวา	57
ภาพที่ 41 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์เจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา	57
ภาพที่ 42 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนและ (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800 และ W800	60
ภาพที่ 43 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนและ (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600.....	61
ภาพที่ 44 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจน (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800.....	62
ภาพที่ 45 สเปกตรัม XPS ของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800.....	63
ภาพที่ 46 สเปกตรัม XPS ของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800	64
ภาพที่ 47 ภาพ SEM ของ (a) W800, (b) 1M1W800, (c) 1M1W600, (d) 1M1W700 (e), 2M1W800 และ (f) 3M1W800.....	66
ภาพที่ 48 สเปกตรัมรามานของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800	67
ภาพที่ 49 สเปกตรัมรามานของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800	68
ภาพที่ 50 สเปกตรัม FTIR ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาและคาร์บอนกัมมันต์จาก ผักตบชวาเจือด้วยไนโตรเจน.....	69
ภาพที่ 51 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.	71

ภาพที่ 52 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model 74

ภาพที่ 53 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model 77

ภาพที่ 54 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model 80

ภาพที่ 55 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model 83

ภาพที่ 56 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model 86

ภาพที่ 57 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB) โดยการกระตุ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model (b) Yoon-Nelson model (c) Thomas model (d) Dose-Response model 89

ภาพที่ 58 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อม MB โดยการแปรผันปริมาณการเจือโนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการ

ไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.....	92
ภาพที่ 59 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model	95
ภาพที่ 60 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model	98
ภาพที่ 61 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model	101
ภาพที่ 62 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.....	104
ภาพที่ 63 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น RhB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model	107
ภาพที่ 64 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MG 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model	110
ภาพที่ 65 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2	

cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.....	113
ภาพที่ 66 กราฟเบรคทูรของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.....	116
ภาพที่ 67 กราฟเบรคทูรของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon–Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model.....	119
ภาพที่ 68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance).....	123
ภาพที่ 69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine B (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance).....	124
ภาพที่ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Malachite green (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance).....	125
ภาพที่ 71 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)	128
ภาพที่ 72 องค์ประกอบของเครื่อง SEM.....	129
ภาพที่ 73 การหลุดของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่างๆ.....	129
ภาพที่ 74 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	131
ภาพที่ 75 กราฟแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ได้จากเครื่อง FTIR.....	132
ภาพที่ 76 ภาพแสดงเกี่ยวกับส่วนประกอบของเครื่อง FTIR Spectrometer	132
ภาพที่ 77 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer.....	133
ภาพที่ 78 สเปกตรัม UV-VIS	133
ภาพที่ 79 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	134
ภาพที่ 80 องค์ประกอบของเครื่อง Double beam spectrophotometer	135

ภาพที่ 81 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET)	137
ภาพที่ 82 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ	138
ภาพที่ 83 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ	138
ภาพที่ 84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์.....	139
ภาพที่ 85 เครื่อง X-ray Photoelectron Spectrometer (XPS).....	140
ภาพที่ 86 หลักการของเครื่อง XPS.....	141
ภาพที่ 87 เครื่อง Raman spectrometer.....	142
ภาพที่ 88 การเกิดการกระเจิง (Scattering).....	142



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทรัพยากรน้ำมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเฉพาะมนุษย์ สิ่งสำคัญคือ น้ำ เป็นทรัพยากรพื้นฐานซึ่งไม่เพียงแต่สำหรับอุปโภคบริโภคโดยตรง แต่ยังเป็นทรัพยากรพื้นฐานสำหรับการผลิตทั้งเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เป็นต้น ทุกวันนี้ประเทศไทย และหลายประเทศทั่วโลก กำลังเผชิญวิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำ สำหรับประเทศไทยก็ได้มีการรณรงค์เรื่องการประหยัดน้ำในทุก ๆ ปี เพื่อให้เล็งเห็นความสำคัญของทรัพยากรน้ำที่ถูกทำลายด้วยมลพิษจนด้อยคุณภาพ นอกจากนี้ยังถูกคุกคามด้วยปัญหาน้ำท่วมที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ปัญหาภัยแล้งที่ทวีความรุนแรงขึ้น แหล่งน้ำธรรมชาติลดน้อยลงสวนทางกับการเติบโตของภาคการเกษตร ภาคอุตสาหกรรม และสังคมเมือง ล้วนแต่ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและปริมาณน้ำทำให้ยากที่จะบริหารจัดการได้ หน่วยงานหลายหน่วยงานได้เสนอทางออกในปัญหานี้หลายข้อ อาทิ การอนุรักษ์น้ำ การบำบัดน้ำเสีย การปรับเปลี่ยนหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ การจัดการเรื่องน้ำและดินให้เหมาะสม การทำวิจัยแหล่งทรัพยากรที่มีอยู่ ออกกฎหมายการใช้น้ำที่ทันสมัย การจัดสรรน้ำอย่างเสมอภาค และการปลูกจิตสำนึกในหมู่ประชาชนให้ตระหนักถึงคุณค่าความสำคัญของน้ำ ยิ่งกว่านั้น การแก้ปัญหาเรื่องน้ำยังต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกฝ่ายทุกภาคส่วน จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำก็เป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาเรื่องทรัพยากรน้ำ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอน (Precipitation) การประยุคต์โดยใช้เยื่อหุ้มผ่าน (Membrane) หรือตัวกรอง (Filter) ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) และการแยกสารผ่านเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (Dialysis) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalyst) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียในประเทศมีข้อจำกัดสำคัญในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่ยังสูงและขาดการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ในช่วงเวลาที่ผ่านมาไม่นานมานี้วิธีการดูดซับ (Adsorption) ได้เป็นทางเลือกสำหรับการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับมีข้อได้เปรียบเรื่องของความคุ้มค่า ประสิทธิภาพสูง สามารถปรับให้เหมาะสมกับสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แล้วตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนใหญ่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถปรับคุณภาพของน้ำเสียให้มีคุณภาพน้ำที่ดีขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับทางเลือกวัสดุมาใช้เป็นตัวดูดซับและการออกแบบระบบในการดูดซับ ตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียนั้นได้มีการพัฒนาโดย

มีประสิทธิภาพและราคาแตกต่างกันออกไป ซึ่งวิธีการดูดซับโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) นั้นได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนประจุบวก ประจุลบ เช่น สีย้อม และโลหะหนัก เป็นต้น นอกจากน้ำเสีย สำหรับวัสดุคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน (N-doped carbon) สามารถเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมที่ดีสำหรับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสภาพไฟฟ้าลบ (Electronegativity) ของไนโตรเจนสูงกว่าคาร์บอน ดังนั้นไนโตรเจนที่อยู่ในโครงข่ายคาร์บอน (Carbon framework) จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นประจุบวกของคาร์บอน ทำให้สามารถเพิ่มความมีขั้วที่ผิว ความสามารถในการเปียกผิว และสภาพนำไฟฟ้าได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ นั้นมีปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบและมีราคาสูง ส่งผลทำให้ราคาของคาร์บอนกัมมันต์มีราคาสูง ดังนั้น จำเป็นต้องหาวัตถุดิบที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายโดยทั่วไป วัตถุดิบที่นำมาเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ควรมีสมบัติดังนี้ คือ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (โดยปกติสูงกว่า 45%) วัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ ถ่านหิน กะลามะพร้าว และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือวัสดุชีวมวล (Biomass) เป็นต้น ชีวมวลโดยเฉพาะจากพืชจัดเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์อย่างมากเนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย และเป็นวัตถุดิบที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผักตบชวาเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัชพืชน้ำที่ก่อให้เกิดปัญหามากที่สุดให้แก่ประเทศต่าง ๆ ทั้งในเขตร้อนและกึ่งร้อนทั่วโลก รวมทั้งในประเทศไทยด้วย เนื่องจากการแพร่พันธุ์ของผักตบชวาตามแหล่งน้ำธรรมชาติและอัตราการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีอายุหลายฤดู ทนได้ทั้งอากาศร้อนและเย็น ทำให้ส่งผลกระทบอย่างมากต่อการไหลของน้ำ ปิดกั้นแสงแดดไม่ให้เข้าถึงพืชน้ำ ก่อให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำไม่ได้ ขาดอาหาร ขาดออกซิเจนส่งผลให้ปลาตายและยังทำหน้าที่เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของยุงอีกด้วย ถึงแม้ปัจจุบันจะมีหน่วยงานทั้งราชการและภาคประชาชนร่วมมือกันจัดการกับปัญหาดังกล่าวเพื่อลดปริมาณผักตบชวา เช่น นำผักตบชวามาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องจักสานต่าง ๆ หรือสินค้าแปรรูป และอาหารสัตว์ แต่ยังไม่สามารถที่จะกำจัดผักตบชวาให้หมดไปได้ ในการแก้ปัญหาอย่างยั่งยืนจึงมีหลายฝ่ายคิดค้นและศึกษาวิจัยหลายด้าน เช่น การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือนำมาทำเป็นวัสดุคาร์บอนเพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้เชื้อเพลิงและการผลิตวัสดุคาร์บอนจากผักตบชวา นอกจากจะช่วยลดปัญหาวัชพืชน้ำในแหล่งน้ำแล้วยังสร้างมูลค่าเพิ่มให้ผักตบชวาอีกด้วย และผักตบชวามีเซลลูโลสในปริมาณสูง (20%) และเฮมิเซลลูโลส (33%) และมีปริมาณลิกนินต่ำ (10%) ชีวมวลทั่วไปจากพืชทุกตัวไม่มีเซลลูโลส 30-50% เฮมิเซลลูโลส 20-40% และลิกนิน 15-30% ผักตบชวามีปริมาณลิกนินที่ต่ำ เซลลูโลสและเฮมิ

เซลล์จะถูกละลายเปลี่ยนเป็นคาร์บอนได้ง่ายขึ้น จึงน่าจะเหมาะสำหรับเป็นวัตถุดิบชีวมวลในการเตรียมคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน (N-doped mesoporous carbon) ซึ่งเตรียมมาจากผักตบชวา สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสีย โดยจะทำการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับ อัตราการไหลของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย และปริมาณของไนโตรเจนที่เจือในคาร์บอน ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการดูดซับของสีย้อมในสารละลายโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับในระบบต่อเนื่อง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนที่เจือในคาร์บอนสำหรับการกำจัดสีย้อมในระบบต่อเนื่อง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับในระบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการกำจัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู (Methylene Blue) มาลาไคท์กรีน (Malachite Green) และโรดามีนบี (Rhodamine B)
- 1.3.2 ศึกษาโดยนำวัสดุชีวมวลผักตบชวาจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ตลาดน้ำดอนหวาย เป็นวัตถุดิบในการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน
- 1.3.3 กำจัดสีย้อมโดยใช้วิธีการดูดซับในระบบต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนได้จากผักตบชวา
- 1.4.2 สามารถกำจัดสีย้อม เช่นเมทิลีนบลู มาลาไคท์กรีน และโรดามีนบี ได้โดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับในระบบต่อเนื่องได้

- 1.4.3 สามารถเตรียมตัวดูดซับจากชีวมวลที่เป็นวัชพืชซึ่งส่งผลเสียต่อระบบนิเวศทางน้ำ ให้สามารถนำไปใช้บำบัดน้ำได้ และเป็นการช่วยลดปัญหาวัชพืชในแหล่งน้ำ แล้วยังสร้างมูลค่าเพิ่มให้เกษตรกรอีกด้วย



บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuffs)

สีย้อมสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี ความหมายของสีย้อม เป็นสารที่มีสีที่สามารถยึดติดกับวัตถุหรือจำพวกเส้นใยได้ เมื่อเกาะติดได้แล้วจะหลุดออกได้ยาก โดยสีย้อมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สีย้อมจากกระบวนการเคมีและสีย้อมทางธรรมชาติ สีย้อมที่ได้จากธรรมชาติมีความไม่คงทนของสีย้อม และสีที่ได้บางครั้งไม่สดใสเท่าที่ควร เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมสังเคราะห์ ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้สีย้อมสังเคราะห์เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามสีย้อมสังเคราะห์ส่วนใหญ่เป็นสารที่มีอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม โดยสีย้อมสังเคราะห์สามารถแบ่งตามโครงสร้างเคมีได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงกลุ่มของสีย้อมแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี [1]

กลุ่มของสีย้อม	หมู่เคมีในโครงสร้าง	ชนิดของสีที่ใช้ในการย้อม
สีเอโซ	-N=N- หนึ่งกลุ่ม	สีไดเร็กต์ สีอะโซอิก สีเบสิก สีสเปรย์ สีเอซิด สีโลหะเชิงซ้อน
สีไดเอโซและสีพอลิเอโซอิก	-N=N- ตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป	สีรีแอคทีฟ
สีได- และสีไตร- เอริลคาร์บอเนียม	หมู่แทนที่เอริลจำนวน 2,3 หมู่	สีเบสิก
สีแอนทราควินอยด์	แอนทราควิโนนและมีหมู่แทนที่ที่ตำแหน่ง 1,4,5,8	สีเอซิด สีแวต สีรีแอคทีฟ
สีอินดิโกอยด์	กลุ่มอินดิโกอยด์	สีแวต
สีซัลเฟอร์	อะตอมซัลเฟอร์ต่อกับวงแหวน	สีซัลเฟอร์
สีทาโลไซยานิน	กลุ่มทาโลไซยานิน	ฟิกเมนต์
สีไนโตร	กลุ่มไนโตร	สีเอซิด สีสเปรย์

ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามการใช้งานบ่อยๆ ดังนี้

2.1.1 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye) คือสีที่สามารถละลายน้ำได้ จะมีประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำ มีสมบัติเป็นด่าง เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส เนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสจะมีหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) จำนวนมาก โมเลกุลของสีจะไปยึดติดกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) สีรีแอคทีฟสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ย้อมด้วยอุณหภูมิสูง และย้อมด้วยอุณหภูมิต่ำ

2.1.2 สีเอซิด (Acid dye) คือสีที่สามารถละลายน้ำได้ จะมีประจุลบ (Anionic dye) โดยส่วนใหญ่จะเป็นเกลือของกรดกำมะถัน โดยโมเลกุลของสีจะเกิดการยึดติดด้วยพันธะไอออนิก (Ionic bond) จะใช้ย้อมสีของเส้นใยโปรตีน ในสภาวะกรดเจือจาง สีเอซิดไม่ค่อยทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ

2.1.3 สีไดเรกต์ (Direct dye) คือสีที่สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟนิค ($-\text{SO}_3\text{H}$) ทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ เป็นประจุลบ การยึดติดด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) สีไดเรกต์มีราคาถูก ย้อมง่าย ทนแสง ไม่ทนต่อการซัก สีตกง่าย

2.1.4 สีเบสิค (Basic dye) หรือเรียกว่า สีแคทไอออนิก (Cationic dye) มีส่วนประกอบเป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) เป็นประจุลบ เมื่อละลายน้ำจะแสดงเป็นประจุบวก โดยโครงสร้างที่เป็นประจุบวกนี้ จะไปยึดติดด้วยพันธะไอออนิก นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และเส้นใยอะคริลิก ไม่ควรย้อมเส้นใยธรรมชาติถ้าย้อมแล้วจะไม่ทนต่อการซักและแสง

2.1.5 สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) คือสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีความสามารถกระจายตัวได้ดี สามารถใช้สารพา (Carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีไปติดได้ดีมากขึ้น โดยการย้อมจะใช้อุณหภูมิและความดันสูง จะใช้ย้อมเส้นใยพอลิเอสเตอร์ เส้นใยอะคริลิก ไนลอน และเส้นใยอะซิเตท เป็นสีที่ทนแสงและการซัก แต่สีจะซีดเมื่อถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด

2.1.6 สีแวต (Vat dye) คือสีที่ไม่ละลายน้ำ การย้อมทำโดยให้สีละลายออกมาจากต้นพืช โดยใช้ถังหมัก ถังหมักจะเรียกว่า “Vat” จึงเรียกสีว่า สีแวต การย้อมต้องให้สีแวตละลายกับน้ำโดยทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สีแวตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือละลายกับน้ำได้ จากนั้นนำเส้นใยไปย้อม แล้วนำไปผึ่งในอากาศเส้นใยจะถูกออกซิไดซ์แล้วสีแวตจะติดกับเส้นใย

2.1.7 สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye) คือสีที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้เล็กน้อย การย้อมติดโมเลกุลของสีทำโดยการแตกออกของโมเลกุลแล้วจะเกิดพันธะเชื่อมระหว่างกำมะถัน (Sulfur) 2 อะตอม หรือเรียกว่า “Sulfur linkage” เกิดเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ละลายน้ำได้และสามารถย้อมติดกับเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) ได้ เป็นสีที่มีความคงทนต่อน้ำดีมาก ทนแสงปานกลาง แต่มีความคงทนต่ำเมื่อเจอคลอรีน [2]

โดยจะยกตัวอย่างสีย้อมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหรือในด้านต่าง ๆ มา 3 ชนิดคือ

1. เมทิลีนบลู (Methylene blue; MB)

เมทิลีนบลู หรือ 3,7-bis (Dimethylamino) -phenothiazin-5-ium chloride (IUPAC Name) สูตรโมเลกุลคือ $C_{16}H_{18}ClN_3S$ น้ำหนักโมเลกุล 319.85 กรัมต่อโมล สูตรโครงสร้างดังภาพที่ 1 เมื่ออยู่ในช่วงที่เป็นในสภาวะกรด เมทิลีนบลูอาจเป็นสีม่วง เมื่ออยู่ในสภาวะเบสอาจเป็นสีเขียว ซึ่งจัดว่าเป็นสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติก เมทิลีนบลูจะมีลักษณะเป็นผงของแข็งสีเขียวเข้มเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นสารละลายที่มีสีฟ้า เมทิลีนบลูเป็นสีย้อมที่เป็นแคทไอออนิก (Cationic dye) ซึ่งมีไอออนบวกเป็นตัวให้สี เมื่อนำไปย้อมรวมกับส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่บนผิว หรือภายในเซลล์ ไอออนบวกของสีจะจับกับไอออนลบของกรดนิวคลีอิก โดยจับกันด้วยพันธะหลายชนิด เช่น พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน และแรงวานเดอร์วาลส์ ผลเสียเมื่อได้รับสีย้อมเมทิลีนบลูมากเกินไปอาจทำให้เนื้อเยื่อตาย ส่งผลต่อระบบทางเดินอาหาร คลื่นไส้ อาเจียน หรืออาจจะมีอาการปวด วิงเวียนศีรษะ เจ็บหน้าอก แน่นหน้าอก หายใจเร็ว บางรายอาจเกิดอาการระคายเคืองต่อระบบทางเดินปัสสาวะ [3]

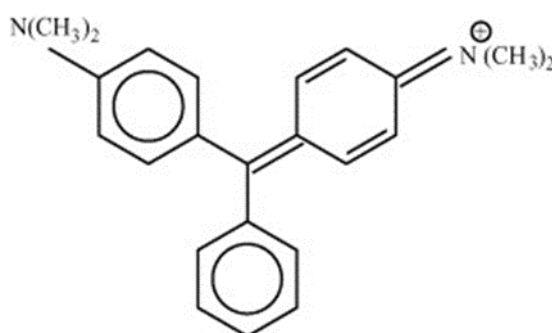


ภาพที่ 1 โครงสร้างเมทิลีนบลู [4]

2. มาลาไคท์กรีน (Malachite Green; MG)

มาลาไคท์กรีน หรือ 4-[[4-(Dimethylamino)phenyl](phenyl)methylidene]-N,N-dimethylcyclohexa-2,5-dien-1-iminium chloride (IUPAC Name) มีลักษณะทั่วไปเป็นผงสีเขียว ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายสีเขียวอมฟ้า มีสูตรทางเคมี $C_{23}H_{25}N_2$ น้ำหนักโมเลกุล 364.911 กรัมต่อโมล เป็นสีย้อมที่เป็นแคทไอออนิก (Cationic dye) มาลาไคท์กรีนที่ใช้กันปัจจุบันมีอยู่ 2 รูป คือ รูปของมาลาไคท์กรีน ออกซาเลต (Malachite green oxalate) และรูปของมาลาไคท์กรีน ไฮโดรคลอไรด์ (Malachite green hydrochloride) คุณสมบัติทั่วไปของมาลาไคท์กรีนเป็นสีย้อมที่สำหรับย้อมวัสดุต่าง ๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ฝ้าย และกระดาษ และจะถูกดูดซึมและมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาไคท์กรีน (Leucomalachite ; LMG) ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำหรือสิ่งมีชีวิต และจะตกค้างเป็นระยะเวลานาน ความเป็นพิษของมาลาไคท์กรีน เช่น

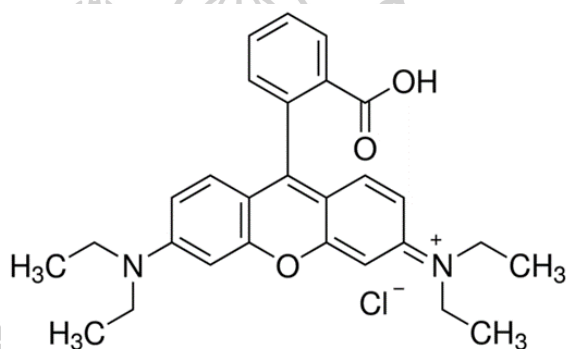
- สามารถก่อให้เกิดมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ และตับในสัตว์ทดลอง
- เหนียวน้ำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมในการก่อให้เกิดเนื้องอกในสัตว์ทดลอง
- ทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม โดยการเพิ่มความยาวของสาย DNA
- ทำให้การพัฒนาของตัวอ่อน หลังฟักออกจากไข่มีความผิดปกติไปจากเดิมถึง 3-5 เท่า
- เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือดทำให้ระดับของแคลเซียมและโปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว
- เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อสาหร่าย พืชน้ำ และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำจืดและในทะเล [5]



ภาพที่ 2 โครงสร้างของมาลาไคท์กรีน[6]

3. โรดามีนบี (Rhodamine B)

โรดามีนบี (Rhodamine B) หรือ [9-(2-carboxyphenyl)-6-diethylamino-3-xanthenylidene]-diethylammonium chloride (IUPAC Name) เป็นสารเคมีและสีย้อมที่นิยมนำมาใช้เป็นสีย้อมเรืองแสง เนื่องจากสามารถตรวจพบได้ง่ายและราคาไม่แพงด้วย เป็นสีย้อมที่เป็นแคตไอออนิก (Cationic dye) สีย้อมโรดามีนถูกใช้อย่างกว้างขวางในการใช้งานเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น การส่องกล้องจุลทรรศน์ โรดามีนบีสามารถละลายได้ในน้ำ แล้วให้สีแดงหรือออกชมพูที่อาจเติมลงไปในพริก เป็นสารก่อให้เกิดโรคมะเร็ง โดยมีสูตรทางเคมี $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ น้ำหนักโมเลกุลอยู่ที่ 479.02 g/mol ดังนั้นต้องมีการควบคุมเพื่อความปลอดภัย [7]



ภาพที่ 3 โครงสร้างโรดามีนบี [8]

ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานฟอกย้อมจะมีสารเคมีปนเปื้อนออกมา ทั้งที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้จึงทำให้น้ำมีสภาพเปลี่ยนไปเป็นจากเดิม เช่น

- อุณหภูมิของน้ำ อาจสูงกว่าปกติหรือต่ำกว่าปกติ
- มีกลิ่นที่รบกวนหรือเหม็น
- อาจมีสีที่ไม่พึงประสงค์
- ความเป็นกรดเบสที่มากกว่าปกติ
- ค่า BOD น้อยลงค่าการละลาย ออกซิเจนในน้ำลดลง
- ค่า COD เพิ่มขึ้นค่าการละลาย คาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมากขึ้น
- มีพวกสารแขวนลอยหรือโลหะ

ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตได้และไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้แล้วอาจส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดโรคต่างๆ ตามมา เมื่อสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชไม่สามารถดำรงอยู่ได้ทำให้มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้นบรรยากาศรอบ ๆ จึงไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิต [9]

2.2 การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment)

การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมในน้ำทิ้งเป็นกระบวนการลดปริมาณสารพิษหรือสีที่อยู่ในน้ำทิ้งให้มีปริมาณน้อยหรือหมดไปจากน้ำเสียเพื่อให้สามารถนำกลับใช้ประโยชน์ได้และไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีหลากหลายวิธียกตัวอย่าง เช่น

2.2.1 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) หรือการสลายตัวทางชีวภาพ

การย่อยสลายทางชีวภาพ คือกระบวนการที่นำสารอินทรีย์มาทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ทำให้ย่อยสลายได้ ซึ่งอินทรีย์วัตถุจะเปลี่ยนเป็นแร่ธาตุ สารลดแรงตึงผิว ซึ่งจะหลั่งออกมายังผิวด้านนอกโดยการทำงานของเซลล์จุลินทรีย์ เพื่อเพิ่มกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ การย่อยสลายทางทั่วไปใช้อินทรีย์วัตถุ เช่น พืช สัตว์ และสารอื่น ๆ ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต หรือวัตถุที่มีความคล้ายคลึงกับพืชและสัตว์ ที่ทำให้จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ จุลินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจุลินทรีย์มีความหลากหลายในกระบวนการสร้าง นำไปสู่การย่อยสลาย การเปลี่ยนรูปแบบหรือสะสมในรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมัน พอลิคลอรีเนตไบฟีนิล (PCBs) พอลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) สารทางยา สารกัมมันตรังสี และโลหะหนัก [10]

2.2.2 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Chemical coagulation หรือ Precipitation)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นการใช้หลักการทางกายภาพ เช่น แรงแม่เหล็ก แรงเหวี่ยง แรงหนีศูนย์กลาง เป็นต้น เพื่อกำจัดหรือขจัดเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำจึงนับเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียขั้นแรกที่ถูกนำมาใช้ก่อนที่น้ำเสียจะถูกนำไปบำบัดขั้นต่อไป จนกว่าจะมีคุณภาพดีพอที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นการใช้สารเคมีช่วยตกตะกอน โดยให้เติมสารเคมี (Coagulant) ลงไปเพื่อเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กให้รวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้น เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Flocculation [11]

2.2.3 การปรับสภาพด้วยโอโซน (Ozonation)

โอโซนมีคุณสมบัติที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างรุนแรง สามารถทำลายเซลล์เนื้อเยื่อของเชื้อโรคได้แบบเฉียบพลัน มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีน 3,125 เท่า โอโซนใน

น้ำจะทำการออกซิเดชันและรีดักชัน สารประกอบที่เป็นพิษให้แตกตัวและรวมตัวกันใหม่ ทำให้สลายโครงสร้างของสารเคมีที่เป็นพิษเป็นองค์ประกอบทางเคมีรูปอื่นที่ไม่เป็นอันตราย อีกทั้งสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น ธาตุเหล็ก แมงกานีสและสารโลหะหนักบางชนิด ให้เกิดการออกซิเดชันรวมตัวเป็นตะกอนและถูกกรองออกได้โดยง่าย แล้วโอโซนสามารถแยกสิ่งปนเปื้อนในน้ำให้ใสขึ้นนี้ได้ด้วยวิธีออกซิไดซ์กับสารแขวนลอยเหล่านี้ให้เกิดการแยกตัวและรวมตัวใหม่เป็นผลึกใหญ่ขึ้นพร้อมที่จะตกตะกอนทำให้น้ำใสสะอาดขึ้น [12]

2.2.4 การดูดซับด้วยคาร์บอน (Carbon adsorption)

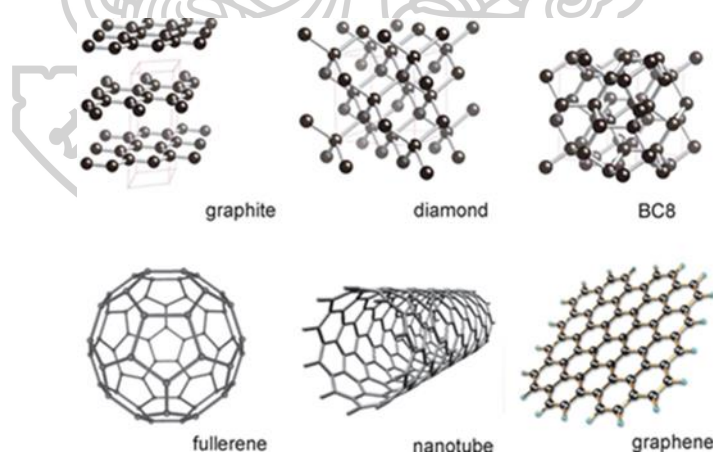
การดูดซับด้วยคาร์บอนเป็นกระบวนการที่ใช้ผงคาร์บอนหรือผงถ่านดูดซับเอาสารเคมี (สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์) บางชนิดที่ละลายอยู่ในน้ำเสียไว้หลังจากแยกเอาผงถ่านออกแล้วจะได้น้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานระบายออกจากโรงงานได้ผงถ่านที่นำมาดูดซับสี สารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์เป็นผงถ่านที่มีขนาดเล็ก 0.1 มิลลิเมตรผ่านการเผาในเตาที่มีออกซิเจนจนร้อนแดงเพื่อไล่สารพวกไฮโดรคาร์บอน แล้วนำมากระตุ้น (Activation) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) จนโครงสร้างพรุนไปทั่ว จากนั้นนำมาแยกขนาดผงถ่านพวกนี้เมื่อนำมาใช้คล้ายวัสดุกรองในถังกรอง โดยปล่อยให้ น้ำเสียที่ต้องการกำจัดไหลผ่านถังกรองถ่านช้าๆ เพื่อให้เกิดการดูดซับได้เต็มที่ น้ำที่ผ่านการกรองนี้แล้วจะระบายทิ้งหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ ส่วนตัวผงถ่านที่หมดประสิทธิภาพการดูดซับแล้ว สามารถนำกลับมาล้างด้วยสารเคมีหรือนำกลับไปเผาซ้ำเพื่อปรับคืนสภาพ แล้วนำมาใช้ใหม่ได้ทำซ้ำ ๆ เช่นนี้ไปจนกว่าผงถ่านนั้นจะหมดสภาพไปจริง ๆ ในกรณีนี้ใช้ได้กับการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีติดแน่นกับผงถ่าน หากในระหว่างการกรองหรือดูดซับเกิดปฏิกิริยาเคมีติดแน่นกับผงถ่านก็ไม่สามารถนำมาปรับคืนสภาพได้ต้องนำไปกำจัดด้วยการเผาต่อไป [13]

2.3 คาร์บอนกัมมันต์หรือถ่านกัมมันต์ (Activated carbon หรือ Activated charcoal)

การดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์เป็นที่นิยมอย่างมากในเรื่องการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ต่ำและมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน คาร์บอนกัมมันต์ คือ คาร์บอนอีกรูปแบบหนึ่งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงให้มีความเป็นรูพรุนสูง โดยคาร์บอนนั้นมีเลขอะตอมเท่ากับ 6 มีโปรตอนนิวตรอน และอิเล็กตรอนภายในนิวเคลียสอย่างละ 6 น้ำหนักของอะตอมเป็น 12.011 คาร์บอนจัดเป็นธาตุชนิดหนึ่ง ที่มีรูปร่างที่หลากหลาย สามารถรวมกับธาตุชนิดอื่นแล้วเกิดเป็นสารประกอบได้หลายชนิดมากกว่าล้านชนิด ยังพบได้ในธรรมชาติที่อยู่ในสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งอาจอยู่

ในรูปของ แกรไฟต์ หินปูน เพชร ถ่าน ปีโตรเลียม โดยคาร์บอนจะมีจุดเดือดประมาณ 3,500 - 4,500 องศาเซลเซียส ถ้าอยู่ในรูปของแกรไฟต์จะมีจุดเดือดประมาณ 3,375 องศาเซลเซียส เพชรจะมีจุดเดือดประมาณ 4,827 องศาเซลเซียส ในทุก ๆ รูปแบบของคาร์บอนไม่สามารถละลายในพลาสมาเคมีได้ ด้านสมบัติการนำไฟฟ้า แกรไฟต์จะนำไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากมีการให้ประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณสูง นี่คือนิวเคลียสที่ถ่านไฟฉายบรรจุผงถ่านลงไป ส่วนเพชรไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ การผลิตคาร์บอนให้มีคุณภาพที่ดีควรเผาให้เกินอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส คาร์บอนกัมมันต์ หรือถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) มีธาตุคาร์บอนเกือบ 57% เป็นปริมาณที่สูงมาก ถ้ากล่าวถึงคาร์บอนแล้วนั้นสามารถจัดกลุ่มของคาร์บอนได้โดยการแบ่งตามการใช้ประโยชน์ของคาร์บอนออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. ใช้ในการผลิตยางรถยนต์และส่วนประกอบในโครงสร้างของรถยนต์ คาร์บอนมีความแข็งแรง ไม่เป็นสนิม จึงเติมลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรือเสริมสมบัติให้ดีขึ้น
2. ใช้ในการผลิตเม็ดสี (Pigment) เช่น เม็ดสีผสมขึ้นส่วน สารเติมสี เนื่องจากคาร์บอนมีสีดำ
3. ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา อื่น ๆ อีกมากมายตามความต้องการ เช่น ยาเม็ดคาร์บอนกัมมันต์ ผ้าทอคาร์บอนกัมมันต์ เสื้อผ้า เป็นส่วนเสริมพลาสติก เพิ่มประสิทธิภาพ ความคงทน แข็งแรง เบา ได้แก่ รองเท้า หมวกกันน็อค รองเท้าบูท แท่งแกรไฟต์ ถ่านไฟฉาย และเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น



ภาพที่ 4 อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน [14]

หรือสามารถจัดกลุ่มของคาร์บอนได้ตามลักษณะอัญรูปที่แตกต่างกันดังนี้

1. แกรฟีนและแกรไฟต์ (Graphene and Graphite) แกรฟีนคือธาตุคาร์บอนที่อะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นชั้น ต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (Hexagonal) ที่เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ลักษณะการเชื่อมต่อจะมีโครงสร้างเหมือนกันรังผึ้งเป็นชั้นที่บางมากๆ จากโครงสร้างนี้อาจทำให้แกรฟีนมีความแข็งแรงที่มากกว่าเพชร และยังสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี แต่ถ้าหากนำต่อกันเป็นชั้นๆ จะได้รูปทรงเป็นสามมิติที่เรียกว่า แกรไฟต์ แกรไฟต์เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการทนไฟสูง ในแต่ละชั้นจะประกอบด้วยอิเล็กตรอนอิสระ เนื่องจากอะตอมคาร์บอนจะจับกับคาร์บอนอะตอมอื่นใช้เพียง 3 แขนจึงเหลืออิเล็กตรอนอิสระทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีในชั้นเดียวกัน และมีการเชื่อมต่อกันในแต่ละชั้นด้วยพันธะวาลเดอร์วาลส์ (Vander waal force) อ่อนๆ จึงส่งผลทำให้เป็นแร่ธาตุที่อ่อน

2. เพชร (Diamond) มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นธาตุคาร์บอน โดยโครงสร้างจะเป็นผลึกทรงลูกบาศก์ (Cubic) ลักษณะของผลึกจะอยู่ในรูปแบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากแขนคาร์บอนทั้งหมด 4 แขนจะไปจับอะตอมคาร์บอน 4 อะตอมที่อยู่ข้างๆ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) จึงไม่เหลือเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence electron) แล้วมีความแข็งแรงที่สูงมาก

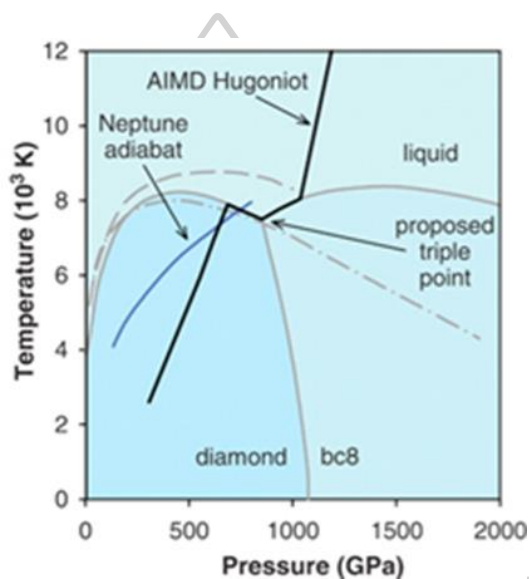
3. ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) เกิดมาจากการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นแนวยาว ที่มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน คล้ายคลึงกับการนำแผ่นแกรฟีนม้วนเชื่อมติดเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร โดยคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า ความยืดหยุ่นสูง น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก พื้นที่ผิวสัมผัสสูง สามารถนำไฟฟ้าหรือไม่นำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงของอะตอมคาร์บอน มีความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต

4. ฟูลเลอรีน (Fullerene) เป็นโครงสร้างของคาร์บอนที่เกิดจากจำนวนอะตอมคาร์บอน 60 อะตอมจัดเรียงต่อกันเป็นผลึกรูปทรงกลม ประกอบด้วยหกเหลี่ยม 20 วงและห้าเหลี่ยม 12 วงหรือมาจากการนำแกรฟีนม้วนให้เห็นทรงกลม โดยฟูลเลอรีนเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร และยังเป็นผลึกทรงกลมสมมาตรด้วย สมบัติจะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่จะนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มเติมโลหะเข้าไป

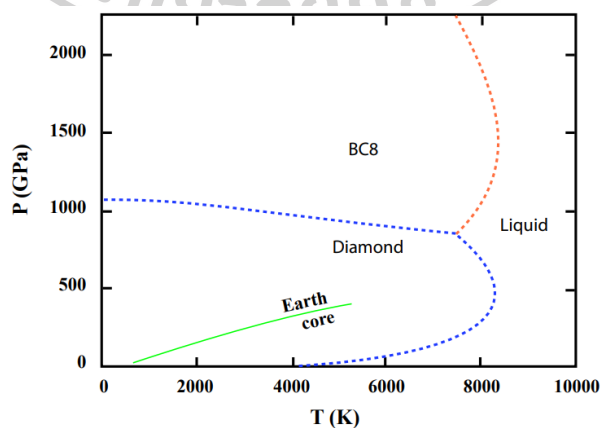
5. เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofiber) มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงเกลียวขดลงไป คล้ายกับการนำแผ่นแกรฟีนม้วนเป็นเกลียวคล้ายๆ กับสปริง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง

ประมาณ 2-100 นาโนเมตร โดยคุณสมบัติของเส้นใยนาโนคาร์บอนมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงมาก ความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ขึ้นอยู่กับจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน

6. BC8 เป็นโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นแบบเตตระฮีดรอน (Tetrahedral) ที่ผิดปกติเนื่องจากได้รับความร้อนและแรงดันที่สูงมากๆ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบเพชรเป็น BC8 จากโครงสร้างนี้ในอนาคตอาจจะใช้ในการประยุกต์เพื่อไว้รับแรงกระแทก



ภาพที่ 5 แผนภาพเฟสของคาร์บอนที่สภาวะต่างๆ [15]

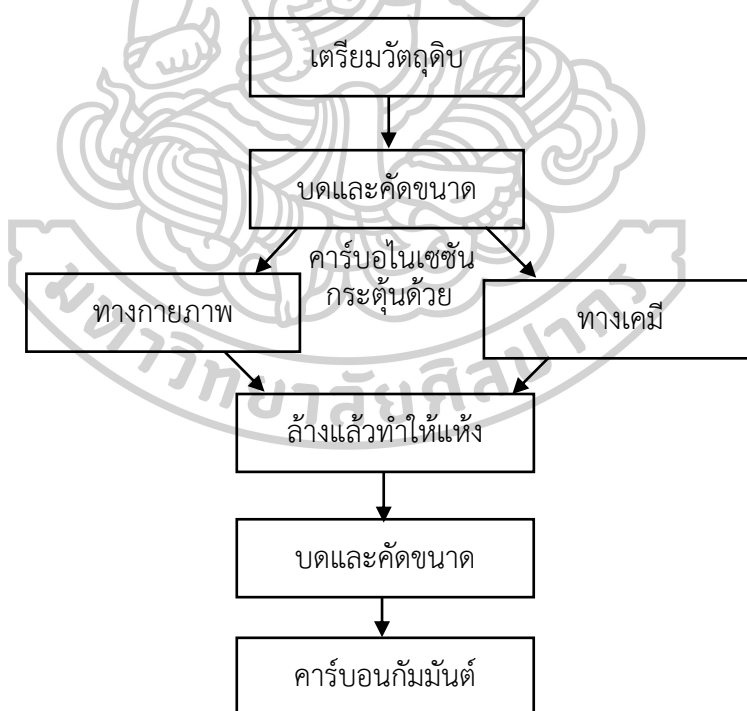


ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์เฟสของคาร์บอนที่คำนวณได้กับแรงดันและความร้อนของศูนย์กลางโลก [16]

กระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์นั้นมาจากการกระตุ้นด้วยทางกายภาพหรือทางเคมี เป็นคาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนสูง หลักการดูดซับอนุภาคหรือโมเลกุลของคาร์บอนกัมมันต์เป็นปฏิกิริยาทางกายภาพโดยอาศัยแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals's force) ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับนี้เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากพื้นที่ว่างภายในโครงสร้างมีพื้นที่น้อยลง วิธีการแก้ไขนำวัสดุอันเก่าออกและนำวัสดุใหม่เข้าไปแทน โดยวัสดุที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการกระตุ้นซ้ำ (Re-activation) เพื่อกำจัดสารต่างๆ ที่ดูดซับไว้ก่อนออก [17, 18]

2.3.1 การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

กระบวนการในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์นั้นมีมากมาย ขึ้นอยู่กับความต้องการ วัตถุดิบ อุปกรณ์ในการผลิต โดยทั่วไปกระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การทำให้กลายเป็นถ่านหรือเรียกว่า คาร์บอนเซชัน (Carbonization) และขั้นตอนการกระตุ้น [19]

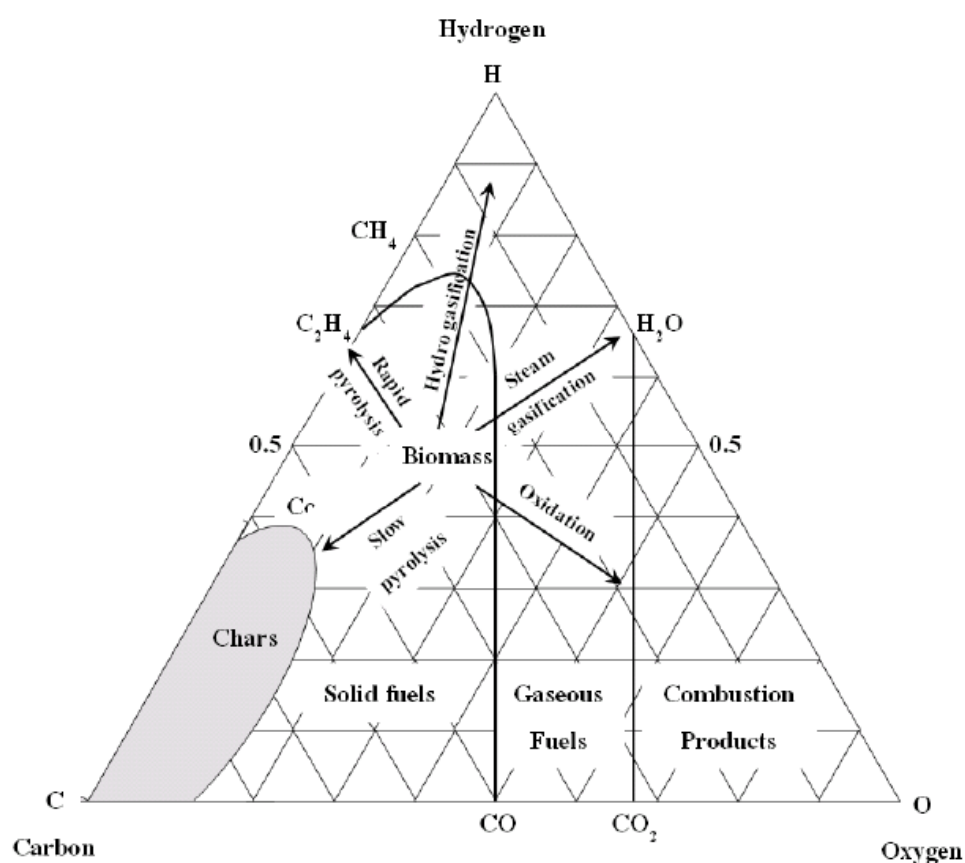


ภาพที่ 7 แผนผังการผลิตคาร์บอนกัมมันต์

2.3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ สามารถนำวัตถุดิบไปเริ่มได้เลย หรือนำไปบดและคัดขนาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ แต่บางทีวัตถุดิบเริ่มต้นมีความเหนียวและแข็งทำให้บดได้ยาก อาจนำไปทำคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ก่อน และนำไปบดเพื่อเพิ่มความสะดวกต่อการบด

2.3.1.2 การทำให้กลายเป็นถ่านหรือ คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการทำให้เกิดถ่านชาร์ (Char) ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และแก๊ส การคาร์บอนไนเซชันเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้นสามารถทำได้ง่าย โดยการเผาภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน

การให้ความร้อนที่กระบวนการแตกต่างกัน จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไปด้วย

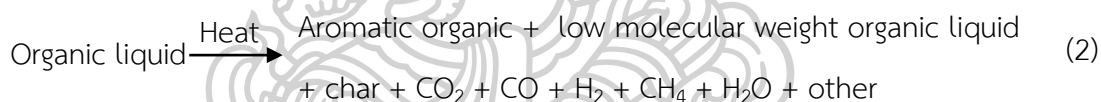
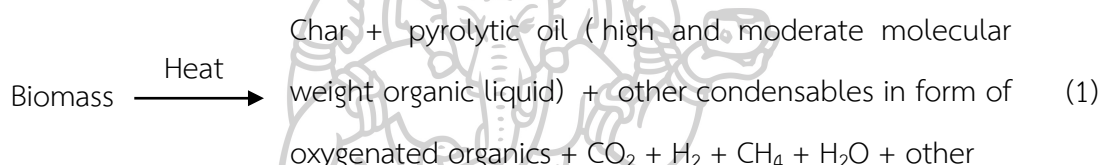


ภาพที่ 8 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์เมื่อกระบวนการทางความร้อนแตกต่างกันของชีวมวล [20]

การแบ่งโซนของกระบวนการให้ความร้อน มีปริมาณอากาศน้อยกว่าร้อยละ 20 เรียกว่า ไพโรไลซิส (Pyrolysis) มีอากาศร้อยละ 25-50 ในกระบวนการ เรียกว่า แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) มีอากาศร้อยละ 100 ในกระบวนการ เรียกว่า การเผาไหม้ (Combustion)

การไพโรไลซิส (Pyrolysis) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การไพโรไลซิสแบบช้าและการไพโรไลซิสแบบเร็ว การไพโรไลซิสแบบช้าจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์และการกระจายของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้อุณหภูมิตั้งเดิม (Temperature history) การไพโรไลซิสแบบรวดเร็วจะมีปริมาณและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิช่วงสุดท้าย

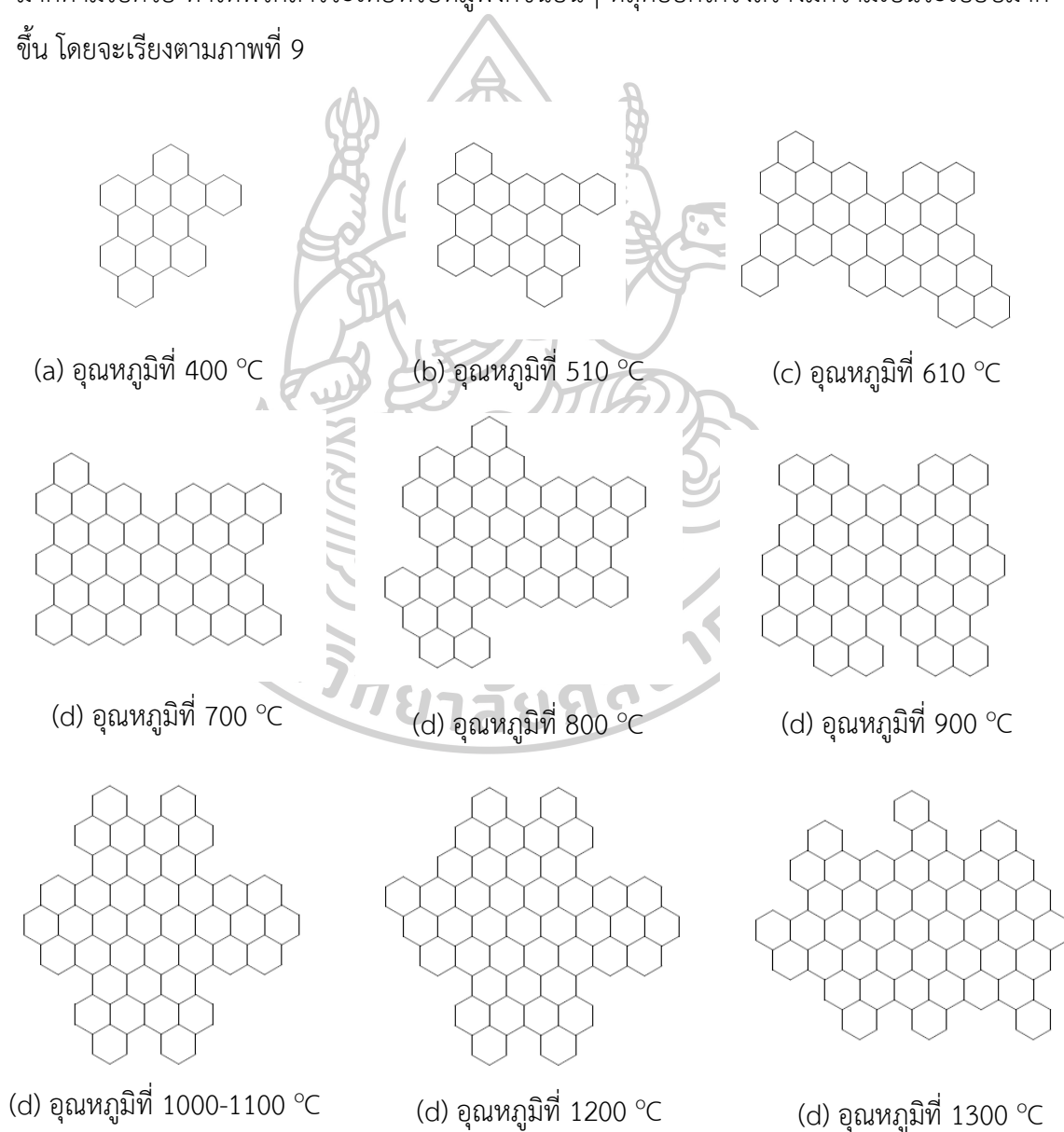
เมื่อชีวมวลได้รับพลังงานความร้อนจนเกิดการสลายตัวแบบ ไพโรไลซิส สามารถเกิดได้ดังสมการดังนี้



ขั้นตอนคาร์บอไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนที่เริ่มทำให้โครงสร้างมีรูพรุน แล้วขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการแตกออกของธาตุอื่นๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปแบบแก๊ส ส่วนคาร์บอนอิสระก็จะมารวมตัวกันในรูปของถ่านชาร์ โดยถ่านชาร์หลังได้รับการคาร์บอไนเซชันจะมีลักษณะเป็นสีดำ (Uniformly black) ตรงบริเวณที่เกิดการแตกหักจะมีความมันเงา (Shiny surface) ถ่านชาร์หลังจากคาร์บอไนเซชัน จะมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากจะมีการเกิดน้ำมันทาร์มาด้วย ซึ่งตัวน้ำมันนี้จะไปตกค้างที่

บริเวณรูพรุน (Pore) หรือบริเวณพื้นที่ผิว แต่สามารถนำไปพัฒนาต่อให้มีประสิทธิภาพที่มากขึ้นโดยการทำการกระตุ้น (Activation) แล้วยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของถ่านชาร์เมื่อได้รับคาร์บอนไนเซชันดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้มีพลังงานมากขึ้นพันธะที่อ่อนสามารถหลุดออกไปได้ วงแหวนของโครงสร้างถ่านชาร์แยกออกจากกันเป็นจำนวนมาก โดยช่วงอุณหภูมิที่ส่งผลมากที่สุดคือ อุณหภูมิช่วงสุดท้ายเมื่ออุณหภูมิยิ่งสูงจะมีพลังงานในการสลายพันธะมากตามไปด้วย ทำให้พวกสารระเหยหรือหม่ฟุ้งก่ขึ้นอื่นๆ หลุดออกโครงสร้างมีความเป็นระเบียบมากขึ้น โดยจะเรียงตามภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ภาพการจัดเรียงของคาร์บอนอะตอมที่อุณหภูมิต่างๆ [21]

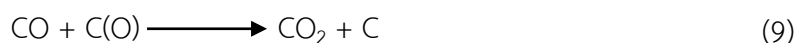
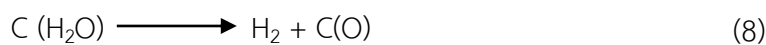
2. ตัวกลางของปฏิกิริยา (Medium of reaction) โดยตัวกลางของการเกิดปฏิกิริยา คือ แก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่เป็นแก๊สเฉื่อยต่อการเผาไหม้และแก๊สที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาทางความร้อน ถ้าแก๊สที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนมีปริมาณที่น้อยกว่าแก๊สไนโตรเจน จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาการกระตุ้นสูง

3. อัตราการให้ความร้อน (Heat of carbonization) เป็นอีกปัจจัยสำคัญอีกตัวหนึ่ง ถ้ามีการให้อัตราความร้อนที่อุณหภูมิรวดเร็ว ถ่านชาร์จะมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากสภาวะหรือหมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะเกิดการแตกออกหรือปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว แล้วจะส่งผลทำให้คาร์บอนจัดเรียงตัวไม่ค่อยเป็นระเบียบ แต่จะสามารถทำปฏิกิริยาการกระตุ้นได้มาก เนื่องจากตัวกระตุ้นจะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย

4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ (Nature of material) โดยแต่ละวัตถุดิบจะมีปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน จึงมีสภาวะที่เหมาะสมการคาร์บอนในเซชันที่แตกต่างกัน วัตถุดิบต่างกันอาจใช้วิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน [22]

2.3.1.3 กระบวนการกระตุ้น (Activation) คือกระบวนการถ่านชาร์มีความสามารถในการดูดซับที่สูงขึ้น ซึ่งอาจมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวที่มากขึ้นและมีความว่องไวทางปฏิกิริยามากขึ้น การกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันได้แก่

2.3.1.3.1 การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) วัตถุดิบจะถูกเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอน โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อป้องกันการลุกไหม้แล้วเพื่อกำจัดสารอื่น ๆ ออกไปด้วย จากนั้นนำไปกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900 - 1100 องศาเซลเซียสในสภาวะที่มีไอน้ำ หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และนำไปบดเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ข้อดีคือไม่มีสารตกค้าง ข้อเสียคืออุณหภูมิที่ใช้สูงและใช้เวลานาน การกระตุ้นจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

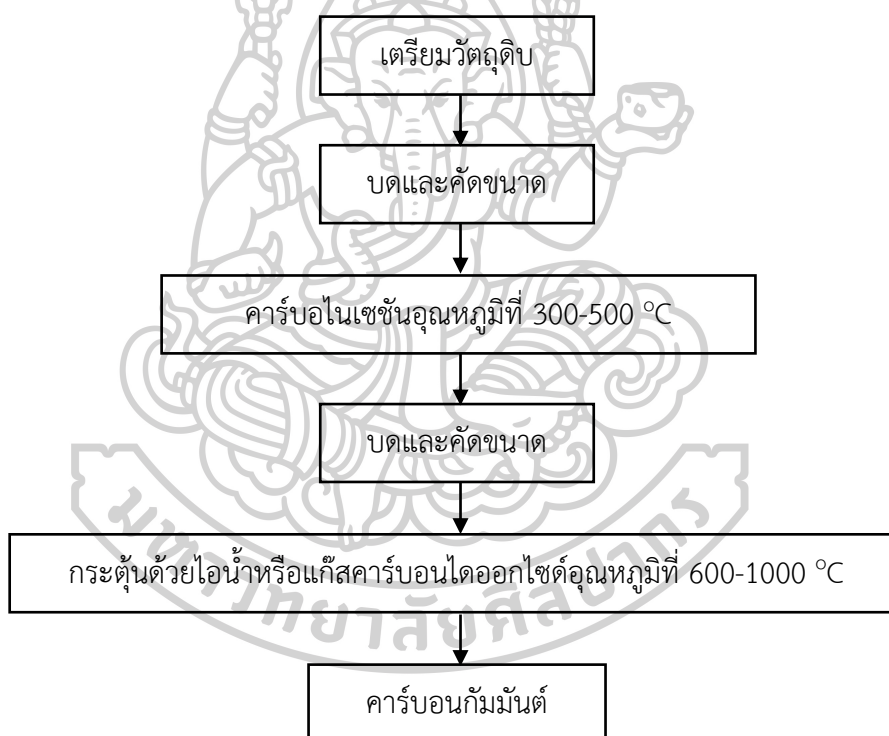


จากสมการที่ 5,6 จะเกิดการดูดซึมน้ำเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบ แล้วได้รับความร้อนเกิดการสลายตัวเป็น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

จากสมการที่ 7 เป็นสมการที่ทำให้ระบบสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยลง เนื่องจากมีแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เข้าไปแทรกแทน

จากสมการที่ 8 น้ำที่อยู่ในโครงสร้างวัตถุดิบ ได้รับความร้อนเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และอาจทำให้เกิดรูพรุนขึ้น

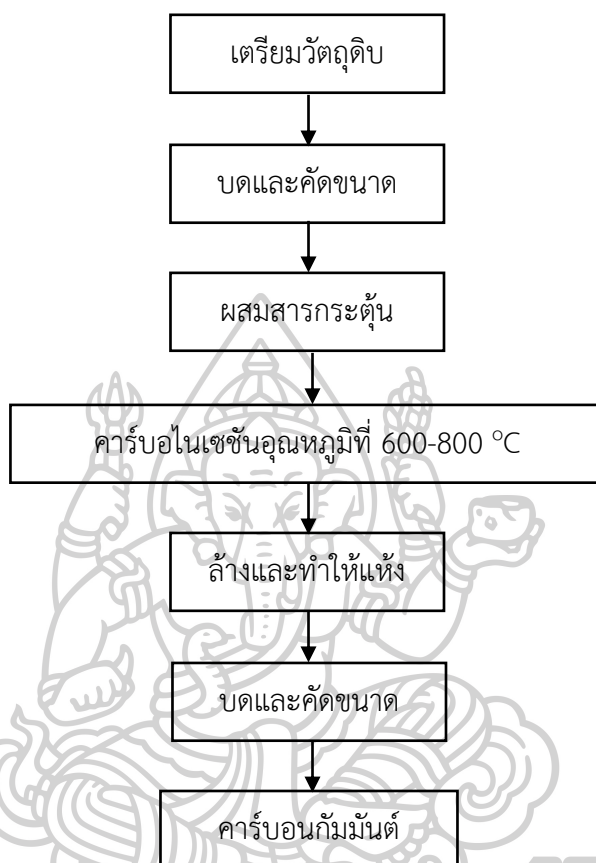
จากสมการที่ 9 แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่อยู่ในโครงสร้างวัตถุดิบ จะหลุดออกแล้วทำให้เกิดรูพรุนขึ้น [23]



ภาพที่ 10 แผนผังขั้นตอนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

2.3.1.3.2 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) วัตถุดิบจะถูกเปลี่ยนโดยสารเคมีบางอย่าง เช่น กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นต้น ใช้ร่วมกับอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งในกระบวนการนี้จะนิยมมากกว่า เนื่องจากใช้ความร้อนที่ต่ำกว่าและเวลาน้อยกว่า แต่วิธีการนี้อาจมีปัญหาเรื่องสารตกค้าง เช่น มีสังกะสีตกค้าง ในผลิตภัณฑ์กรณีถ้าใช้ซิงค์คลอไรด์ เป็นต้น สรุปข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก

และรวดเร็ว แต่ข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างทำให้ต้องล้างสารเคมีออกก่อน จึงต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายและเวลาในการล้างสารเคมี [24]



ภาพที่ 11 แผนผังขั้นตอนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี

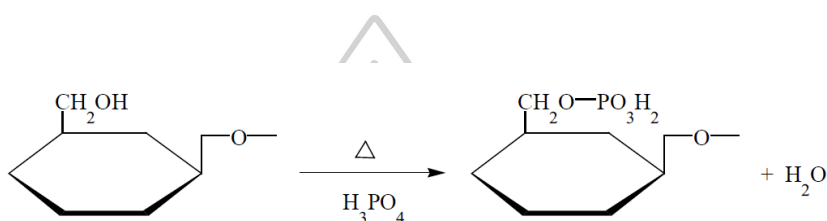
ตารางที่ 2 ตารางแสดงสารกระตุ้นที่ใช้ในกระบวนการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ [24]

สารกระตุ้นในกระบวนการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์		
ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นด่าง	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก (H_3BO_3)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2)
กรดไนตริก (HNO_3)		โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)		

โดยจะยกตัวอย่างสารกระตุ้นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหรือในด้านต่าง ๆ มา 2 ชนิดคือ

1. การกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

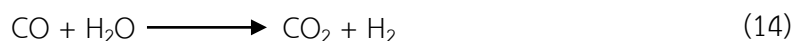
กรดฟอสฟอริกเป็นกรดแก่ที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูง ทำให้มีความสามารถในการแพร่เข้าไปในโครงสร้างวัสดุได้ง่ายและสม่ำเสมอ โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้จะมีความเสถียร แล้วหมู่ฟอสเฟตจะช่วยให้มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากหมู่ฟอสเฟตจะเข้าไปในโครงสร้างของเซลล์โลสแล้วทำให้เกิดการขยายตัว หลังจากได้รับความร้อนโครงสร้างที่ขยายนั้นจะกลายเป็นรูพรุน [25]



ภาพที่ 12 ปฏิบัติการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกในเซลล์โลส [25]

2. การกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำวัสดุมาผสมกับสารที่มีไอออนของโพแทสเซียม โพแทสเซียมจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนโพแทสเซียมจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอน เพื่อให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการที่ 10 จะเกิดการสลายตัวของโพแทสเซียมเป็นโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ สมการที่ 6 คาร์บอนจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ จากนั้นจะเกิดสมการที่ 12 แก๊สไฮโดรเจนจะรีดิวซ์โพแทสเซียมออกไซด์ให้กลายเป็นโลหะโพแทสเซียม ซึ่ง

สมการที่ 13 จะเกิดการรีดิวซ์เหมือนกันจะได้โลหะโพแทสเซียม ซึ่งที่อุณหภูมิสูงโลหะโพแทสเซียมจะหลอมและเข้าไปแทรกในโครงสร้างทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขึ้น [26]

ขนาดของรูพรุนที่ได้ จะสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนดังนี้

- ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
- มีโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร
- แมโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร [27]

หลังจากการกระตุ้นเมื่อได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์จะนิยมทำเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่สูงและปริมาณรูพรุนสูง จึงช่วยในการดูดซับได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ด้วยคือ

1. โครงสร้างทางกายภาพ กล่าวคือปริมาณของรูพรุน ขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิว
2. โครงสร้างทางเคมี จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน อะตอมของคาร์บอนจะเกิดรวมตัวเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะประกอบด้วยคาร์บอนที่เชื่อมโยงกันเป็นหกเหลี่ยม (Aromatic ring) ต่อกันไปอย่างเป็นระเบียบหรือไม่เป็นระเบียบ หลังจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันจะเข้าสู่กระบวนการกระตุ้น โดยการกระตุ้นนั้นจะใช้สารต่างๆ เข้ามาช่วยในการสร้างช่องว่าง การสร้างช่องว่างนั้นอาจเกิดจากการสลายตัวของสารต่างๆ และอาจมีการสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมา ที่บริเวณการสลายตัว รวมไปถึงอาจเกิดความสามารถทางไฟฟ้าด้วย ดังนั้นความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจะส่งผลด้วย

3. ปัจจัยภายนอกและอื่นๆ

- ขนาดของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ประจุไฟฟ้าของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ และส่วนประกอบทางเคมีของตัวถูกดูดซับ
- ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ
- ลักษณะของสารละลาย เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเบส เป็นต้น
- ระยะเวลาของการสัมผัส
- ปริมาณของตัวดูดซับ

เมื่อคาร์บอนกัมมันต์ถูกใช้งานสักพักประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงหรือไม่สามารถดูดซับได้เนื่องจากช่องว่างจะถูกอุดตัน ดังนั้นจึงมีการปรับคืนคุณภาพ (Regeneration) เพื่อจะได้นำกลับมาใช้ใหม่ ลดค่าใช้จ่ายลง การปรับคืนคุณภาพของคาร์บอนกัมมันต์มีหลายวิธี เช่น

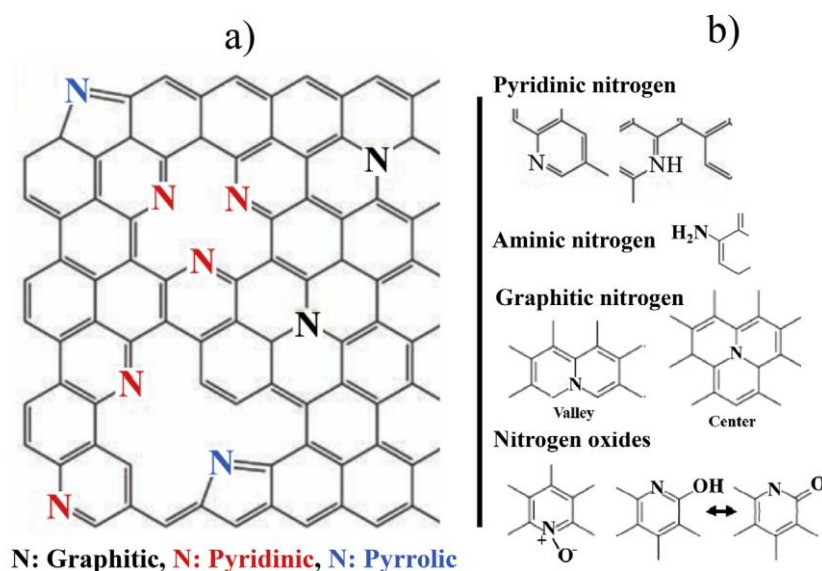
1. การใช้สารละลาย โดยวิธีคือการนำสารละลายที่มีความสามารถในการละลายสิ่งอุดตันที่อยู่ในช่องว่างของคาร์บอนกัมมันต์มาเป็นตัวทำละลายออกจากคาร์บอนกัมมันต์ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพไม่ค่อยสูง
2. การเผาซ้ำ เป็นวิธีโดยการนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้แล้วไปเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้สิ่งสกปรกหรือสารอุดตันในช่องว่างของคาร์บอนกัมมันต์สลายตัวหรือหลุดออกมา เป็นวิธีที่ดีและมีประสิทธิภาพสูงแต่ปริมาณของคาร์บอนกัมมันต์จะลดลง [28]

2.5 คาร์บอนเจือด้วยไนโตรเจน (N-doped carbon)

วัสดุคาร์บอนเป็นวัสดุที่น่าสนใจที่จะไปใช้ในการปรับปรุงระบบอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุเสริมแรง หรือใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติทางเคมีของคาร์บอนได้โดยการเติมธาตุ โบรอน กำมะถัน ฟอสฟอรัส ซิลิกอน ไนโตรเจน เป็นต้น เมื่อทำการเติมอะตอมไนโตรเจน อะตอมของไนโตรเจนจะเข้าไปแทรกกับอะตอมคาร์บอนสองอะตอมที่เป็นสมาชิกของวงหกเหลี่ยมเป็น Pyridinic-N อีกรูปแบบอะตอมของไนโตรเจนเข้าไปแทรกกับอะตอมคาร์บอนสองอะตอมที่เป็นสมาชิกของวงห้าเหลี่ยมเป็น Pyrrolic-N การแทนที่ทั้งสองแบบข้างต้นจะเกิดบริเวณขอบของชั้น แต่บริเวณด้านในมีโอกาสที่อะตอมไนโตรเจนเกิดการแทนที่อะตอมคาร์บอนในรูปแบบ sp^2 เป็น Graphitic-N แสดงในรูปภาพที่ 13(a) สำหรับการเกิดรูปแบบในข้างต้นเกิดโดยไม่มีไฮโดรเจน แต่ในรูปภาพที่ 13(b) แสดงส่วนที่ไฮโดรเจนและออกไซด์เข้ามาเกี่ยวข้อง อาจเกิดไนโตรเจนออกไซด์ หรือ Aminic เกิดขึ้น ในที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดจะแสดงถึงให้ความแตกต่างระหว่างวัสดุคาร์บอนกับวัสดุคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน ที่มีความแตกต่างในโครงสร้างและการนำไปประยุกต์การใช้งาน ซึ่งในกระบวนการเตรียมก็จะแตกต่างกันไปด้วย

คาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนจะมีค่าการดูดซับ รูพรุนและพื้นที่ผิวที่สูงกว่าคาร์บอนกัมมันต์ปกติ รวมไปถึงการมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวด้วย เนื่องมาจากผ่านกระบวนการ Heat treatment หลังที่ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ โดยกระบวนการ Heat treatment จะใส่สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีก๊าซต่างๆ เกิดขึ้น เช่น N_2 , NH_3 , HCN ก๊าซ

เหล่านี้จะเป็นตัวช่วยเข้าไปแทรกในคาร์บอนกัมมันต์ให้มีความเป็นรูพรุนสูงขึ้น รวมทั้งหมู่ฟังก์ชัน Amides, Amines เกิดขึ้นบริเวณผิวของคาร์บอน ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สูงขึ้น [29, 30]



ภาพที่ 13 องค์ประกอบต่างๆ ของอะตอมไนโตรเจนที่เจืออยู่ [29]

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึงการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) หรือเรียกอีกหนึ่งก็คือสารดูดซับ แล้วจะไปลดความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ของตัวถูกดูดซับถ้ามีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะสามารถถูกดูดซับได้ แต่ถ้ามีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะถูกดูดซับได้ไม่ดี พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ธรรมชาติของการดูดซับ ความชอบหรือไม่ชอบสารละลาย สภาพของการดูดซับต่างๆ ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลาย แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrical attraction force) แรงดึงดูดวาเลเตอร์วาลส์ (Van der waals' force) เป็นต้น

การดูดซับจะเกิดที่บริเวณผิวสัมผัส (Interface) ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อแรงดึงดูดของตัวดูดซับมีค่ามากกว่าพลังงานในการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ โดยปรากฏการณ์การดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยแรงดูดซับอย่างอ่อนๆ หรือเรียกว่าแรงวาลเดอร์วาลส์ (Van der waals' force) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างขั้ว แรงดึงดูดทางไฟฟ้า แรงดึงดูดเหล่านี้จะดึงดูดตัวถูกดูดซับให้มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับสารละลาย หรือตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ตัวถูกดูดซับมาติดกับตัวดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายและการดูดซับจะเกิดขึ้นในลักษณะชั้นเดียว (Mono-molecular layer) อาจจะเป็นแบบหลายชั้น (Multi-molecular layer) หรืออาจเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นซ้อนกัน (Superimpose layer) บนผิวของตัวดูดซับ แล้วการเกิดดูดซับในลักษณะนี้จะไม่ได้เกิดขึ้นอย่างถาวร สามารถเกิดผกผันกลับได้ (Reversible) ดังนั้นการเกิดการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นได้รวดเร็วและง่ายกว่าการดูดซับทางเคมี หรืออาจกล่าวได้ว่าเข้าสู่สมดุลในการดูดซับที่รวดเร็วกว่า เนื่องจากการดูดซับทางกายภาพไม่ได้ใช้พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ไม่เหมือนกับการดูดซับทางเคมี นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพยังสามารถทำให้เกิดการคายสารที่ดูดซับออกมาได้ (Desorption)

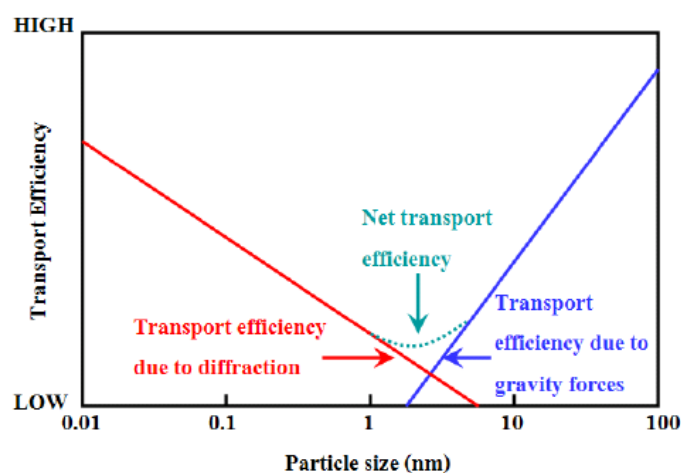
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) จะเกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกับตัวถูกดูดซับ การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีของตัวดูดซับเดิม โดยอาจมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (Mono-molecular layer) แล้วในการดูดซับนี้จะเกิดการผกผันกลับไม่ได้ (Irreversible) หรืออาจเกิดได้น้อยมาก การดูดซับทางเคมีนั้นจะใช้เวลานานในการดูดซับ เนื่องจากมีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง [31]

2.4.1 กระบวนการดูดซับ

ขั้นตอนของกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

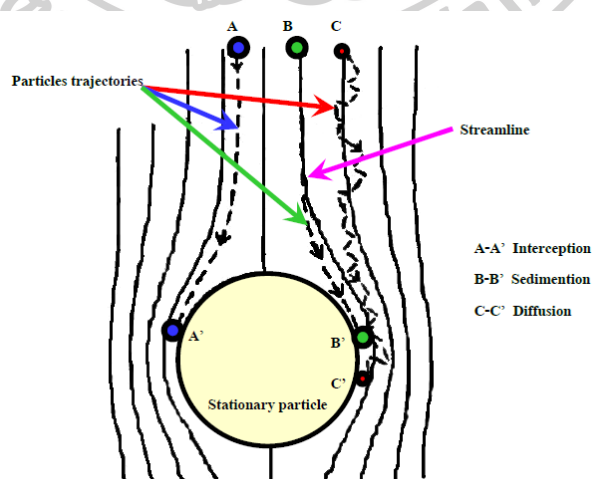
ขั้นตอนที่ 1 คือขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย โดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะเป็นการเคลื่อนที่เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) คือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในของไหลที่มีการเคลื่อนแบบสุ่ม แล้วจะเคลื่อนเข้าไปสัมผัสกับตัวดูดซับซึ่งยกตัวอย่างคือคาร์บอนกัมมันต์ จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคพบว่าขนาด (Size) และการกระจายของขนาด (Size distribution) ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือความสามารถในการเคลื่อนจะแปรผกผันกับขนาด กล่าวคืออนุภาคที่ขนาดเล็กจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่มาก และมีโอกาสเข้าไปสัมผัสกับ

คาร์บอนกัมมันต์มากกว่า ตรงกันข้ามกับอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการเคลื่อนต่ำ อาจทำให้เกิดการตกตะกอน น้ำหนักของอนุภาคก็ส่งผลต่อการเคลื่อนด้วยเหมือนกัน ถ้ามีน้ำหนักมากจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ช้าอาจทำให้เกิดการตกตะกอนได้ง่าย แสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสามารถในการเคลื่อนที่เมื่อขนาดเปลี่ยนแปลงไป [32]

แต่ถ้าอนุภาคมีการเคลื่อนที่ควบคู่ไปกับของไหลที่เกิดการไหล อนุภาคจะเคลื่อนที่ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการไหลแล้วไปสัมผัสกับคาร์บอนกัมมันต์

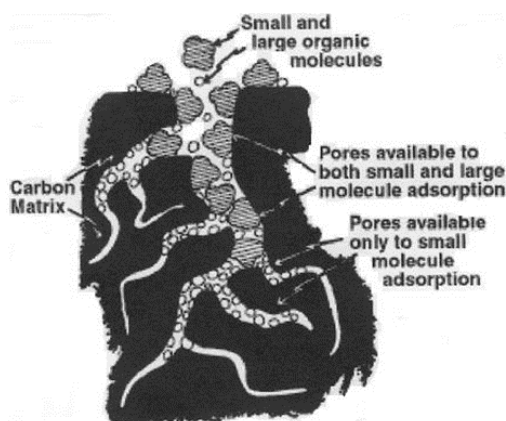
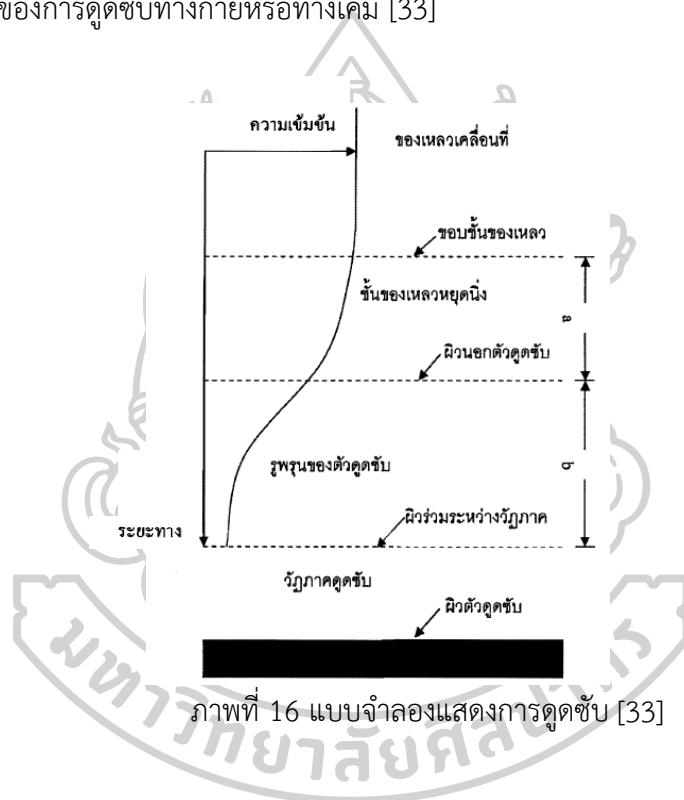


ภาพที่ 15 ภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคเข้าหาตัวดูดซับ [32]

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อโมเลกุลของสารเข้ามาถึงคาร์บอนกัมมันต์ ที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์จะมีชั้นบางๆ ของน้ำกั้นไว้ โมเลกุลของสารจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) สู่คาร์บอนกัมมันต์

ขั้นตอนที่ 3 โครงสร้างส่วนใหญ่ของคาร์บอนกัมมันต์นั้นจะเป็นรูพรุนหรือช่องว่าง ดังนั้นโมเลกุลของสารจะต้องทำการแทรกตัวเข้าไปในช่องว่าง (Pore diffusion)

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารเกาะติดอยู่บนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งการยึดติดอาจอาศัยแรงของการดูดซับทางกายหรือทางเคมี [33]



2.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

เมื่อสารละลายเกิดการดูดซับจากตัวดูดซับ โดยส่วนใหญ่การดูดซับจะเกิดที่บริเวณช่องว่างภายในโครงสร้างของตัวดูดซับ มีเพียงเล็กน้อยที่เกิดการดูดซับบริเวณภายนอก ในกระบวนการดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดสมดุล ซึ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราเร็วในการดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วในการดูดซับ กล่าวคือสารที่มีพื้นที่ผิวมากความสามารถในการดูดซับก็จะมากตามไปด้วย

2. ระยะเวลาที่สัมผัส

ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับยิ่งมีเวลานานขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งระบบของการดูดซับเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ คือเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Rate of desorption)

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่งผลต่อความเป็นขั้วที่ผิวของตัวดูดซับโดยในสถานะที่เป็นกรด จะมีค่าไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) หรือไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีปริมาณสูง จะส่งผลทำให้ผิวของตัวดูดซับมีประจุบวกตามไปด้วย แต่ในสถานะที่เป็นด่างจะมีค่าไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ที่มีปริมาณสูงจะส่งผลทำให้ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุลบ ซึ่งความเป็นขั้วที่ผิวของตัวดูดซับส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับด้วย

4. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น แล้วอุณหภูมียังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสารด้วย เช่น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิความสามารถในการละลายของสารจะมากขึ้น อาจส่งผลความสามารถในการดูดซับลดลง

5. ลักษณะของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับตัวถูกดูดซับด้วย เช่น ขนาดของตัวถูกดูดซับ ถ้าขนาดของตัวถูกดูดซับมีขนาดที่พอเหมาะกับช่องว่างภายในของตัวดูดซับจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันที่สูงมาก และยิ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับกับตัวทำละลาย ถ้าตัวถูกดูดซับมีความสามารถในการละลายที่สูงจะทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวกับตัวทำละลายมาก ส่งผลทำให้เกิดการดูดซับยากขึ้น

6. การรบกวนของน้ำหรือตัวทำละลาย

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนภายในระบบ ถ้าภายในระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก เนื่องจากไม่ถูกรบกวนจึงรวมตัวกันได้ และยังเป็นอุปสรรคของโมเลกุลของสารที่จะเคลื่อนที่เข้าไปหาตัวดูดซับ ถ้ามีความปั่นป่วนสูง จะทำให้ชั้นฟิล์มมีความหนาน้อยเนื่องจากถูกรบกวนจนไม่สามารถรวมตัวได้ ทำให้โมเลกุลของสารสามารถเคลื่อนที่เข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็ว [34]

2.5 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

โดยทั่วไปการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับมีหลากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ สารดูดซับ เป็นต้น โดยทั่วไปจะควบคุมอุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ปริมาณของตัวดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า “ ไอโซเทิร์ม (Isotherm)” ซึ่งไอโซเทิร์มสามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิด ตามระบบ IUPAC

Type I เป็นไอโซเทิร์มการดูดซับ ที่เกิดขึ้นเป็นชั้นเดียว (Monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) คาร์บอนกัมมันต์ เป็นต้น จะเกิดการดูดซับทั้งแบบทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ จะเกิดการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

Type II ไอโซเทิร์มแบบรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) เกิดกับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macro-porous) จะมีจุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm) เมื่อที่

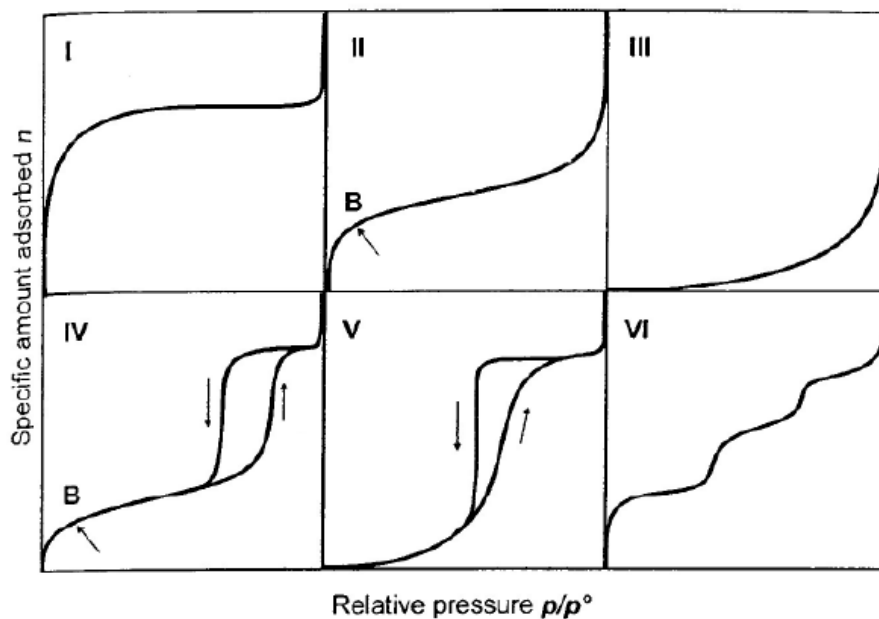
ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมเป็นชั้นเดียวเกือบทั้งหมด เมื่อเพิ่มความดันจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

Type III เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่มีจุดเปลี่ยนกราฟ มีรูปร่างของเส้นกราฟคล้ายกระจกเว้า เป็นไอโซเทิร์มที่ไม่ค่อยพบมากนัก จะเกิดการดูดซับที่ไม่ค่อยแข็งแรง จะเป็นการดูดซับที่เป็นของแข็งแบบไม่มีรูพรุน (Nonporous solid) หรือของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก จะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงขึ้นจะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นขึ้น เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกระทำต่อกันเอง

Type IV เป็นไอโซเทิร์มที่พบมากในวัสดุที่เป็นรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ในช่วงแรกที่ค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ จะเกิดเหมือนกับไอโซเทิร์ม Type II หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น จากการควบแน่นแคปิลลารี (Capillary condensation) ที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน ส่วนการเกิด Hysteresis loop นั้นเกิดมาจากการคายซับตัวดูดซับออกมา การคายซับออกมาได้ต้องมีความดันน้อยกว่าความดันตอนเกิดการดูดซับ เพราะการไล่ตัวดูดซับออกจากรูพรุนจะต้องเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวตัวดูดซับกันเองหรืออาจมีแรงกระทำจากผิวของตัวดูดซับ โดยพื้นที่ Hysteresis loop จะแปรตามสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรูพรุนขนาดกลางเมื่อเทียบกับปริมาณรูพรุนทั้งหมด ซึ่งในช่วงการเกิด Hysteresis loop สามารถนำข้อมูลมาหาค่าการกระจายตัวของรูพรุนได้

Type V เป็นไอโซเทิร์มรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายคลึงกับไอโซเทิร์ม Type III ในช่วงแรก จะเกิดการดูดซับที่มีแรงกระทำไม่ค่อยแข็งแรง ซึ่งจะพบในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเดียวกับไอโซเทิร์ม Type IV ซึ่งในไอโซเทิร์ม เทิร์มแบบนี้จะหาพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ยาก เนื่องจากการดูดซับในขั้นต่อมาจะถูกสร้างมาก่อนการดูดซับขั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

Type VI เป็นไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทิร์มแบบนี้จะไม่พบบ่อยมาก จะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยการดูดซับซึ่งจะเป็นแบบขั้นต่อขั้น โดยแต่ละขั้นจะมีการดูดซับที่เป็นความสามารถของขั้นนั้นๆ โดยลักษณะรูปร่างของขั้นบันไดจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิของระบบ [35]



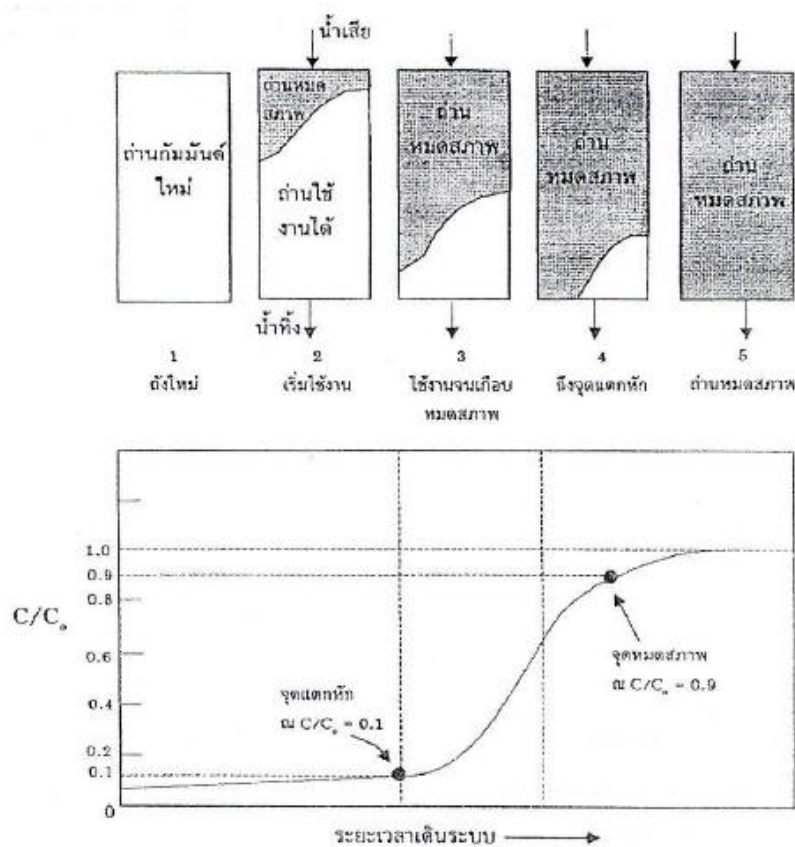
ภาพที่ 18 ไอโซเทิร์มของการดูดซับต่างๆ [35]

2.6 เส้นโค้งเบรคทู (Breakthrough curve)

เส้นโค้งเบรคทูหรือ Breakthrough curve เป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความเข้มข้นความเข้มข้นของสารหลังผ่านจากการกรองผ่านชั้นคาร์บอนกัมมันต์หรือตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารเริ่มต้น เมื่อเวลาผ่านไป ในจุดที่คาร์บอนกัมมันต์เสื่อมประสิทธิภาพจะเรียกว่าจุดแตกหัก หลังจากจุดนี้กราฟจะยกกระด้างสูงขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพของการดูดซับค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งหมดสภาพหรือเรียกว่า จุดหมดสภาพ โดยจุดที่มีค่า $C_t/C_0 = 0.1$ จะเรียกว่า Breakthrough point หรือจุดแตกหัก และระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นถึงคาร์บอนกัมมันต์หมดสภาพเรียกว่า Breakthrough time แต่เมื่อคาร์บอนกัมมันต์หมดสภาพแล้วไม่สามารถดูดซับได้ สามารถนำไปบำบัดหรือปรับคืนสภาพแล้วนำกลับมาใช้ได้ อีก ปัจจัยที่ส่งผลต่อ Breakthrough curve คือ

1. ค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ถ้าความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณหรือเวลาที่ผ่านตัวดูดซับถึงจุดหมดสภาพรวดเร็วขึ้น
2. ปริมาณคาร์บอนกัมมันต์หรือตัวดูดซับที่อยู่ในระบบดูดซับแบบคอลัมน์ถ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณหรือเวลาของสารไหลผ่านจนถึงจุดหมดสภาพนานขึ้น

3. อัตราการไหล ในระบบดูดซับแบบคอลัมน์เมื่ออัตราไหลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ปริมาณหรือเวลาที่ไหลผ่านจนถึงจุดหมดสภาพรวดเร็วขึ้น



ภาพที่ 19 รูปแบบการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ในคอลัมน์จนถึงจุดหมดสภาพ [36]

ปัจจัยที่กล่าวมาเป็นเงื่อนไขในกรณีที่ทำให้กราฟเบรคทรู อยู่ในรูปตัว S แต่ถ้ามีการนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสีย หรือสารต่างๆ ที่อาจมีตัวถูกดูดซับมากกว่าหนึ่งชนิด หรือสารละลายที่มีไอออนหรือปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอาจทำให้เส้นโค้งเบรคทรูไม่เป็นตัว S [36]

2.7 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่สามารถกักเก็บพลังงานที่เกิดจากธรรมชาติได้ แล้วนำมาผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์นี้ได้มาจากพืชหรือสัตว์ต่าง ๆ ชีวมวลนั้นจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง เนื่องจากแหล่งที่มาของชีวมวลสามารถหาได้ทั่วไป และเกิดทดแทนในธรรมชาติได้ จะเป็นวัฏจักรแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จากการใช้พลังงานและการเกิดของชีวมวล เป็นวัฏจักรที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จากปฏิกิริยาความร้อนที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงนั้นเป็นระบบปิดที่เรียกว่า Closed carbon cycle หรือ Zero carbon emission cycle [37]



ภาพที่ 20 วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล [38]

ข้อได้เปรียบของการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวล คือ เป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้ง่ายทั่วไปในแต่ละพื้นที่ และการแปรรูปชีวมวลให้มาเป็นพลังงานทำได้ง่าย ต้นทุนไม่สูง เช่น การนำเศษไม้ต่าง ๆ หรือของเหลือจากการเกษตรมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนสำหรับการประกอบอาหาร การผลิตไฟฟ้าและอื่น ๆ นอกจากนั้นการปลูกพืชชีวมวลยังสามารถสร้างรายได้เพิ่มเติมได้ โดยชีวมวลสามารถแบ่งประเภทได้ตามปริมาณความชื้นภายในชีวมวล (Moisture content) เพื่อให้ง่ายต่อการเลือกนำไปใช้หรือการนำไปแปรรูป ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นประมาณ 50% โดยน้ำหนัก เช่น กากน้ำตาล ขานอ้อย มูลสัตว์ พืชต่าง ๆ เป็นต้น เรียกประเภทนี้ว่า Wet conversion process ส่วนชีวมวลที่มีความชื้นไม่สูงมาก เช่น แกลบ ไม้พิน และฟางข้าว เป็นต้น เรียกว่า Dry conversion process หรือแบ่งตามประเภทแหล่งกำเนิดของชีวมวลนั้น ๆ ได้แก่

1. ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูก ชีวมวลประเภทนี้ปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นชีวมวลโดยตรงหรือเหลือใช้จากจุดประสงค์หลักแล้ว เช่น มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

2. ชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังการเกิดไฟไหม้ป่า เป็นชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดไฟไหม้ป่าจากตามธรรมชาติ เช่น เศษของพวงต้นไม้ที่หลงเหลือจากไฟไหม้ป่า

3. ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตร ชีวมวลประเภทนี้เป็นผลพลอยได้จากของเสียที่เกิดขึ้นขณะตอนเก็บเกี่ยวหรือของเหลือหลังการแปรรูปผลผลิตแล้ว เช่น กะลาปาล์ม แกลบ ฟางข้าว เป็นต้น

4. ชีวมวลที่เกิดขึ้นในป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้สามารถหาได้ทั่วไปตามธรรมชาติหรือแม้กระทั่งต้นไม้ที่ตายแล้วหรือของเสียจากอุตสาหกรรมการแปรรูปพืชหรือสัตว์ เป็นต้น

5. ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้ได้จากสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ต่าง ๆ เช่น มูลไก่ มูลสุกร มูลแพะ มูลวัว เป็นต้น

6. ชีวมวลจากขยะชุมชน ชีวมวลประเภทนี้จะชีวมวลที่พบได้ทั่วไปในเขตชุมชนต่าง ๆ เรียกได้ว่า ขยะชุมชน (Municipal solid waste) [38]

โดยจะยกตัวอย่างชีวมวลที่ควรนำไปใช้งาน 1 ตัวอย่าง เนื่องจากมีปริมาณที่มากเกินไป แล้วปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมจึงนำไปใช้งานให้มีประโยชน์มากขึ้น

2.7.1 ผักตบชวา (Water hyacinth)

ผักตบชวาจัดเป็นชีวมวลชนิดหนึ่ง นอกจากมีปริมาณมากแล้วยังสามารถอยู่ได้ในทุกสภาพน้ำ เป็นพืชน้ำล้มลุกอายุหลายฤดู มีต้นกำเนิดมาจากแถบลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิล ในทวีปอเมริกาใต้ มีดอกสีม่วงอ่อนคล้ายดอกกล้วยไม้ แพร่พันธุ์ได้อย่างรวดเร็วจนกลายเป็นวัชพืชในแหล่งน้ำทั่วไป มีชื่อเรียกในแต่ละท้องถิ่นแตกต่างกันออกไป เช่น ผักปอด ผักโรค ผักตบชวา ผักยะวา ผักอีโยก ผักป่อง ในจังหวัดนครปฐมอาจเรียกว่า ผักสวะ ลักษณะโดยทั่วไปผักตบชวามีลำต้นสั้นแตกใบเป็นกอลอยไปตามน้ำไหล ถ้าน้ำตื้นก็จะหยั่งรากลงดิน ใบเป็นลักษณะใบเดี่ยวรูปไข่หรือเกือบกลม ก้านใบกลมอวบตรงกลางพองออกภายในเป็นช่องอากาศคล้ายฟองน้ำช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกเกิดเป็นช่อที่ปลายช่อมีดอกย่อย 3-25 ดอก สีม่วงอ่อน มีกลีบดอก 6 กลีบ กลีบบนสุดขนาดใหญ่กว่ากลีบอื่น ๆ และมีจุดเหลืองที่กลางกลีบ ขยายพันธุ์โดยการแยกต้นอ่อนที่ปลาย ผักตบชวามีเซลลูโลสในปริมาณสูง (20%) และเฮมิเซลลูโลส (33%) และมีปริมาณลิกนินต่ำ (10%) ผักตบชวาจัดว่าเป็นพืชที่ขยายพันธุ์

ได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในช่วงฤดูฝนจะมีปริมาณมากในช่วงนั้น และอีกสาเหตุอาจเกิดมาจากสารเคมีที่ใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวัน เช่น ผงซักฟอก บ่อย ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืชน้ำโดยเฉพาะกับผักตบชวาเป็นอย่างดี ทำให้มีการเติบโตได้รวดเร็วมากขึ้นแล้วกีดขวางการเดินทางของน้ำ อัตราการไหลของน้ำไปได้ช้า และขัดขวางการระบายน้ำของประตุน้ำ อีกทั้งยังทำให้ระบบนิเวศเสียหายมากขึ้นซึ่งผักตบชวาสามารถดูดซึมธาตุอาหารที่เป็นตัวการทำให้เน่าเสียได้ แต่เมื่อมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำด้วย กล่าวคือสัตว์ใต้น้ำจะขาดออกซิเจนและตายลง รวมถึงการบดบังแสงแดดที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำจะทำให้พืชเหล่านั้นเน่าและตายไป ดังนั้นจึงเกิดน้ำเน่าเสียอย่างง่ายตายรวมทั้งทำลายระบบนิเวศอีกด้วย [39]

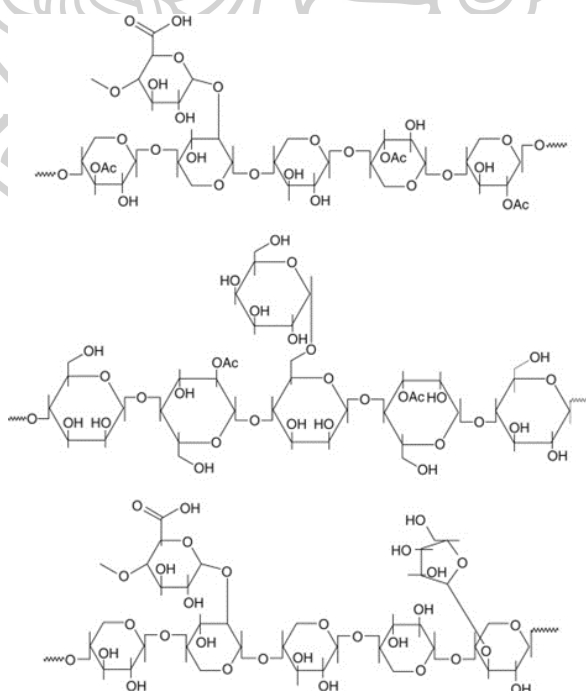


ภาพที่ 21 ผักตบชวาที่เจริญเติบโตตามที่อยู่อาศัย [40]

โดยส่วนประกอบหลักๆ ของผักตบชวา คือ เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose), ลิกนิน (Lignin) เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบนี้มีธาตุคาร์บอนอยู่เป็นจำนวนมากพอสมควรที่สามารถนำไปผลิตคาร์บอนกัมมันต์เพื่อแก้ปัญหาน้ำเสียหรือปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมทางน้ำได้ แล้วจะช่วยลดปัญหาที่มีผักตบชวามากเกินไป ยังส่งผลทำให้ปริมาณน้ำเสียลดน้อยลงตามไปด้วย

2.7.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

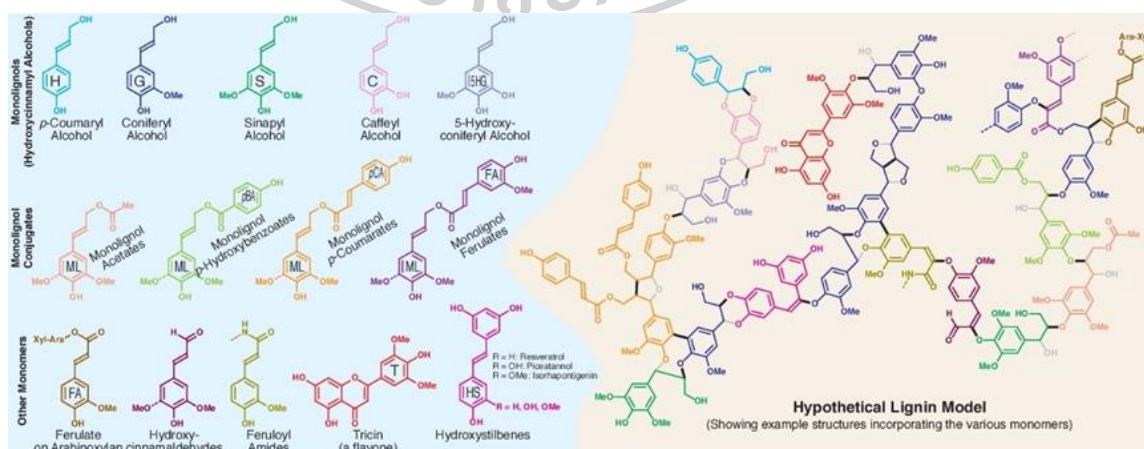
เฮมิเซลลูโลส เป็นอินทรีย์สารในเนื้อเยื่อของพืช ที่พบมากเป็นอันดับสองรองมาจากเซลลูโลส และมักรวมอยู่กับลิกนิน มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดีไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลาย ๆ โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก ชนิดเบต้า-1,4 (β -(1-4) -glycosidic bond) โดยสายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส มีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (Heterogeneous) ที่ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันคือ เพนโตแซน (Pentosan) ส่วนใหญ่เป็นไซแลน และ อะราแบน (Araban) ซึ่งเมื่อนำไปย่อยจะได้น้ำตาลไซโลส และอะราบินอส (Arabinose) โดยไซแลนเป็นสารที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลสมากกว่าสารอื่น เฮกโซแซน (Hexosan) ส่วนใหญ่เป็นแมนแนน (Mannan) กาแลคแทน (Galactan) และกลูแคน (Glucan) ซึ่งเมื่อถูกย่อยจะได้น้ำตาลแมนโนส (Mannose) กาแลคโตส (Galactose) และกลูโคส (Glucose) ตามลำดับ พอลิยูโรนิก (Polyuronides) ส่วนมากเป็นสารประกอบของกรดพอลิยูโรนิก (Polyuronic acid) และยังพบกรดยูโรนิก (Uronic acid) ปนอยู่ด้วย โดยเฮมิเซลลูโลส สามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจางที่อุณหภูมิสูง และสามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 % นอกจากนี้สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส ยังมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขา มากกว่าเซลลูโลส แต่มีความยาวของสายโซ่สั้นกว่าเซลลูโลส โดยมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส [43]



ภาพที่ 23 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสทั่วไปสามชนิด [44]

2.7.1.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในพืชรองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_9H_{8.83}O_{2.37}(CH_3)_{0.96}$ เป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของพืชไม้เนื้อแข็ง มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 17 – 25 ในไม้เนื้ออ่อนมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 24 -32 ซึ่งสามารถพบได้ในส่วนผนังเซลล์ชั้นที่สองและลามেলা (Middle lamella) ของพืชชั้นสูง โดยโมเลกุลของลิกนินจะแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose fibrils) และสายของเฮมิเซลลูโลส เพื่อทำหน้าที่เสริมสร้างความแข็งแรงโดยการเชื่อมจับเส้นใยผนังเซลล์เข้าไว้ด้วยกัน ช่วยลดการผ่านเข้าออกของน้ำที่ผ่านผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อไซเลม (Xylem) ช่วยต้านทานการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ โดยในพืชที่อ่อนนุ่มจะมีลิกนินเพียงเล็กน้อยและจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อพืชแก่ขึ้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างโมเลกุลโดยทั่วไปของลิกนินจะประกอบด้วยพอลิเมอร์ของสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) ที่มีโครงสร้างซับซ้อนประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมตัวกันเป็นหน่วยย่อยเรียกว่า ฟีนอลิกพอลิเมอร์ (Phenolic polymer) โดยหน่วยย่อยของโครงสร้างนี้ คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane unit) ซึ่งมีลักษณะเป็นโมโนเมอร์ (Monomer) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ C-O-C หรือ C-C สานต่อกันเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ โดยที่ตำแหน่งแอลฟาและเบต้าของ โมเลกุลลิกนิน อาจเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุล หรือคาร์บอนในหน่วยฟีนอลอาจเกิดพันธะกับคาร์บอนในอีกหน่วยหนึ่งภายในสายพอลิเมอร์ที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลลิกนิน จึงทำให้ลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ จึงเป็นอุปสรรคต่อการย่อยสลายเซลลูโลสเพื่อการผลิตน้ำตาลและเอทานอล แต่ลิกนินสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอล เมทานอลที่ร้อน และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ [45]



ภาพที่ 24 แบบจำลองลิกนินโดยสมมุติ [46]

2.8 สูตรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ

$$V_{\text{eff}} = Q t_{\text{total}}$$

V_{eff} คือ ปริมาตร (L)

Q คือ อัตราการไหล (L/h)

t_{total} คือ เวลาทั้งหมด (h)

Fixed-bed capacity (สีย้อมทั้งหมดที่ถูกดูดซับ)

$$q_c = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=\text{total}} C_{\text{ad}} dt$$

$$C_{\text{ad}} = C_0 - C_t$$

q_c คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาเริ่มต้นถึงใดๆ (mg)

C_{ad} คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นเริ่มถึงเวลาใดๆ (mg/L)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (mg/L)

ปริมาณสีทั้งหมดที่เข้าคอลัมน์ (Total amount of dye entering the column)

$$q_{\text{total}} = \frac{C_0 Q t_{\text{total}}}{1000}$$

q_{total} คือ ความสามารถในการดูดซับทั้งหมด (mg)

เปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีย้อมทั้งหมด (Total dye removal percentage)

$$R(\%) = \frac{q_c}{q_{\text{total}}} \times 100$$

$R(\%)$ คือ ความสามารถในการดูดซับออก(%)

Bohart-Adams Model

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right) = k_{BA} C_0 t - k_{BA} N_0 \left(\frac{Z}{V} \right)$$

k_{BA} คือ Kinetic constant (L/mg h)

N_0 คือ adsorption capacity of the adsorbent per unit
volume of the bed (mg/L)

V คือ ความเร็วในการไหล (cm/h)

Z คือ ความสูง (cm)

Thomas Model

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_t} - 1 \right) = \frac{k_t q_0 m}{F} - k_T C_0 t$$

k_t คือ Rate constant (L/mg h)

q_0 คือ Adsorption capacity (mg/g)

F คือ อัตราการไหล (L/h)

Yoon-Nelson Model

$$\ln \left(\frac{C_t}{C_0 - C_t} \right) = k_y t - \tau k_y$$

k_y คือ Rate constant (1/h)

τ คือ เวลาที่ผ่านไป 50% ของการดูดซับ (h)

Dose-response Model

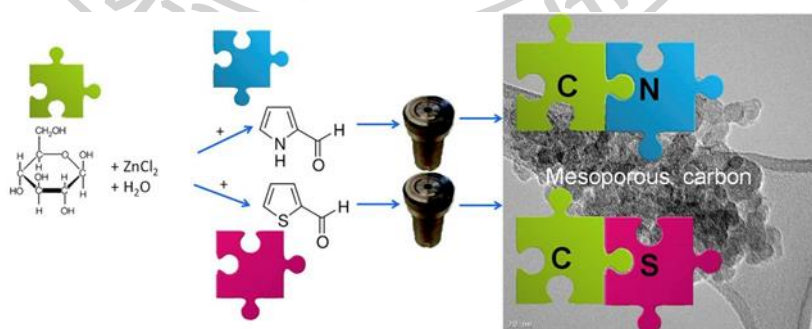
$$\frac{C_e}{C_0} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{ut}{b_{MDR}} \right)^{a_{MDR}}}$$

$$q_0 = \frac{C_0 b_{\text{MDR}}}{x}$$

a_{MDR}	คือ	ค่าคงที่ของ Dose-Response model
b_{MDR}	คือ	ค่าคงที่ของ Dose-Response model
q_0	คือ	Adsorption capacity (mg/g)
C_0	คือ	ความเข้มข้นของตัวดูดซับ (mg/L)
X	คือ	น้ำหนักของตัวดูดซับในคอลัมน์ (g)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

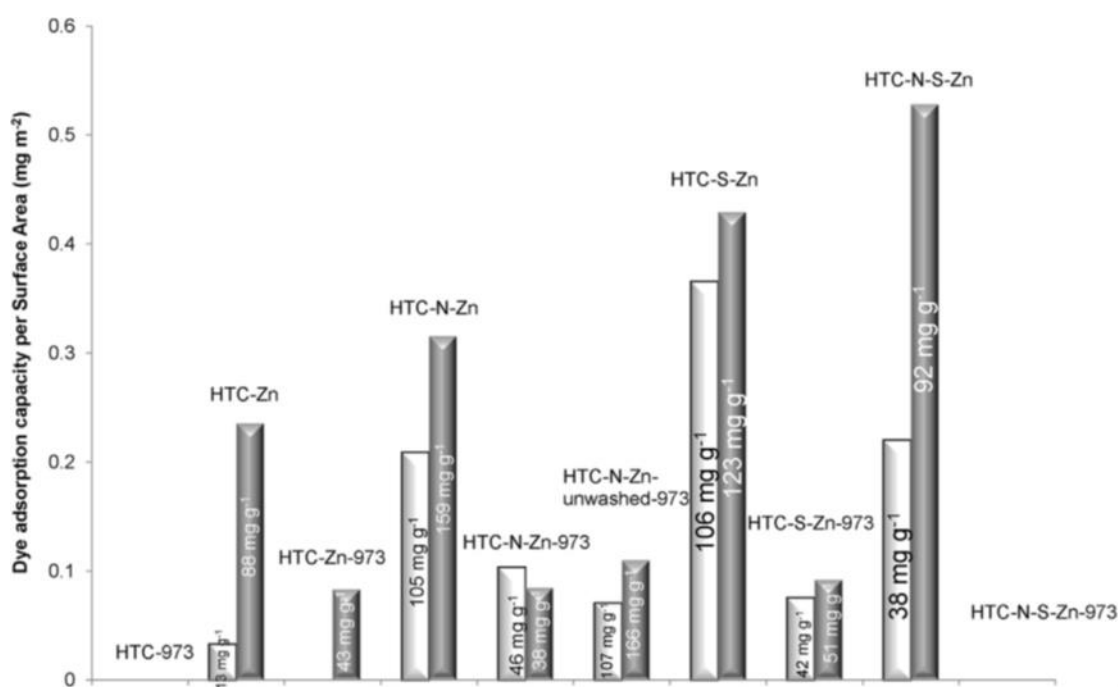
ในงานวิจัยของ Laura Roldán และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคาร์บอนที่มีรูพรุนที่เจือด้วยไนโตรเจน กำมะถัน สังเคราะห์จากสารชีวภาพโดยใช้กระบวนการทางความร้อนในขั้นตอนเดียวสำหรับนำมาใช้ในการบำบัดน้ำ จากงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุที่เตรียมจากการเจือที่แตกต่างกันนั้นได้พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันด้วย จากนั้นนำมาทดสอบในการดูดซับสีย้อม สีย้อมนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งทำให้น้ำมีคุณภาพแย่ลง โดยสีย้อมที่ใช้มี 2 สีคือ เมทิลีนบลู และโรดามีนบี ขนาดโมเลกุลของสีทั้งสองคือ 1.43 นาโนเมตร $\times$ 0.61 นาโนเมตร $\times$ 0.4 นาโนเมตร และ 1.59 นาโนเมตร $\times$ 1.18 นาโนเมตร $\times$ 0.56 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลของการดูดซับ



ภาพที่ 25 แบบจำลองคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน,กำมะถัน [47]

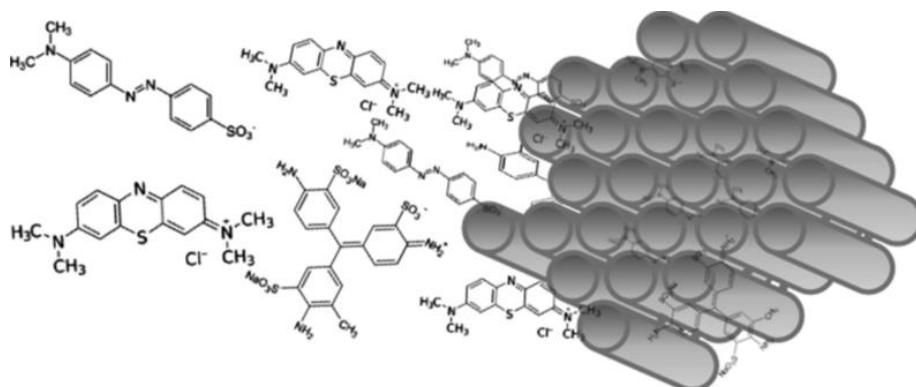
จากภาพที่ 25 พบว่าจะมีการดูดซับสีเมทิลีนบลู ได้มากกว่าโรดามีนบี อาจมาจากขนาดของเมทิลีนบลู ที่มีขนาดเล็กกว่า โมเลกุลของสีทั้งสองเป็นประจุบวกเมื่อสองปัจจัยร่วมกันทำให้ผลของการดูดซับไม่แตกต่างกันมาก ส่วนวัสดุก่อนหน้านี้มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส พบว่าก่อนไพโรไลซิสสามารถดูด

ซับได้มากกว่า เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสทำให้กลุ่มออกซิเจนลดลงส่งผลให้การกระทำต่อสารละลายลดลงเนื่องจากความชอบน้ำลดลง (แรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต, พันธะไฮโดรเจน) แนวโน้มการดูดซับของสีย้อมทั้งสอง $\text{HTC-Zn} < \text{HTC-N-Zn} < \text{HTC-S-Zn}$ แต่ที่น่าสงสัยก็คือ $\text{HTC-N-Zn-unwashed-973}$ มีพื้นที่ผิวมากกว่า HTC-N-Zn ถึงสามเท่า แต่เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับ พบว่า $\text{HTC-N-Zn-unwashed-973}$ ไม่ได้มีการดูดซับสีย้อมที่ดีกว่า HTC-N-Zn อาจเนื่องมาจากผลกระทบของแรงไอออนิกและความสามารถทางไฟฟ้าสถิต [47]



ภาพที่ 26 ความจุของสีย้อมต่อพื้นที่ผิวการดูดซับที่ตำแหน่งสมดุ: สีฟ้าเมทิลีนบลู (แถบสีเทา) โรดามีนบี (แถบสีขาว) ค่าการดูดซับสัมบูรณ์อยู่ภายในแท่ง [47]

ในงานวิจัยของ Á. Sánchez-Sánchez และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ พิสุนจ์เอกลักษณ์ และความสามารถการจัดสีย้อมของคาร์บอนที่มีรูพรุนผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน โดยมีเงื่อนไขในการทดลองต่างๆ แสดงในตารางที่ 3 จากข้อมูลตารางที่ 3 การสังเคราะห์ซิลิกา-คาร์บอน คอมโพสิตเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำซิลิกาออกโดยการกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง จากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ผลที่ได้รับคือ N-OMCs จะเรียก N_x/t , x คือ บอความเข้มข้นของอะซิโตนไต์ $v/v\%$, t คือ เวลาในการทำ CVD นอกจาก CMK-3 ที่ไม่ได้ถูกเจือ (เรียกว่า X3) การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ CVD โดยใช้พอลิซีนเป็นสารตั้งต้น

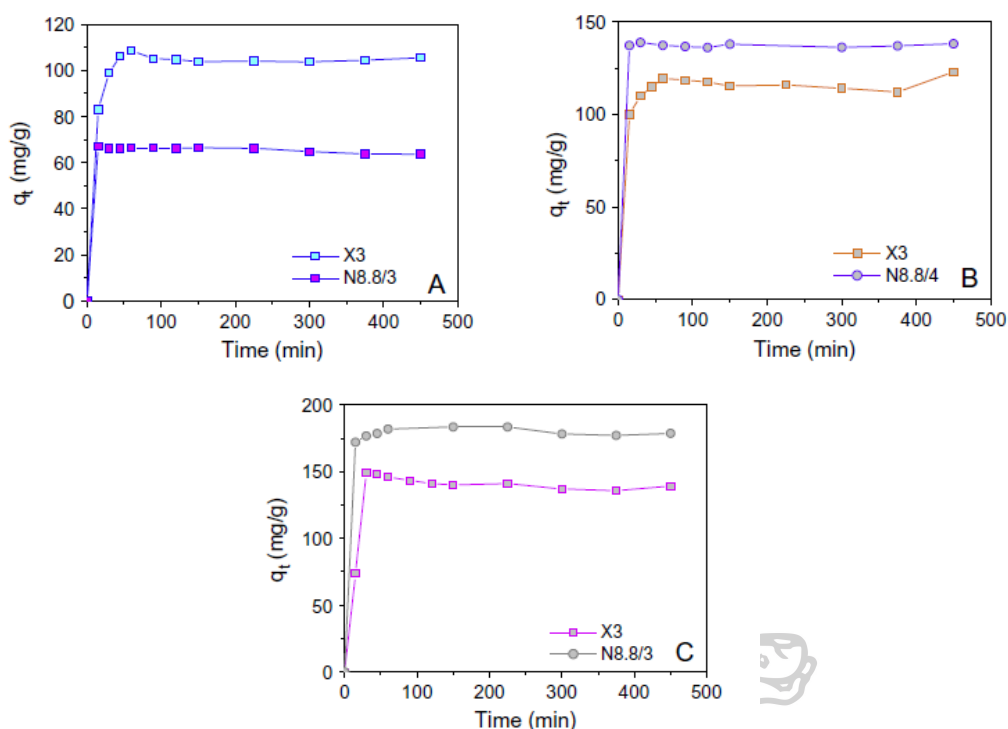


ภาพที่ 27 รูปภาพจำลองโครงสร้างการดูดซับสีย้อม [48]

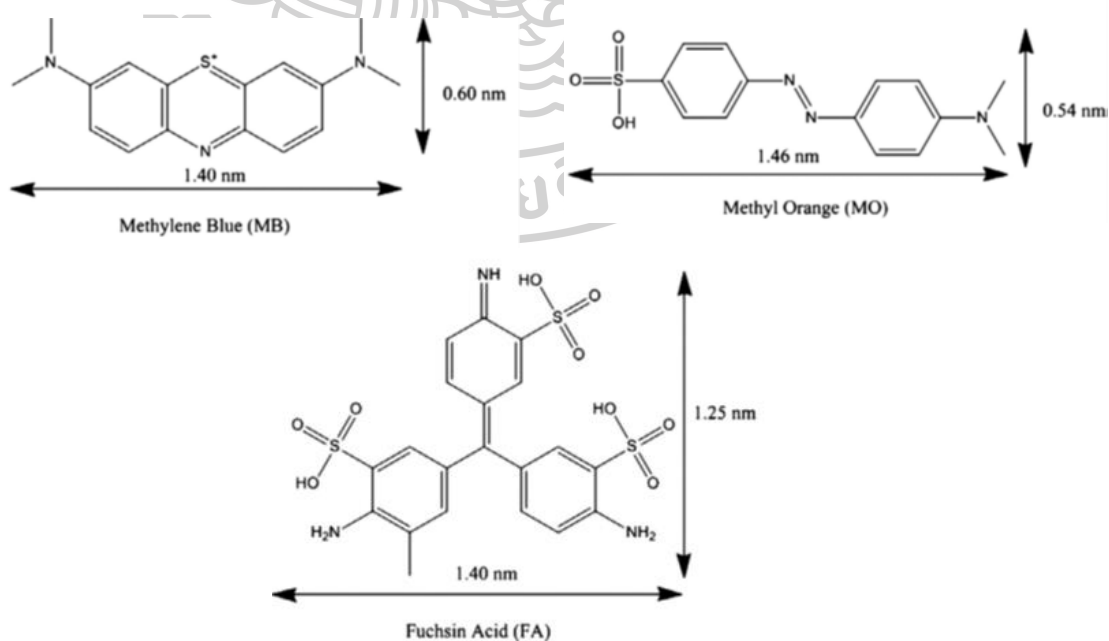
ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดลองที่ใช้ในกระบวนการ CVD ตัวแปรต่าง ๆ ที่คำนวณหาพื้นที่สัมผัสได้จากไอโซเทิร์มของการดูดซับ/การคายซับของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โครงสร้างของคอมโพสิตวัดจาก XRD [48]

Sample	Experimental conditions		Nitrogen adsorption isotherms at -196 °C				Infiltration (wt.%)	XRD	
	[CH ₃ CN] (% v/v)	t (h)	S _{BET} (m ² /g)	V _t (cm ³ /g)	V _{micro} (cm ³ /g)	V _{meso} (cm ³ /g)		d ₍₁₀₀₎ (nm)	a (nm)
SBA-15	–		513	1.24	0.22	1.02	–	9.8	11.3
X3	–		406	0.76	0.14	0.62	55.5	10.1	11.7
N3/5		5	616	1.16	0.20	0.96	22.5	–	–
N3/6	3.0	6	473	0.65	0.15	0.50	46.8	10.0	11.5
N3/7		7	457	0.62	0.14	0.48	50.5	9.9	11.4
N6.5/2		2	629	0.97	0.20	0.77	23.1	–	–
N6.5/3	6.5	3	570	1.18	0.18	1.00	46.9	10.1	11.7
N6.5/4		4	437	0.58	0.14	0.44	55.2	10.0	11.5
N8.8/2		2	704	1.11	0.23	0.88	42.6	10.1	11.6
N8.8/3	8.8	3	494	0.78	0.16	0.62	47.6	10.1	11.6
N8.8/4		4	432	0.50	0.14	0.36	56.4	9.8	11.3

จากภาพที่ 28 พบว่าคาร์บอนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน มีจลนพลศาสตร์การดูดซับที่เร็วกว่าคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเจือทั้งสามสีย้อม ดังนั้นการเจือด้วยไนโตรเจนเพิ่มความสามารถในการดูดซับพิจารณาที่คาร์บอนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน (N8.8/3) แสดงอัตราการดูดซับที่สูงกว่าคาร์บอนที่ไม่ได้รับการเจือ (X3) เนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วลงไปคาร์บอนมากขึ้น ความชอบน้ำมากขึ้นนำไปสู่กระบวนการที่รวดเร็วมากขึ้นตามไปด้วย จะเห็นได้ชัดเจนว่าการดูดซับสีย้อมประจุบวก (เมทิลีนบลู) จะได้รับผลกระทบจากกลุ่มที่มีไนโตรเจนอย่างมาก แต่ในทางตรงกันข้ามสีย้อมประจุลบ จะไม่ได้รับผลกระทบ ความสามารถในการดูดซับส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความเป็นรูพรุนของคาร์บอน ส่วนการเจือด้วยไนโตรเจนจะช่วยปรับปรุงในเรื่องของจลนพลศาสตร์การดูดซับ

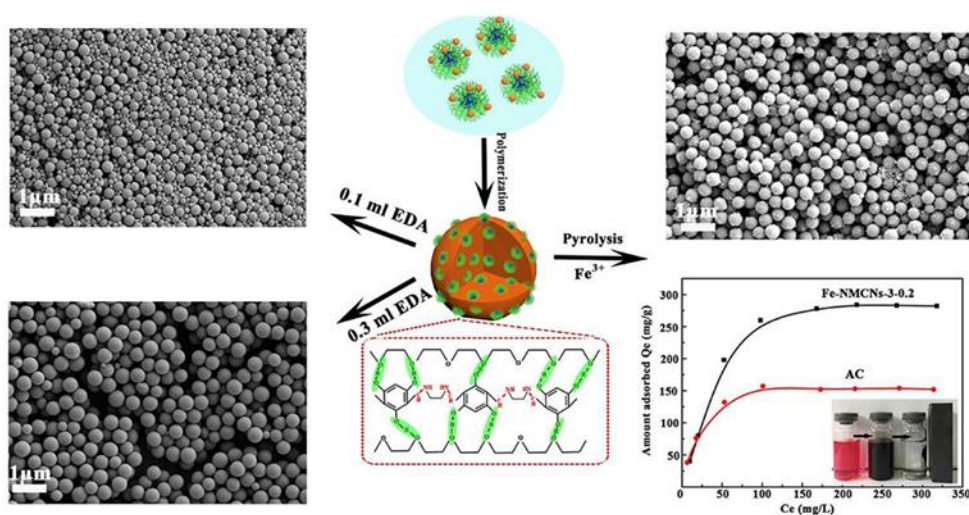


ภาพที่ 28 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในการทดลอง X3 และ N-doped carbon (N8.8/4 และ N8.8/3) สำหรับ: (a) เมทิลีนบลู, (b) เมทิลออเรนจ์ และ (c) ฟิวซินแอซิด [48]

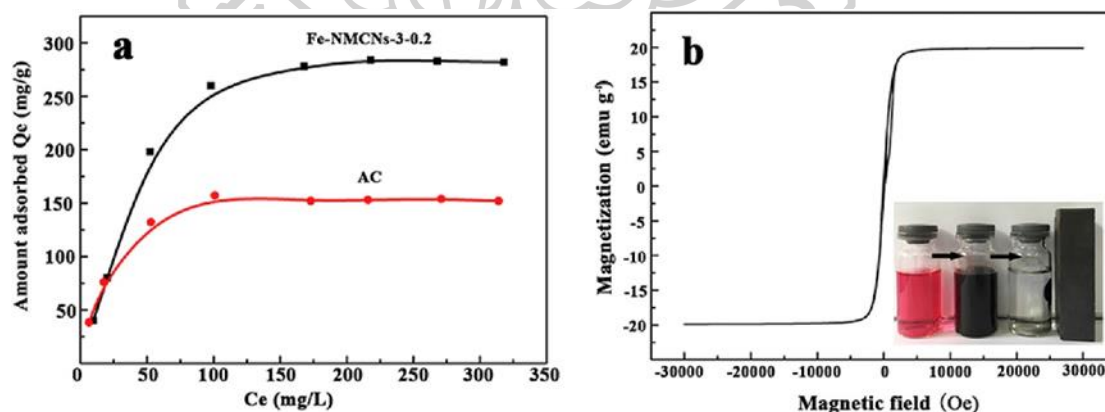


ภาพที่ 29 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมทั้งสามที่ใช้ในงานนี้ ขนาดโมเลกุลประมาณด้วยซอฟต์แวร์ ChemBioDraw [48]

ในงานวิจัยของ Tao Hua และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิศวกรรมอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจนเพื่อดูดซับโมเลกุลสีย้อมประเภทกรด ในการศึกษานี้ได้ใช้ Fe-NMCNs-3-0.2 โดย NMCNs คือ N-doped mesoporous carbon nanospheres เลข 3 คือ ลำดับเงื่อนไขของการสังเคราะห์ที่สอดคล้องในกระบวนการของงานวิจัยนี้ ส่วนเลข 0.2 คือ มวลของ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$



ภาพที่ 30 ภาพประกอบแผนผังของ NPS ที่มีขนาดแตกต่างกันประสิทธิภาพในการดูดซับของสีย้อมประเภทกรดและสมบัติการแยกด้วยแม่เหล็ก [49]

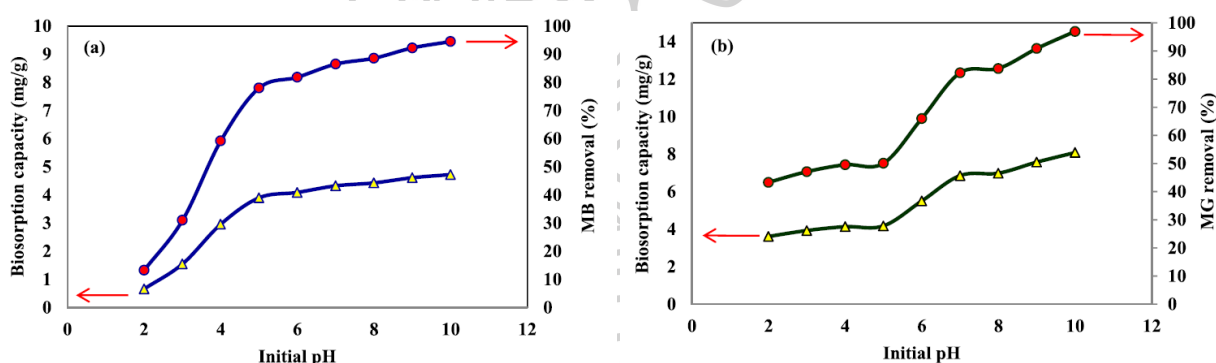


ภาพที่ 31 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับที่เข้าสู่สมดุลและ (b) เส้นโค้งฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็ก Fe-NMCNs-3-0.2 และภาพถ่ายของตัวอย่างในสารละลายกรดสีแดงโดยแยกด้วยแม่เหล็ก (ภาพแทรก) [49]

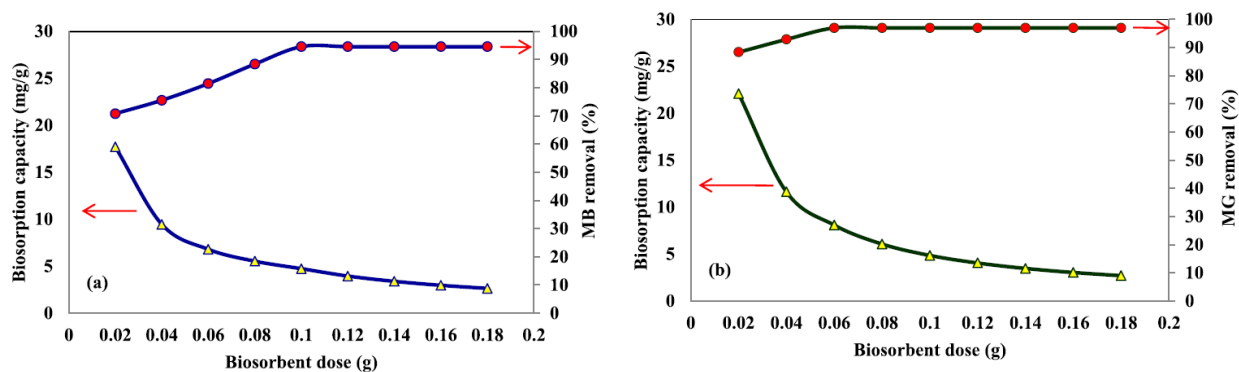
จากภาพที่ 31(a) Fe-NMCNs-3-0.2 มีความสามารถในการดูดซับกรดที่ดี โดยมีประสิทธิภาพสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (260 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้นจาก 100 มิลลิกรัมต่อลิตรถึง 350 มิลลิกรัมต่อลิตร จะค่อยๆ เข้าสู่สมดุล โดยมีการดูดซับสูงสุด 283 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับตัวอย่างการทดลองของคาร์บอนกัมมันต์ (AC) แม้จะมีพื้นที่ผิว (BET surface area) มากกว่า แต่ความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า Fe-NMCNs-3-0.2 เนื่องจากความสามารถในการดูดซับส่วนใหญ่อาจมาจากสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของตัวดูดซับ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าถ้ามีโมเลกุลขนาดใหญ่ในรูพรุนที่มีขนาดเล็ก อาจทำให้รูพรุนเกิดการอุดตัน ดังนั้นพื้นผิวในรูพรุนขนาดเล็ก อาจไม่สามารถใช้งานในการดูดซับได้อย่างเต็มที่ เมื่อเปรียบกับรูพรุนมีโซพอร์สของ Fe-NMCNs-3-0.2 ภาพที่ 31(b) Fe-NMCNs-3-0.2 สามารถถูกแยกออกจากสารละลายที่เป็นน้ำได้อย่างง่ายดายโดยใช้แม่เหล็กภายนอกซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานของการดูดซับอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีศักยภาพในการรักษาสิ่งแวดล้อม และการจัดเก็บพลังงานเป็นต้น [49]

ในงานวิจัยของ Rangabhashiyam S และคณะ [50] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำส่วนของเปลือกของ *Carica papaya* (CPW) มาเป็นตัวดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู (MB) และ มาลาไคท์กรีน (MG) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่า pH แตกต่างกันความสามารถในการดูดซับก็จะแตกต่างกัน เมื่อ pH มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2 – 10 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากในสถานะที่เป็นกรดหรือมีค่า pH ต่ำๆ จะมีการปลดปล่อย H^+ ส่วนสถานะที่เป็นเบสหรือมีค่า pH สูงๆ จะมีการปล่อย OH^- ซึ่งในการดูดซับจะใช้หลักการดูดซับแบบไฟฟ้าสถิต สีย้อมที่จะใช้เป็นสีย้อมประจุบวกเมื่อมีการปลดปล่อย H^+ ก็เกิดการแข่งขันระหว่างประจุทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยลงดังนั้นในสถานะเบสหรือ pH สูงๆ จะมีความสามารถในการดูดซับได้มากกว่า ตามภาพที่ 32 จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับในปริมาณที่สูงขึ้น 0.2 – 0.18 g ความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับสูงขึ้น ปริมาณพื้นที่ผิวก็สูงขึ้นตามไปด้วย พื้นที่รองรับโมเลกุลของสีย้อมมากขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นกลับทำให้ค่าดูดซับจำเพาะลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นเรื่อยๆ อาจทำให้เกิดการรวมตัวทำให้พื้นที่ผิวโดยรวมลดลงและเพิ่มความยาวในการแพร่ของโมเลกุลของสีย้อมตามรูปภาพที่ 33 จากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมากขึ้นพบว่าความสามารถในการดูดซับลดลง แต่ค่าการดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น ที่ความสามารถในการดูดซับลดลงเนื่องจากความเข้มข้นสูงขึ้นจาก 10 – 50 mg/L จะทำให้บริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับอิ่มตัวรวดเร็ว

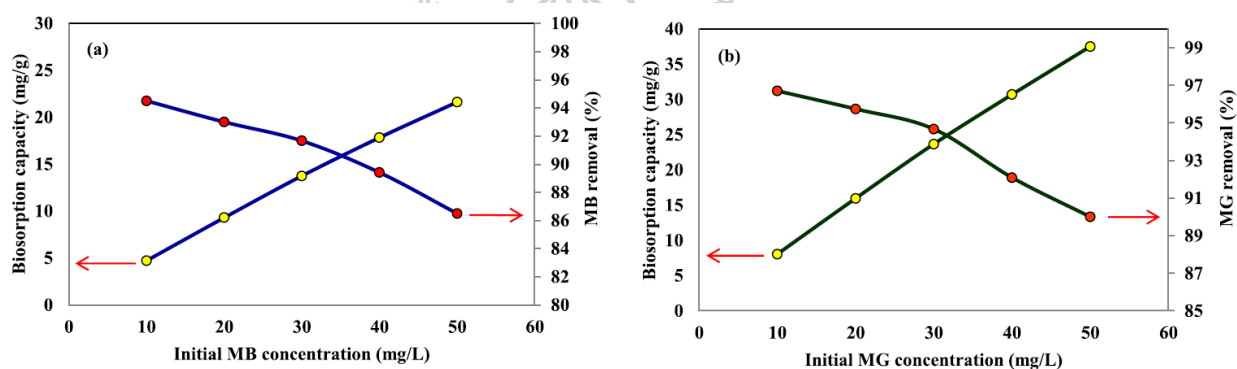
ขึ้น แต่ค่าการดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะทำให้มีแรง ผลักระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลเข้าไปในตัวดูดซับได้มากขึ้นตามภาพที่ 34 จากการ ทดลองเกี่ยวกับเวลาในการสัมผัสพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสัมผัส จาก 0 – 140 min พบว่าค่าในการ ดูดซับจำเพาะเพิ่มมากขึ้นในช่วงแรก แต่พอเวลาผ่านไปสักพักอัตราในการเพิ่มจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเวลาในการสัมผัสนานขึ้นทำให้โมเลกุลของสารละลายเกิดการเข้าถึงพื้นที่ผิวได้มากขึ้น แต่ เมื่อเวลานานผ่านไบนานมากขึ้นจะมีการเพิ่มเพียงเล็กน้อยมาจากพื้นที่ผิวที่สามารถใช้งานได้ใช้งาน อย่างเต็มที่แล้วตามภาพที่ 35 จากการทดลองผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิ ในขณะการดูดซับเพิ่มขึ้น 303 – 323 K ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้พลังงานภายในมีค่ามากขึ้นทำให้โมเลกุลของสารละลายเกิดการแพร่ได้มากขึ้นทำ ให้ค่าการดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยตามภาพที่ 36 ดังนั้นตัวดูดซับ CPW มีความสามารถในการ ดูดซับสีย้อม MB และ MG ได้ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้ตัวดูดซับจากธรรมชาติที่ราคาถูกและหาได้ ง่าย [50]



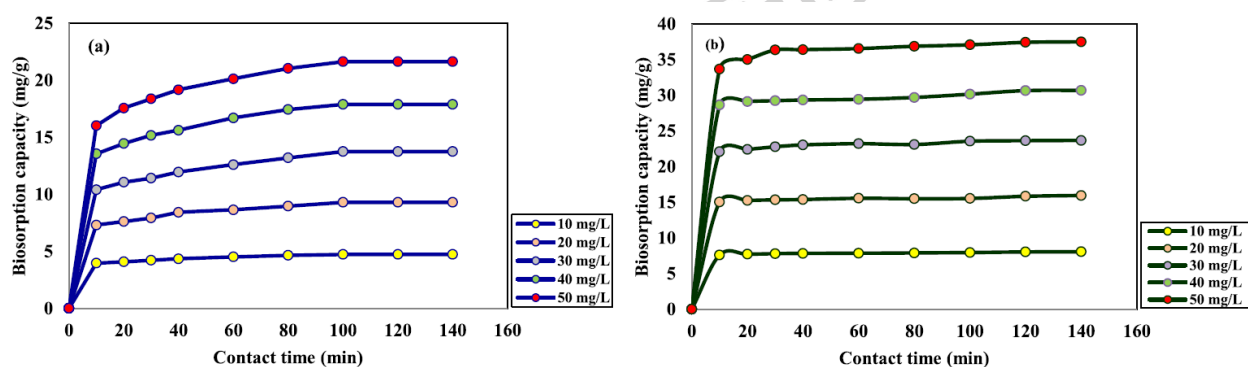
ภาพที่ 32 ผลของ pH เริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีย้อมของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW [50]



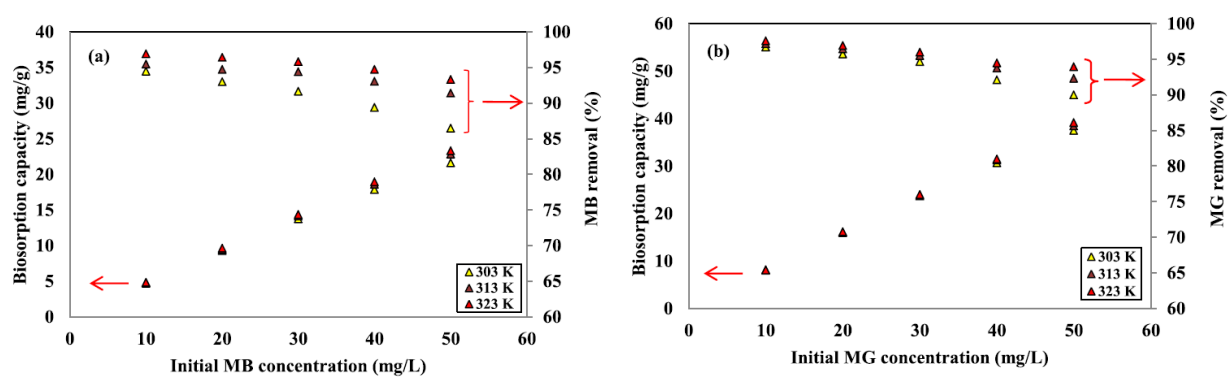
ภาพที่ 33 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW [50]



ภาพที่ 34 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW [50]



ภาพที่ 35 ผลของเวลาในการสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสีของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW [50]



ภาพที่ 36 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพและการกำจัดสี
ของ (a) MB และ (b) MG โดยใช้ CPW [50]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 ผักตบชวา (Water hyacinth) จากบริเวณตลาดน้ำดอนหวาย แม่น้ำท่าจีน จ. นครปฐม
- 3.1.2 เมทิลีนบลู (Methylene blue) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรด Analytical grade ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.1.3 มาลาไคท์กรีน (Malachite Green) ยี่ห้อ ACROS ORGANICS เกรด Analytical grade ประเทศอินเดีย
- 3.1.4 โรดามีนบี (Rhodamine B) ยี่ห้อ ACROS ORGANICS เกรด Analytical grade ประเทศอินเดีย
- 3.1.5 น้ำกลั่น (Distilled water, H_2O)
- 3.1.6 อะซีโตน (Acetone, CH_3COCH_3) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ความบริสุทธิ์ 99.5% ประเทศสิงคโปร์
- 3.1.7 ซิลิกาเจล (Silica gel)
- 3.1.8 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ยี่ห้อ Carlo Erba ประเทศฝรั่งเศส
- 3.1.9 เมลามีน (Melamine) ยี่ห้อ ACROS ORGANICS. ความบริสุทธิ์ 99% ประเทศอังกฤษ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- 3.3.1 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR, BRUKER, Vertex 70, Germany)
- 3.3.2 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer, SHIMADZU, UV-1800, Germany)
- 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, HITACHI, TM3030, USA)
- 3.3.4 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman spectrometer, BRUKER, SENTERRA, Germany)

3.3.5 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (Surface area analyzer, Micromeritics, TriStar II 3020, USA)

3.3.6 เครื่องสเปกโตรสโคปของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscope, Kratos, Axis ultra DLD, Germany, XPS)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.2.1 ตู้อบ (Oven) (BINDER, USA)

3.2.2 เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill)

3.2.3 เครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (METTLER TOLEDO, Germany)

3.2.4 เครื่องกวน (Witeg, Germany)

3.2.5 เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนมาตรฐาน (Retsch As200, Merck, Germany)

3.2.7 กระบอกฉีดยา (Syringe) ขนาด 25 มิลลิลิตร

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

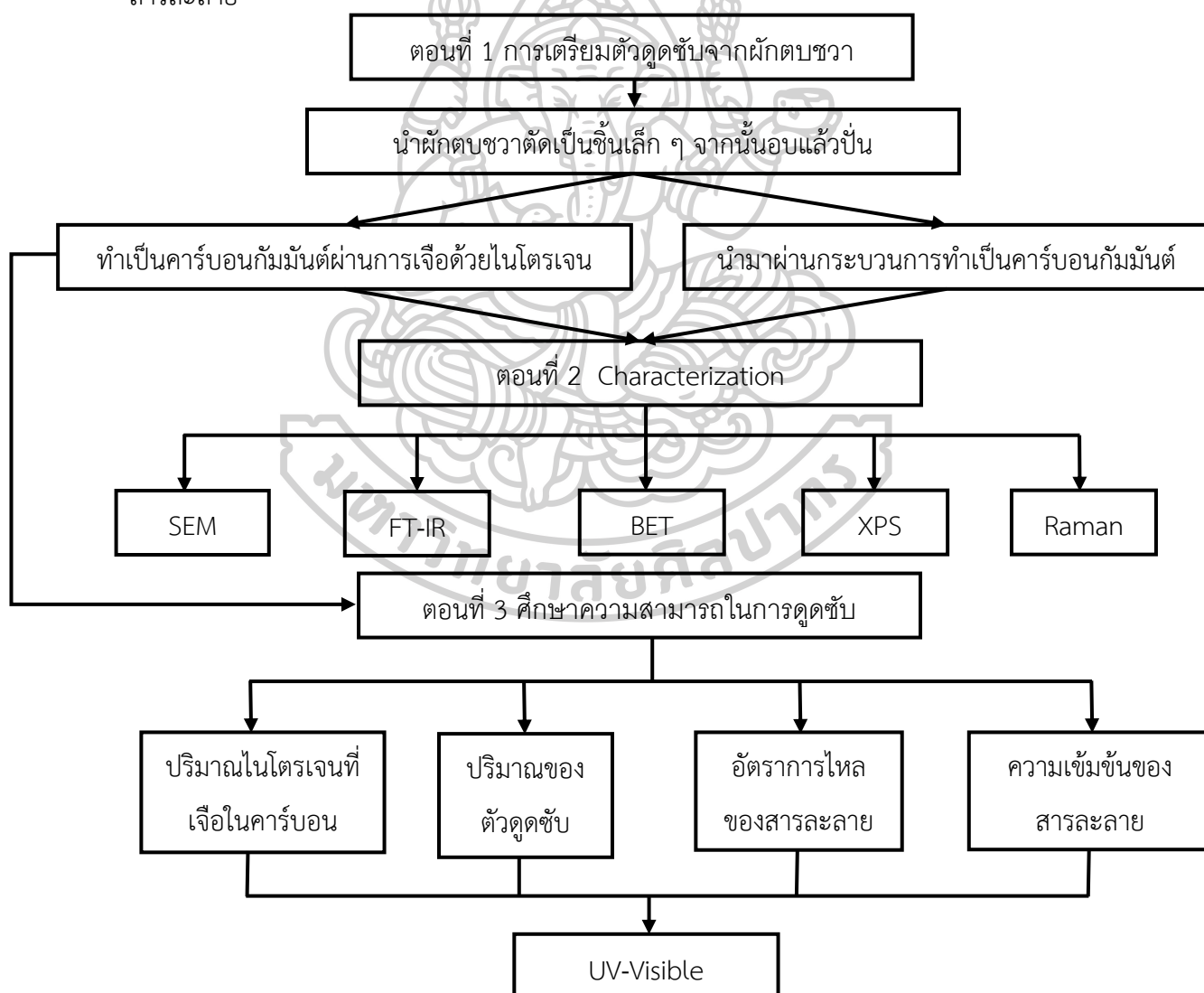
งานวิจัยนี้ทำการเตรียมตัวดูดซับชีวภาพสำหรับนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม โดยตัวดูดซับชีวภาพที่เตรียมในงานวิจัยนี้คือคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้ชีวมวลผักตบชวาเป็นวัตถุดิบ ให้มีปริมาณไนโตรเจนที่เจือในคาร์บอนที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู มาลาไคท์กรีน และโรดามีนบี ในระบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวดูดซับชีวภาพที่เตรียมได้ข้างต้น ในการทดลองนี้ยังทำการศึกษาแบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่ไม่ผ่านการเจือ และการเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่มีปริมาณไนโตรเจนแตกต่างกันจากวัตถุดิบผักตบชวา โดยนำส่วนลำต้นผักตบชวาไปตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ จากนั้นอบให้แห้งแล้วนำไปปั่นและนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชัน และการกระตุ้นทำให้ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ ส่วนตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนทำโดยนำผักตบชวาไปผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนโดยการผันแปรปริมาณเมลามีน (Melamine) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งของไนโตรเจน (Nitrogen source) จะได้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพสำหรับใช้กำจัดสีย้อมแบบตรึงในคอลัมน์

ตอนที่ 2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่ไม่ผ่านการเจือ และตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมได้ โดยศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) วิเคราะห์พื้นที่ผิว

จำเพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิค BET surface area analysis วิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Raman spectroscopy วิเคราะห์หาปริมาณการเจือของไนโตรเจนโดยใช้เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

ตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู มาลาไคท์กรีน และโรดามีนบี ในระบบต่อเนื่อง ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy โดยศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนในตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน โดยผันแปรปริมาณเมลามีนที่เป็นแหล่งของไนโตรเจน โดยแต่ละปริมาณของเมลามีนจะทำการผันแปรอุณหภูมิในการเจือไนโตรเจนด้วย ผลของปริมาณของตัวดูดซับ อัตราการไหลของสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย



ภาพที่ 37 แผนผังแสดงการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่มีปริมาณไนโตรเจนแตกต่างกันจากวัตถุดิบผักตบชวา

1.1 การเตรียมผักตบชวา

- เก็บผักตบชวาจากบริเวณตลาดน้ำดอนหวาย
- นำส่วนลำต้นผักตบชวาไปตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ
- นำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง
- ทำการปั่นผักตบชวากับเครื่องปั่น
- นำผงผักตบชวาไปอบอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

1.2 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์

- นำผักตบชวาที่ได้มาผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในเตา จนถึงอุณหภูมิห้อง
- นำไปล้าง และปรับ pH ~ 7 จากนั้นนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะได้คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) โดยมีผลผลิตร้อยละ (% yield) ประมาณ 20-25 %

1.3 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน

- นำผักตบชวาที่เตรียมได้ไปผสมกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมลามีน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผักตบชวาต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมลามีนเท่ากับ 1 : 1 : 1 แล้วนำไปเผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการล้าง ปรับ pH ~ 7 แล้วนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะได้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจน (N-doped mesoporous carbon)
- ทำการบดและคัดแยกขนาดของผงคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจนโดยใช้ Sieve shaker ให้ได้ขนาด 75-150 ไมโครเมตร
- เมื่อได้อุณหภูมิการกระตุ้นที่เหมาะสมจึงทำการผันแปรอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผักตบชวาต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมลามีน เท่ากับ 1:1:2 และ 1:1:3

ตอนที่ 2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่ไม่ผ่านการเจือ และตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมได้

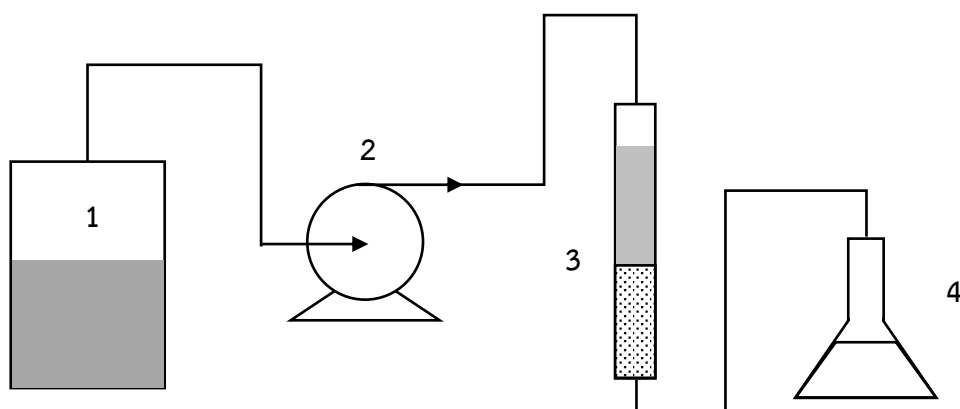
- ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

- ศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR)
- วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิค BET surface area analysis
- วิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Raman spectroscopy
- วิเคราะห์หาปริมาณการเจือของไนโตรเจนโดยใช้เทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy

ตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู มาลาไคท์กรีน และโรดามีนบี ในระบบต่อเนื่อง ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy ซึ่งใช้วัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะเวลาต่างๆจนกว่าจะเข้าสู่ค่าคงที่ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

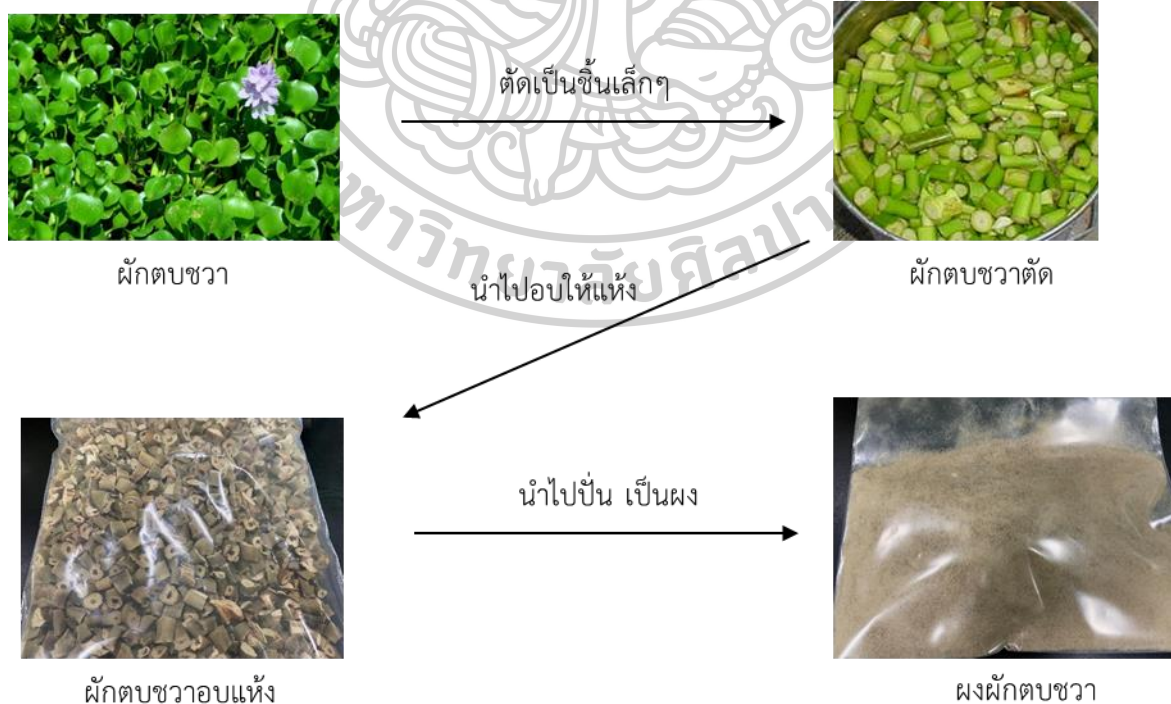
- ศึกษาผลของปริมาณไนโตรเจนในตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่เจือด้วยไนโตรเจน โดยผันแปรปริมาณเมลามีนที่เป็นแหล่งของไนโตรเจน ที่อัตราส่วนของผักตบชวาต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเมลามีนเท่ากับ 1 : 1 : 1, 1 : 1 : 2 และ 1 : 1 : 3 โดยน้ำหนัก โดยจะกำหนดให้ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการไหลของสารละลายมีค่าคงที่
- ศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับ (ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm.) โดยจะกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการไหลของสารละลายมีค่าคงที่
- ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลาย (5, 10, 15 และ 18 ml/min) โดยจะกำหนดให้ความเข้มข้นของสารละลายและปริมาณตัวดูดซับมีค่าคงที่
- ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย (200, 250, 300 และ 400 mg/L) โดยจะกำหนดให้ปริมาณของตัวดูดซับและอัตราการไหลของสารละลายมีค่าคงที่

หมายเหตุ สารละลายหมายถึง สารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู มาลาไคท์กรีน และโรดามีนบี ขั้นตอนในการทดลองจะคล้ายๆกันแต่จะทำการเปลี่ยนเพียงสารละลายสีย้อม



ภาพที่ 38 ส่วนประกอบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์ (หมายเลข 1 ขวดเก็บสารละลายสีขุ่น หมายเลข 2 เครื่องสูบลม (Pump) หมายเลข 3 คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ หมายเลข 4 ขวดเก็บสารตัวอย่าง)

3.5 การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่มีปริมาณไนโตรเจนแตกต่างกันจากวัตถุดิบผักตบชวา



ภาพที่ 39 การเตรียมผักตบชวา (WH)



ภาพที่ 40 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวา



ภาพที่ 41 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์เจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา

หมายเหตุ

W800 คือ WH กระตุ้นที่ 800 °C

1M1W800 คือ Melamine : WH อัตราส่วน 1:1 และกระตุ้นที่ 800 °C

1M1W700 คือ Melamine : WH อัตราส่วน 1:1 และกระตุ้นที่ 700 °C

1M1W600 คือ Melamine : WH อัตราส่วน 1:1 และกระตุ้นที่ 600 °C

2M1W800 คือ Melamine : WH อัตราส่วน 2:1 และกระตุ้นที่ 800 °C

3M1W800 คือ Melamine : WH อัตราส่วน 3:1 และกระตุ้นที่ 800 °C



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

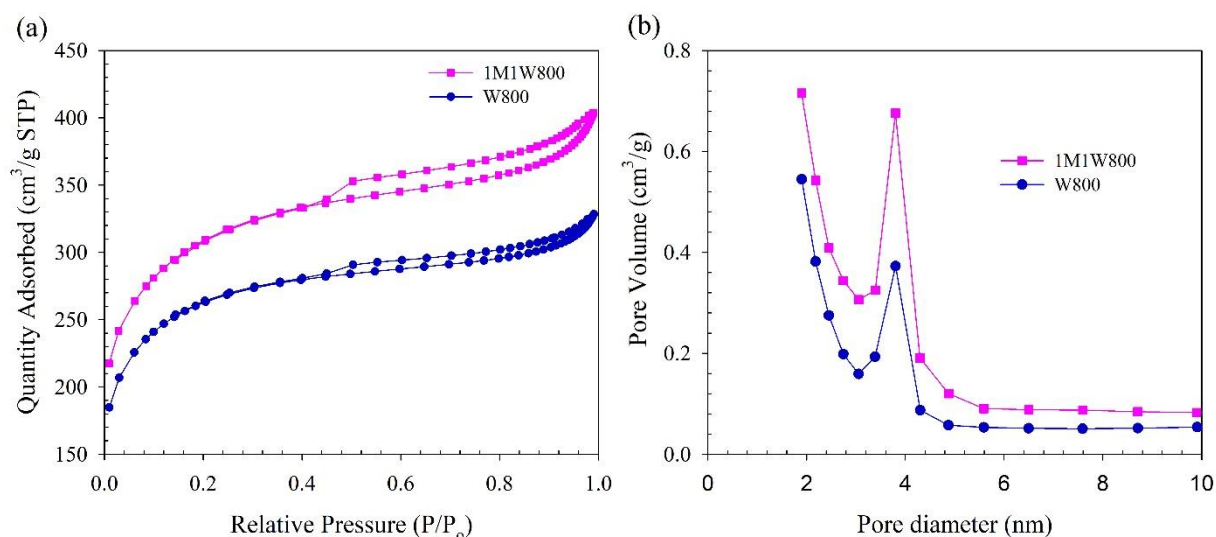
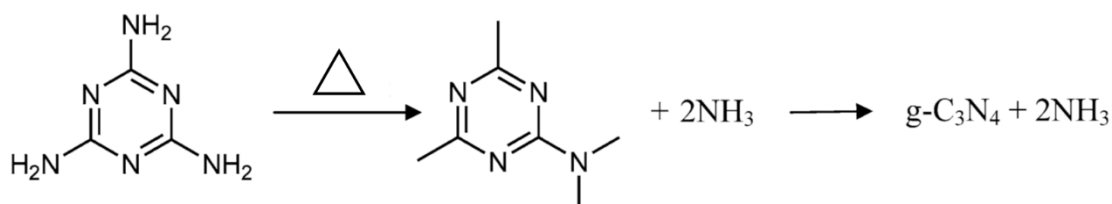
งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนจากวัตถุดิบผักตบชวา การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมได้ และศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดสีย้อม จากการดำเนินการทดลองผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดลอง ได้นำเสนอในรูปแบบของกราฟ ตารางและรูปภาพดังต่อไปนี้

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับชีวภาพชนิดคาร์บอนเจือด้วยไนโตรเจน

4.2.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

4.2.1.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนที่ไม่ผ่านและผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 42(a) แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับของ 1M1W800 (ตัวดูดซับที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้อัตราส่วนผักตบชวาต่อเมลามีน 1 : 1 และอุณหภูมิกระตุ้น 800 °C) และ W800 (ตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนโดยใช้อุณหภูมิกระตุ้น 800 °C) ซึ่งมีลักษณะสอดคล้องกับไอโซเทิร์ม Type IV ตาม IUPAC โดยแสดงถึงวัสดุรูพรุนที่มีขนาดของรูพรุนแบบมีโซ (Mesoporous) [35] และจากภาพที่ 42(b) พบว่า 1M1W800 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 3.685 nm. และ W800 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 3.529 nm. (ตารางที่ 4) แสดงให้เห็นถึงวัสดุคาร์บอนทั้งสองมีขนาดรูพรุนแบบมีโซ นอกจากนี้จากตารางที่ 4 พบว่า 1M1W800 มีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด พื้นที่ผิวระดับมีโซ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และปริมาตรรูพรุนระดับมีโซสูงกว่า W800 เนื่องจากในกระบวนการกระตุ้นนั้นสารเมลามีนสามารถสลายตัวไปเป็นแก๊สแอมโมเนีย (ดังแสดงในปฏิกิริยาด้านล่าง) ซึ่งสามารถกัดเซาะ (Etch) เมทริกซ์คาร์บอนจึงทำให้คาร์บอนมีพื้นที่ผิวสูงขึ้นและมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Chi Xu และคณะ [51] และงานวิจัยของ Michio Inagaki และคณะ [30] นอกจากนี้ผลจากการทดลองพบว่าพื้นที่ผิว (S_{micro}) และปริมาตรรูพรุนที่ขนาดระดับไมโคร (V_{micro}) ของ W800 มีค่าสูงกว่า 1M1W800

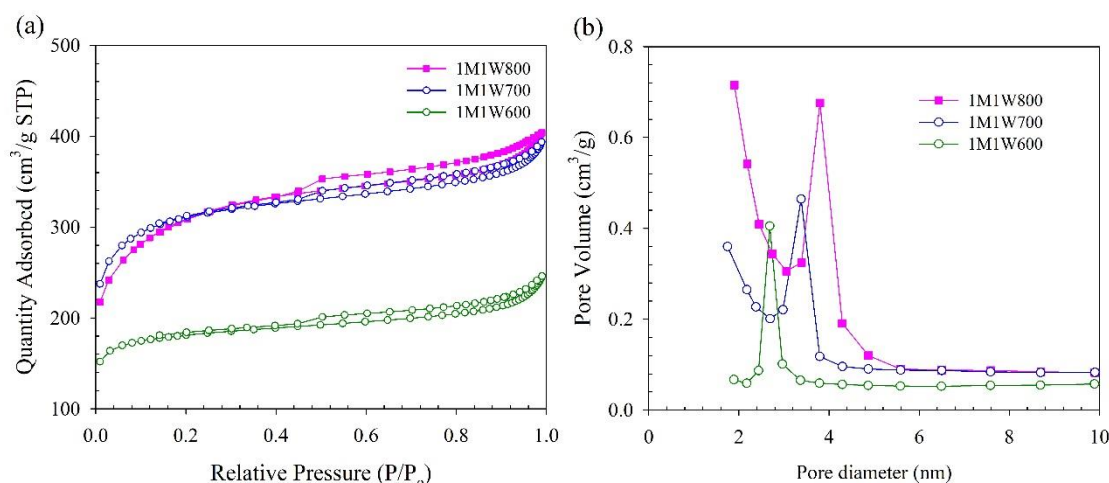


ภาพที่ 42 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนและ (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800 และ W800

4.2.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน ณ อุณหภูมิการกระตุ้นแตกต่างกัน

จากภาพที่ 43(a) แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับของ 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 (ตัวดูดซับที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้อัตราส่วนผกผันของเมลามีน 1 : 1 และอุณหภูมิกระตุ้น 800, 700 และ 600 °C ตามลำดับ) พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนทั้งสามนี้มีลักษณะสอดคล้องกับไอโซเทิร์ม Type IV ตาม IUPAC ซึ่งแสดงถึงวัสดุรูพรุนที่มีขนาดของรูพรุนแบบมีโซ (Mesoporous) นอกจากนี้จากภาพที่ 43(b) และตารางที่ 4 พบว่า 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 3.685, 3.275 และ 2.533 nm. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนทั้งสามนี้มีขนาดรูพรุนแบบมีโซ พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวระดับมีโซ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ปริมาตรรูพรุนระดับมีโซและขนาดของรูพรุนระดับมีโซเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้นเมลามีนมีการปลดปล่อยแอมโมเนีย ออกมาได้มากขึ้นจึงสามารถกัดเซาะเมทริกซ์

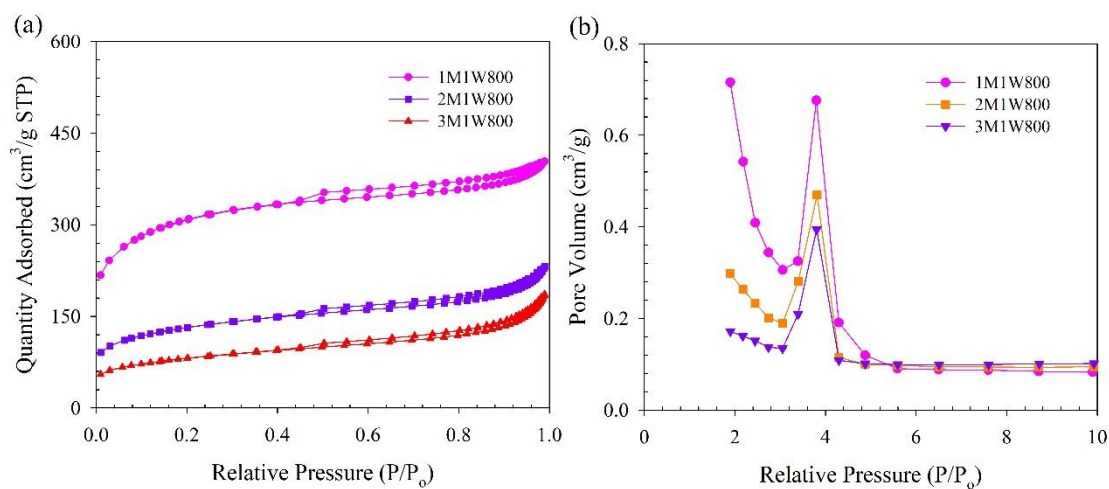
คาร์บอนได้เพิ่มขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cafer Saka [52] ในขณะที่พื้นที่ผิวระดับไมโคร (S_{micro}) และปริมาตรรูพรุนระดับไมโคร (V_{micro}) ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้นจาก 700 °C ไปเป็น 800 °C



ภาพที่ 43 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนและ (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600

4.2.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน โดยใช้ปริมาณเมลามีนที่แตกต่างกัน

ไอโซเทิร์มการดูดซับของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 (ตัวดูดซับที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน อุณหภูมิในการกระตุ้น 800 °C โดยใช้อัตราส่วนผกผันของเมลามีน 1 : 1, 1 : 2 และ 1 : 3 ตามลำดับ) แสดงในภาพที่ 44(a) โดยตัวดูดซับคาร์บอนทั้งสามนี้มีลักษณะสอดคล้องกับไอโซเทิร์ม Type IV ตาม IUPAC แสดงถึงวัสดุรูพรุนที่มีขนาดของรูพรุนแบบมีโซ (Mesoporous) จากภาพที่ 44(b) และตารางที่ 4 พบว่า 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยประมาณ 3.685, 3.799 และ 3.810 nm. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคาร์บอนทั้งสามนี้มีขนาดรูพรุนแบบมีโซ เมื่อปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้น พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนมีพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด พื้นที่ผิวระดับมีโซ ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และปริมาตรรูพรุนระดับมีโซลดลง อาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของเมลามีนที่มากเกินไป เมลามีนบางส่วนจะสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย แต่บางส่วนจะเกิดเป็นคาร์บอนขึ้น จึงเข้าไปกั้นหรือปิดรูพรุนของเมทริกซ์คาร์บอนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sunan Wang และคณะ [53]



ภาพที่ 44 (a) ไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจน (b) การกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800

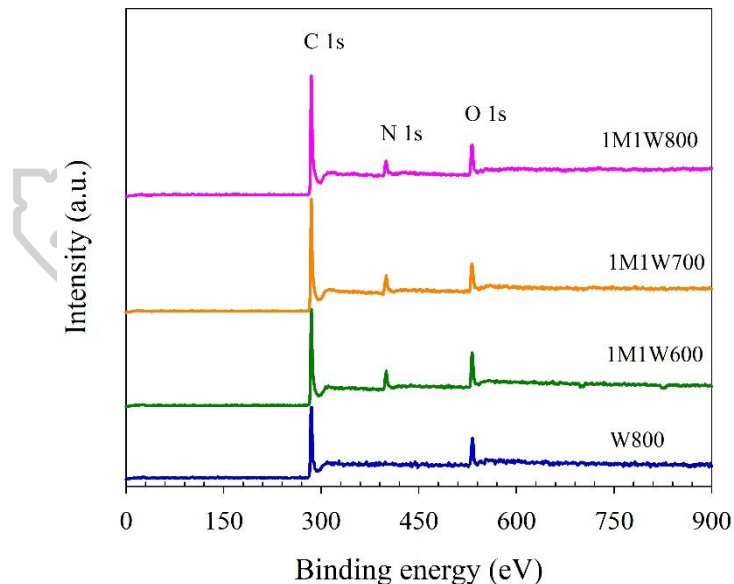
ตารางที่ 4 ข้อมูลพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดเฉลี่ยของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาและคาร์บอนกัมมันต์เจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา

Sample	S_{BET} (m^2/g)	S_{micro} (m^2/g)	S_{external} (m^2/g)	V_{total} (cm^3/g)	V_{micro} (cm^3/g)	Average pore diameter (nm)
W800	928.054	473.446	454.608	0.501	0.207	3.529
1M1W800	1,052.668	467.471	585.197	0.599	0.204	3.685
1M1W700	1,093.512	759.5739	333.938	0.600	0.334	3.275
1M1W600	634.592	490.453	144.139	0.371	0.217	2.533
2M1W800	465.255	180.493	284.761	0.346	0.079	3.799
3M1W800	286.944	92.978	193.966	0.273	0.041	3.810

4.2.2 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ

4.2.2.1 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800

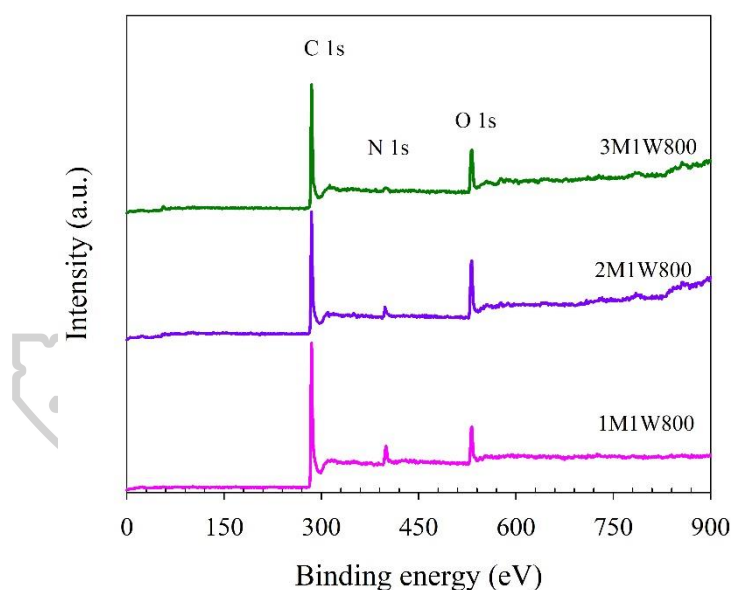
จากภาพที่ 45 แสดงสเปกตรัม XPS ของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 จากผลการวิเคราะห์พบว่า 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 ปรากฏธาตุคาร์บอน, ออกซิเจน และไนโตรเจน ในขณะที่ W800 ปรากฏธาตุคาร์บอนและออกซิเจน แต่ไม่พบธาตุไนโตรเจนเนื่องจากไม่ได้ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน แต่จะพบธาตุไนโตรเจนใน 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้นี้ถูกเจือด้วยธาตุไนโตรเจน จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้นปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่พื้นผิวมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากเกิดการไฟโรไลซิสได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดการสลายตัวของคาร์บอนที่มีไนโตรเจนได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Michael Ayiania และคณะ [54] เมื่อเปรียบเทียบ W800 จะไม่พบธาตุไนโตรเจนเนื่องจากไม่ได้ทำเจือด้วยไนโตรเจน



ภาพที่ 45 สเปกตรัม XPS ของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800

4.2.2.2 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800

จากภาพที่ 46 แสดงสเปกตรัม XPS ของธาตุที่อยู่บนพื้นผิวของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนทั้งสามนี้ปรากฏธาตุคาร์บอน, ออกซิเจน และไนโตรเจน พบว่าความสูงของพีค N1s ลดลง จากตารางที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีน ตัวดูดซับคาร์บอนมีปริมาณธาตุไนโตรเจนบริเวณพื้นผิวลดลง โดย 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 มีอัตราส่วนของธาตุไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N:C) เท่ากับ 0.123, 0.040 และ 0.034 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ruijie Gao และคณะ [55] โดยอาจเนื่องมาจากเมื่อปริมาณเมลามีนมากเกินไปจะเกิดการสลายตัวไปเป็นแก๊สแอมโมเนียมากขึ้น จึงส่งผลให้ความดันในระบบการไพโรไลซิสสูงขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียแก๊สแอมโมเนียที่เป็นแหล่งไนโตรเจนออกไปจากระบบ



ภาพที่ 46 สเปกตรัม XPS ของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800

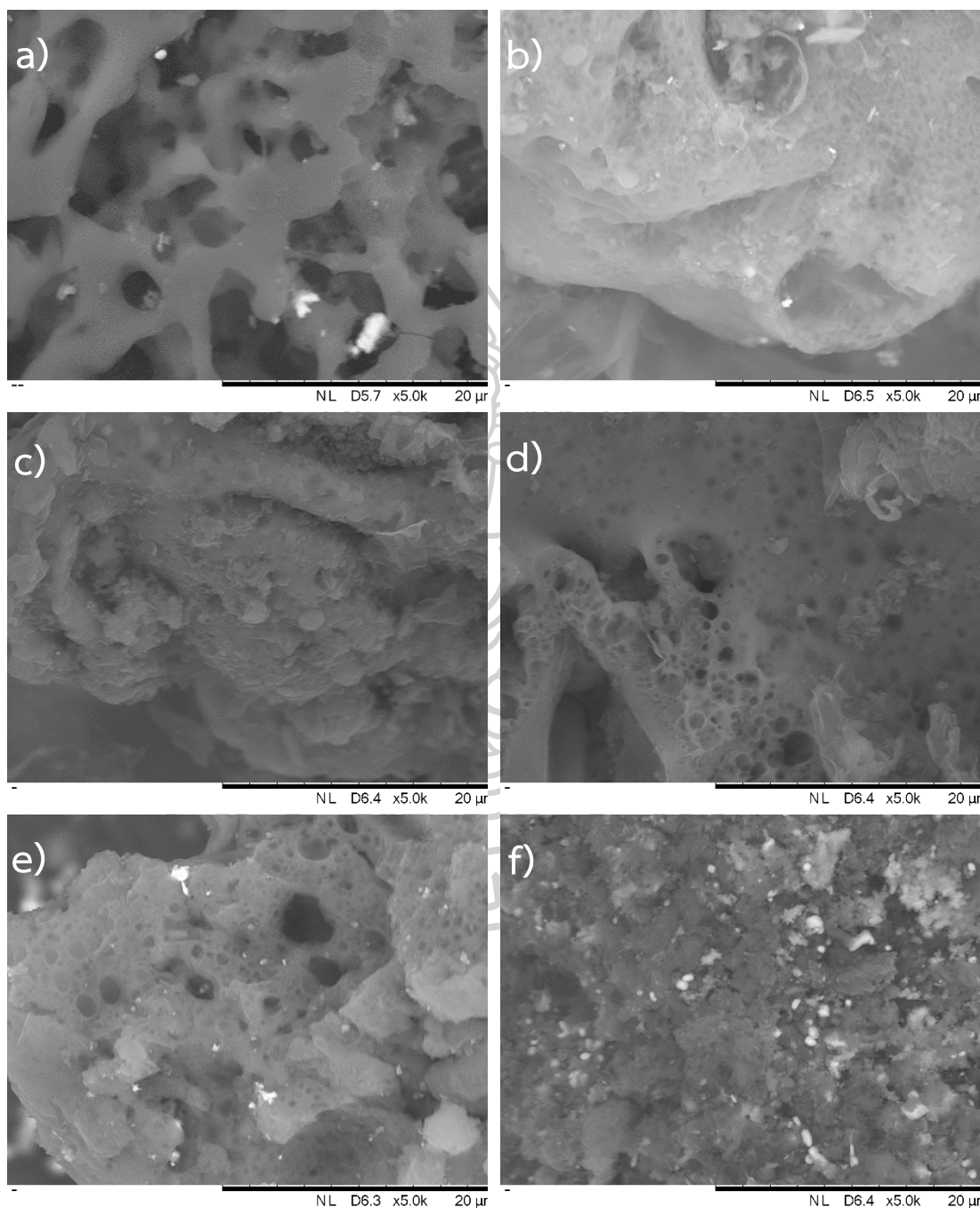
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของอะตอมที่ตรวจพบที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS

Sample	Element concentration (%)				
	C	O	N	N:C	O:C
W800	86.82	13.18	-	-	0.152
1M1W800	83.91	8.26	7.73	0.092	0.098
1M1W700	83.01	7.92	9.07	0.109	0.095
1M1W600	79.00	11.32	9.68	0.123	0.143
2M1W800	81.47	15.29	3.25	0.040	0.188
3M1W800	80.63	13.38	2.74	0.034	0.166

4.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ

จากภาพที่ 47(a) แสดงภาพ SEM ของ W800 พบว่ามีลักษณะพื้นผิวหยาบ มีรูพรุนคล้ายกับตาข่าย ส่วนภาพที่ 47(b) แสดงภาพ SEM ของ 1M1W800 แสดงพื้นผิวที่ขรุขระ มีรูพรุนจำนวนมาก และมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำ เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 47(a) และ 47(b) จะเห็นได้ว่า 1M1W800 มีปริมาณรูพรุนสูงกว่า W800 ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิค BET (ตารางที่ 4) และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yao Li และคณะ [56] จากภาพที่ 47(c) แสดงภาพ SEM ของ 1M1W600 พบว่ามีพื้นผิวขรุขระ และมีปริมาณรูพรุนไม่สูง ส่วนภาพที่ 47(d) แสดงภาพ SEM ของ 1M1W700 มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ และมีรูพรุนคล้ายกับฟองน้ำ เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 47(b), 47(c) และ 47(d) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นสูงขึ้นลักษณะรูพรุนกลมกลวงมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yihua Tang และคณะ [57] จากภาพที่ 47(e) มีพื้นผิวขรุขระคล้ายกับรูพรุนของฟองน้ำ และภาพที่ 47(f) มีพื้นผิวที่ขรุขระมาก เมื่อเปรียบเทียบภาพที่ 47(b), 47(e) และ 47(f) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเมลามีนมากขึ้นจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะที่เป็นรูพรุนคล้ายกับฟองน้ำลดลง เนื่องจากมีการลดลงของพื้นผิวระดับไมโครและระดับมีโซ (ดังที่ได้แสดงในผลจากการทดสอบด้วยเทคนิค BET) อาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของเมลามีนที่มากเกินไป เมลามีนบางส่วนสามารถ

สลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนีย แต่เมลามีนบางส่วนจะเกิดเป็นคาร์บอนขึ้นจึงเข้าไปกั้นหรือปิดรูพรุนของเมทริกซ์คาร์บอนได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiaochen Jiang และคณะ [58]

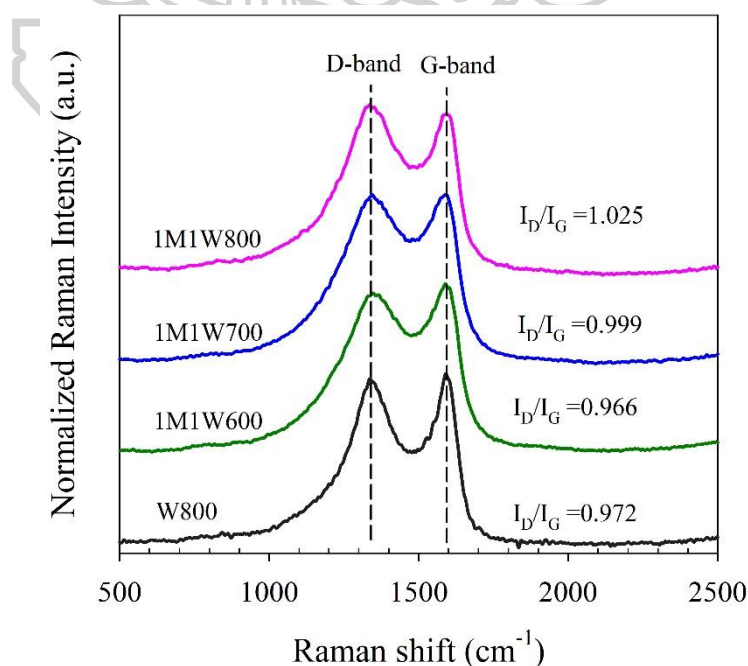


ภาพที่ 47 ภาพ SEM ของ (a) W800, (b) 1M1W800, (c) 1M1W600, (d) 1M1W700 (e), 2M1W800 และ (f) 3M1W800

4.2.4 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของตัวดูดซับที่เตรียมได้

4.2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของ 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800

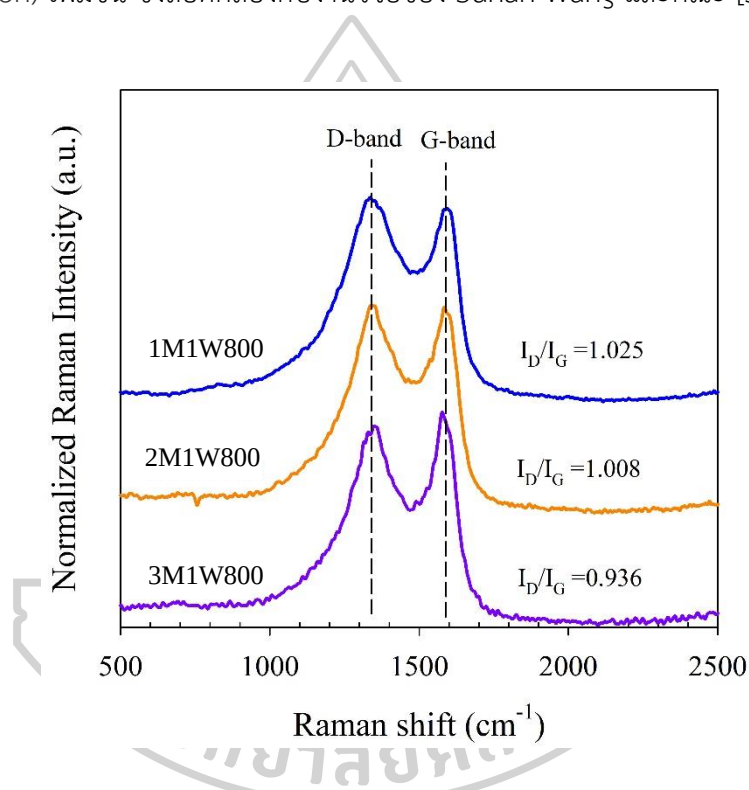
จากภาพที่ 48 แสดงสเปกตรัมรามานของ W800 และ 1M1W800 พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนทั้งสองนี้ มีจุดสูงสุดของพีค ณ ตำแหน่งของ 1350 และ 1590 cm^{-1} แสดงถึง D-band และ G-band ตามลำดับ ซึ่ง D-band เกี่ยวข้องกับพันธะ C-C หรือ sp^3 แสดงถึงส่วนไม่เป็นระเบียบ บกพร่อง และ Heteroatoms ระหว่างโมเลกุล ส่วน G-band เกี่ยวข้องกับ $-C=C-$ หรือ sp^2 แสดงถึงความเป็นระเบียบหรือส่วนของแกรไฟต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มของพีคทั้งสอง (I_D/I_G) พบว่า W800 มีอัตราส่วน I_D/I_G เท่ากับ 0.972 ในขณะที่ 1M1W800 มีอัตราส่วน I_D/I_G เท่ากับ 1.025 ซึ่ง I_D/I_G ของ 1M1W800 มีค่าสูงกว่า W800 เนื่องจาก 1M1W800 เป็นตัวดูดซับคาร์บอนที่ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน อะตอมไนโตรเจนทำให้โครงสร้างของคาร์บอนเกิดความผิดปกติหรือส่วนไม่เป็นระเบียบมากขึ้นจากการก่อตัวเป็น sp^2 และ sp^3 แบบผสมกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Duo Dong และคณะ [59] จากสเปกตรัมรามานของ 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 พบว่าความเข้มของ D-band เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการกระตุ้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการกระตุ้นสูงขึ้นและมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นส่งผลต่อความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuanqing Sun และคณะ [60] โดยอัตราส่วน I_D/I_G ของ 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 มีค่าเท่ากับ 0.966 , 0.999 และ 1.025 ตามลำดับ



ภาพที่ 48 สเปกตรัมรามานของ W800, 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800

4.2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800

จากภาพที่ 49 สเปกตรัมรามานของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 พบว่าตัวดูดซับคาร์บอนทั้งสามที่ได้จากการใช้ปริมาณเมลามีนที่แตกต่างกัน มีจุดสูงสุดของพีคที่ 1350 และ 1590 cm^{-1} แสดงถึง D-band และ G-band ตามลำดับ โดยอัตราส่วน I_D/I_G มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีน 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 มีค่าอัตราส่วน I_D/I_G เท่ากับ 1.025, 1.008 และ 0.936 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณเมลามีนเพิ่มขึ้น ทำให้ระดับการเกิดแกรไฟต์ (Graphitization) เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sunan Wang และคณะ [53]

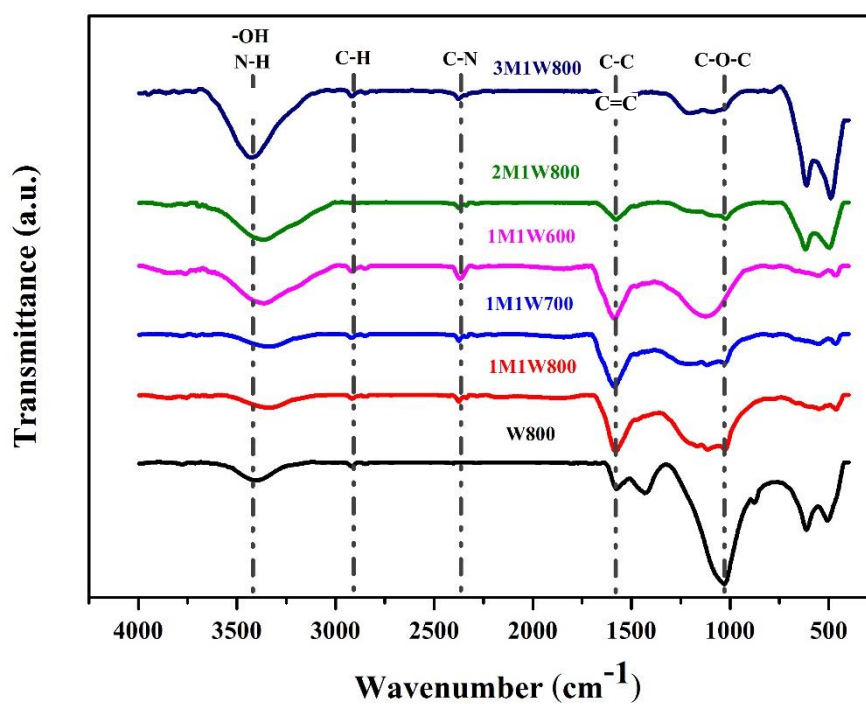


ภาพที่ 49 สเปกตรัมรามานของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800

4.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวดูดซับ

จากภาพที่ 45 แสดงสเปกตรัม FTIR โดยหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีอยู่ในคาร์บอนในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3430 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน O-H เลขคลื่นประมาณ 2980-2800 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C-H เลขคลื่นประมาณ 2300-2400 cm^{-1} แสดงหมู่ฟังก์ชัน C-N เลขคลื่นช่วงประมาณ 1630 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ฟังก์ชัน C=C เลขคลื่นประมาณ 1100-1000 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชัน C-O-C จากผลการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR แสดงถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน C-N และ C-O ในวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XPS (ภาพที่ 46 และตารางที่ 5)

เมื่อพิจารณาสเปกตรัม FTIR ของ 2M1W800 และ 3M1W800 พบว่าปรากฏพีคที่เลขคลื่น $500-600\text{ cm}^{-1}$ แสดงหมู่ฟังก์ชัน C-O ในวงแหวนอะโรมาติก อาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีนมากขึ้น จะเกิดการสลายตัวของเมลามีนกลายเป็นแก๊สแอมโมเนียมากขึ้น ทำให้ความดันในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียแก๊สแอมโมเนียในที่เป็นแหล่งไนโตรเจนในการเจือตัวดูดซับคาร์บอน จึงเกิดการเจือไนโตรเจนในตัวดูดซับคาร์บอนได้น้อยลง ในขณะที่หมู่ฟังก์ชัน C-O ปรากฏขึ้นคล้ายคลึงกับที่พบใน W800 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองด้วยเทคนิค XPS (ตารางที่ 5) 2M1W800 และ 3M1W800 มีอัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O:C) มากกว่าอัตราส่วนของไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N:C)



ภาพที่ 50 สเปกตรัม FTIR ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาและคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาเจือด้วยไนโตรเจน

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับหรือการกำจัดสีย้อมของวัสดุคาร์บอนที่เตรียมได้

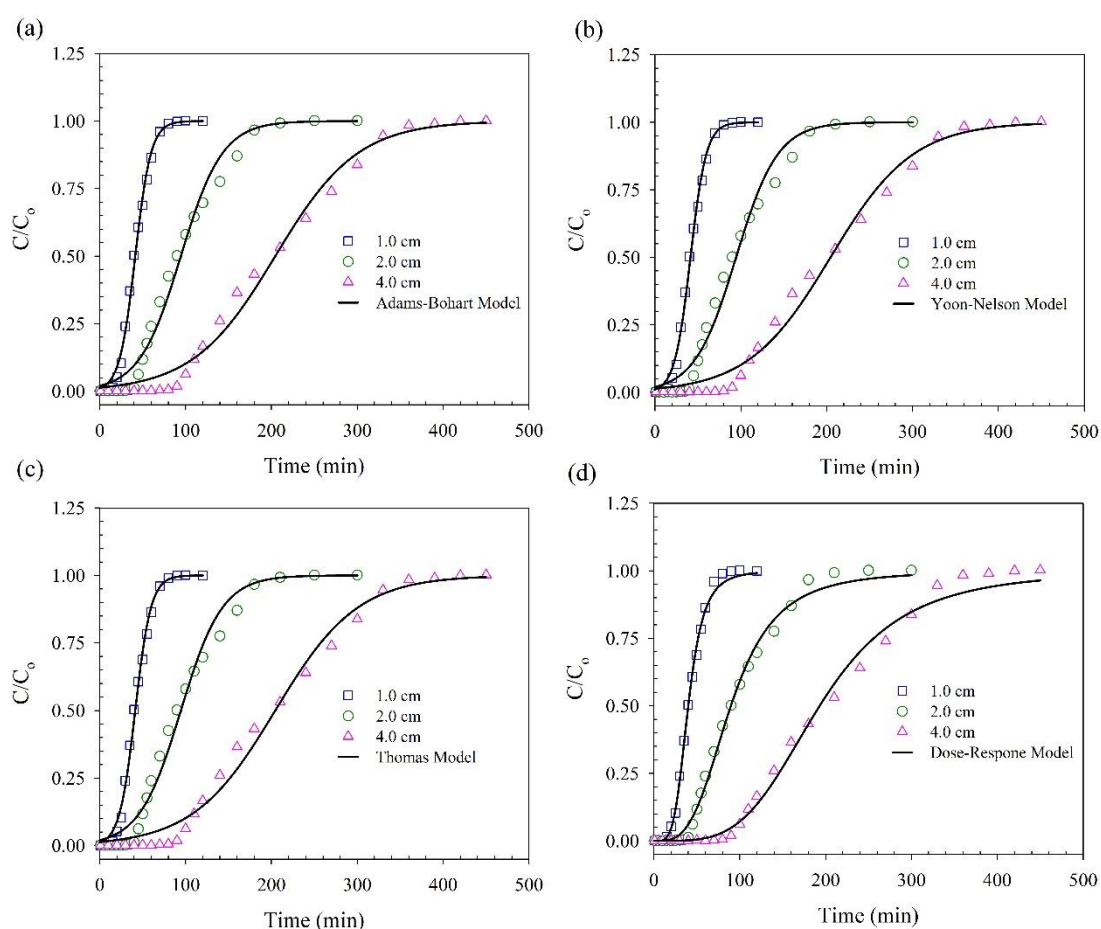
ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการศึกษาตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวา และคาร์บอนกัมมันต์มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนจากผักตบชวา โดยทำการศึกษาปัจจัยในการดูดซับที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น อัตราการไหลของสารละลาย และความสูงของคอลัมน์ตัวดูดซับ ปริมาณของไนโตรเจนที่เจือในคาร์บอน

4.3.1 ตัวดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาที่ไม่ผ่านการเจือ

4.3.1.1 ความสูงของคอลัมน์ที่แตกต่างกันของตัวดูดซับที่ดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวา

จากภาพที่ 51 และตารางที่ 6 ที่ Bed height แตกต่างกัน 1, 2 และ 4 เซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรคงที่ อัตราการไหล 10 mL/min พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อให้สารละลายไหลผ่านคอลัมน์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้น จนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป ($C_t/C_0 \approx 0.1$) จะเรียกว่า เวลาเบรคทรู (Breakthrough time) ซึ่งหาได้จากกราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) เมื่อ Bed height ที่สูงขึ้น 1, 2 และ 4 เซนติเมตร เวลาเบรคทรูมีค่าเท่ากับ 25, 45 และ 105 นาทีตามลำดับ เมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption, k_{AB}) ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าน้อยลงแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง เนื่องจากที่ความสูงของ Bed height ที่มากขึ้นทำให้มีตำแหน่งว่างไวที่ว่าง (Vacant active site) มากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจึงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Koninika Tanzim และคณะ [61] จากค่า N_0 บ่งบอกถึงค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด เมื่อ Bed height สูงขึ้นที่ 1, 2 และ 4 เซนติเมตร มีค่าแนวโน้มที่สูงขึ้น 40.0403, 45.9629 และ 49.8662 g/L ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Vinodhini และคณะ [62] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า Rate of adsorption (k_{YN}) ลดลง ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson ค่า k_{YN} มีค่าน้อยลงแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams จากค่า τ บ่งบอกถึงค่าครึ่งเวลาของการดูดซับทั้งหมดในกราฟเบรคทรู จาก Bed height สูงขึ้นที่ 1, 2 และ 4 เซนติเมตร ค่า τ มีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 41.39, 94.52 และ 204.45 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นทำให้มีพื้นที่

ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น จึงสามารถดูดซับสีย้อมมากขึ้น ค่า Q_0 บ่งบอกถึงค่าปริมาณในการดูดซับสูงสุดต่อตัวดูดซับ 1 กรัม โดยมีค่า 308.2383, 354.6327 และ 383.5545 mg/g ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้น 1, 2 และ 4 เซนติเมตร ค่า Q_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 298.2906, 336.6032 และ 362.1547 mg/g ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] เมื่อพิจารณาค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response พบว่ามีค่าแนวโน้มคล้ายคลึงกัน พบว่าในแบบจำลองของ Thomas เมื่อ Bed height สูงขึ้นจาก 1 เซนติเมตร เป็น 2 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร ค่า Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 15.05% และ 24.43% ตามลำดับ ส่วนในแบบจำลองของ Dose-Response ค่า Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 12.84% และ 21.41% ตามลำดับ



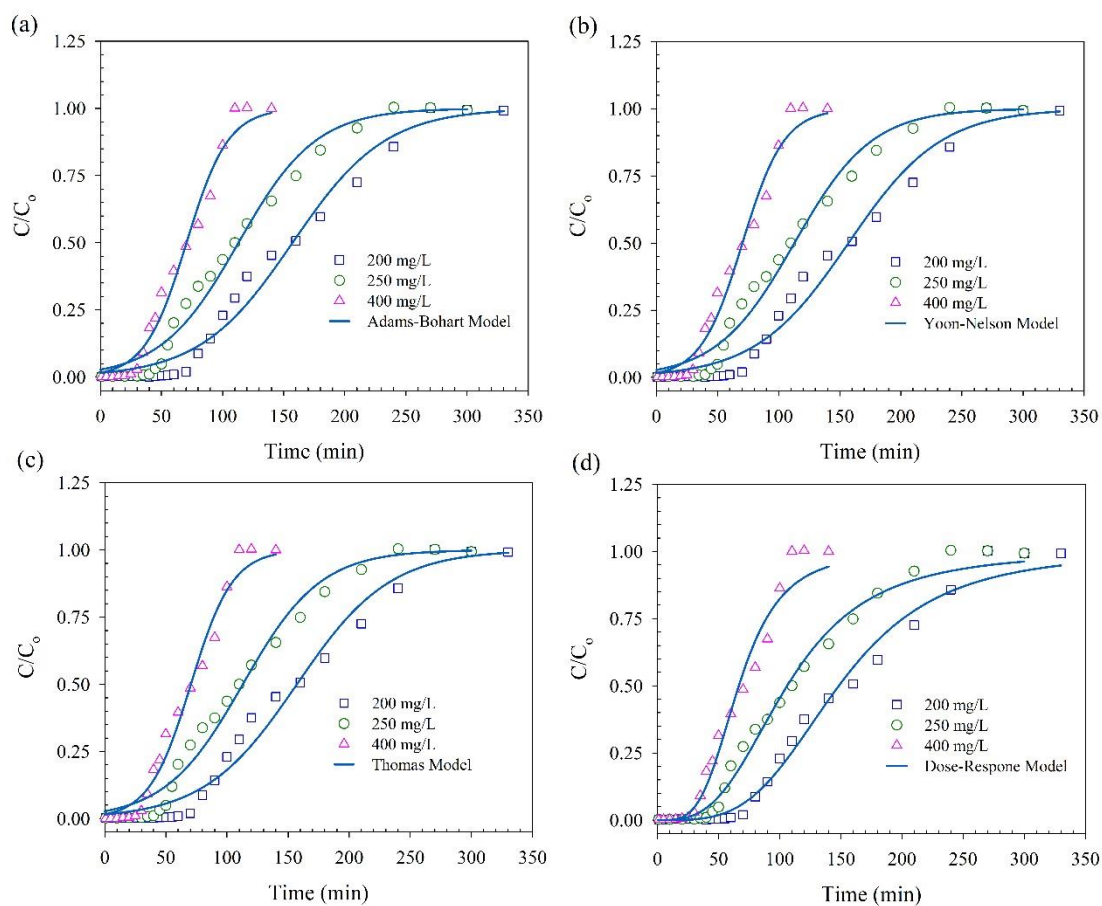
ภาพที่ 51 กราฟเบรคทูร์ของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 6 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Bed height (cm)		
		1	2	4
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	3.5896×10^{-4}	1.3587×10^{-4}	6.8200×10^{-5}
	N_o (g L ⁻¹)	40.0403	45.9629	49.8662
	R^2	0.9961	0.9846	0.9900
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	1.0879×10^{-1}	4.1304×10^{-2}	2.0835×10^{-2}
	τ (min)	41.39	94.52	204.45
	R^2	0.9961	0.9846	0.9900
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	3.5897×10^{-1}	1.3588×10^{-1}	6.8202×10^{-2}
	Q_o (mg g ⁻¹)	308.2383	354.6327	383.5545
	R^2	0.9961	0.9846	0.9900
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	298.2906	336.6032	362.1547
	a	4.3756	3.3947	3.8932
	R^2	0.9976	0.9952	0.9928

4.3.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นแตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาที่ไม่ผ่านการเจือ

จากภาพที่ 52 และตารางที่ 7 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลลีนบลู แตกต่างกันว่า 200, 250 และ 400 mg/L โดยใช้อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 200, 250 และ 400 mg/L เวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 81, 66 และ 31 นาทีตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Solairaj Dhananasekaran และคณะ [65] เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้นจะมีแรงขับ (Driving force) มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Naghmeh Fallah และคณะ [66] เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 200, 250 และ 400 mg/L ค่า N_0 มีค่าแนวโน้มที่ลดลง จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams เมื่อพิจารณาว่า τ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า τ มีค่าแนวโน้มที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ EhsanSalehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงขับในการถ่ายโอนมวลไปยังพื้นที่ผิวดูดซับเกิดความอิ่มตัวรวดเร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] จากค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 250 และ 400 mg/L พบว่าค่า Q_0 ลดลง 12.43% และ 12.93% ในแบบจำลอง Thomas ในขณะที่ Q_0 มีค่าลดลง 12.87% และ 12.90% ในแบบจำลอง Dose-Response



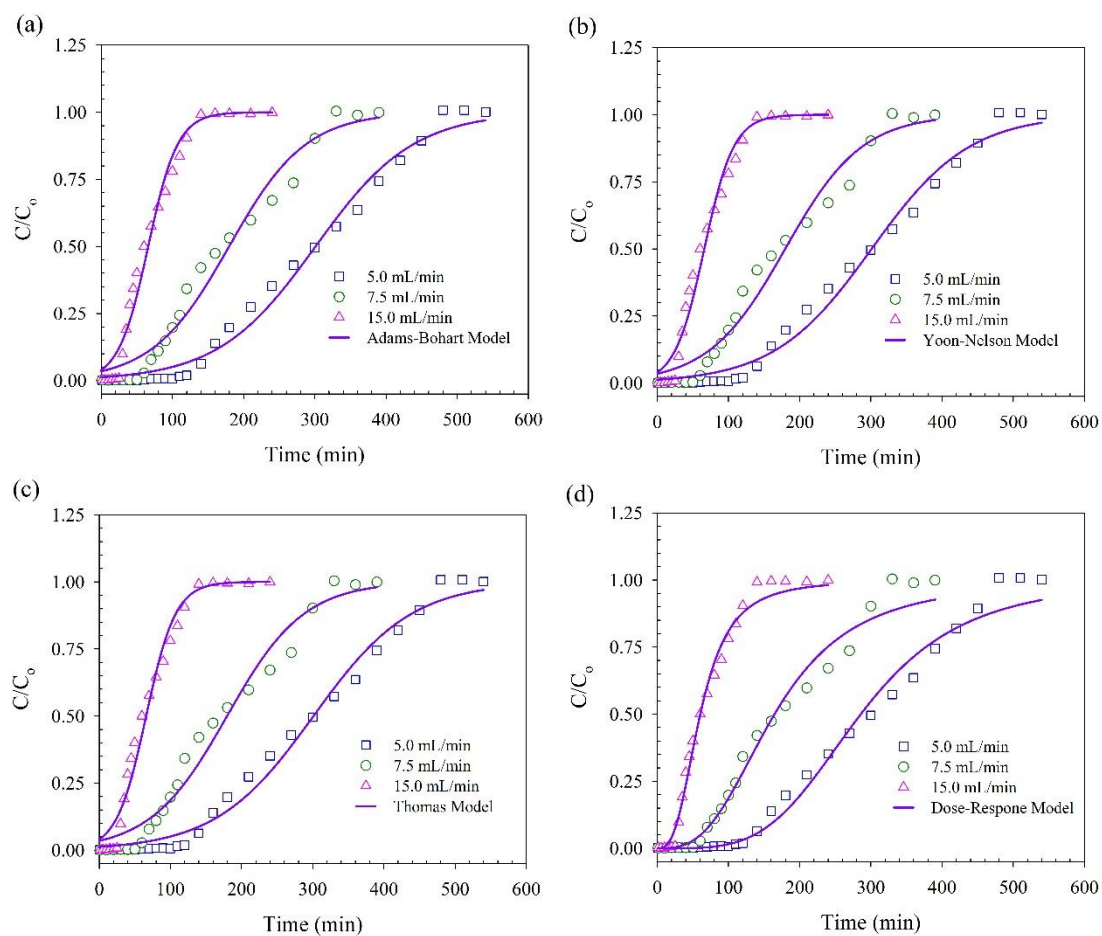
ภาพที่ 52 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 7 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Concentration(mg/L)		
		200	250	400
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	1.2489×10^{-4}	1.2715×10^{-4}	1.4587×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	52.0419	45.7558	45.3157
	R^2	0.98265	0.9815	0.9826
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	2.6349×10^{-2}	3.1536×10^{-2}	5.8698×10^{-2}
	τ (min)	157.1931	112.9661	70.48618
	R^2	0.982652	0.9815	0.9826
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	1.2489×10^{-1}	1.2715×10^{-1}	1.4587×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	402.0597	352.0761	350.08824
	R^2	0.982652	0.9815	0.9826
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	379.4632	330.6357	330.5275
	a	3.6314	3.1194	3.7829
	R^2	0.988498	0.9906	0.9769

4.3.1.3 อัตราการไหลของสารละลายที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาที่ไม่ผ่านการเจือ

จากภาพที่ 53 และตารางที่ 8 ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min เวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 113, 77 และ 24 นาทีตามลำดับ สำหรับ k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] และค่า N_0 มีค่าแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น เวลาในการสัมผัสระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับจะลดลงทำให้เกิดการดูดซับลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lopamudra Das และคณะ [68] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson เมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams โดยมีค่า τ ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min มีค่าแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งมีค่า 301.0757, 179.6376 และ 65.9815 นาทีตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าความอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่า 567.4540, 518.7918 และ 375.7384 mg/g จากค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ อัตราการไหลของสารละลายจาก 5 mL/min เป็น 7.5 และ 15 mL/min ค่า Q_0 มีค่าลดลง 8.54% และ 33.79% สำหรับแบบจำลอง Thomas ส่วนค่า Q_0 มีค่าลดลง 11.74% และ 36.22% สำหรับแบบจำลอง Dose-Response



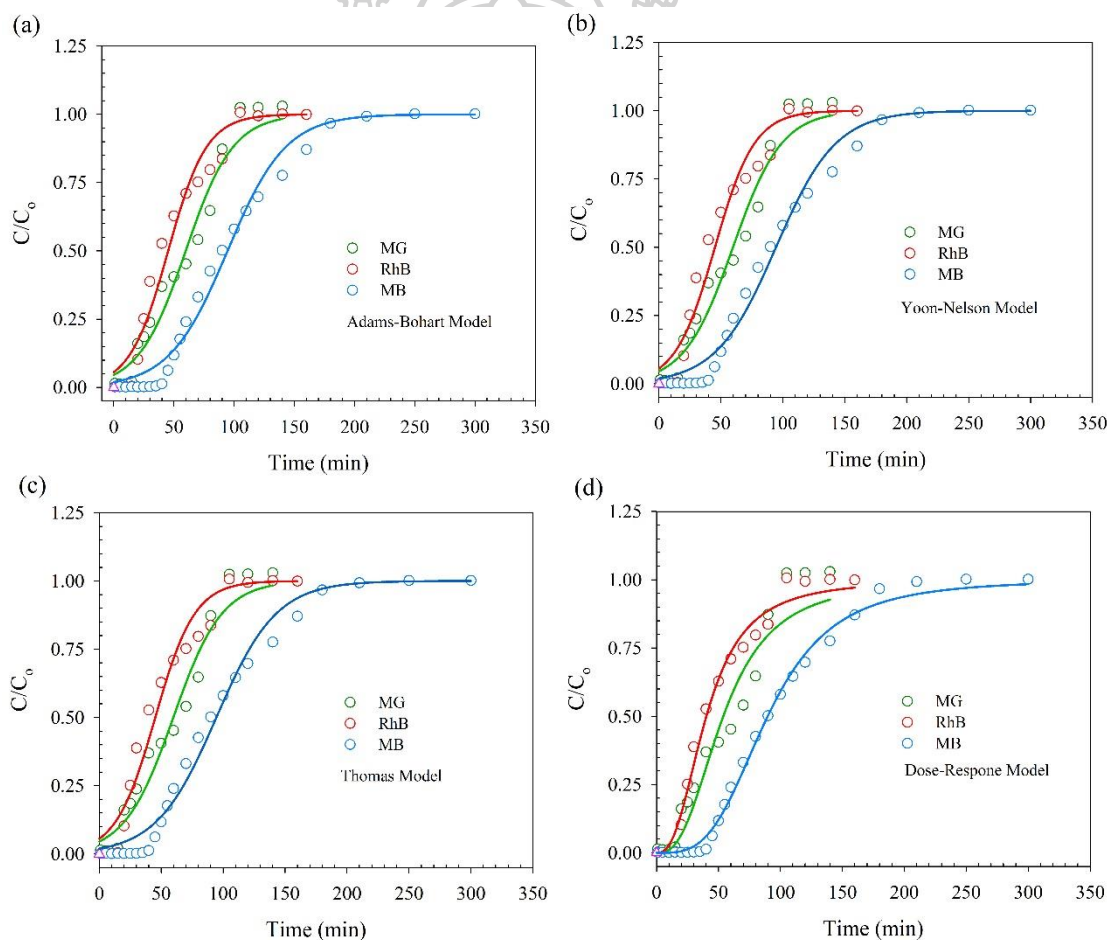
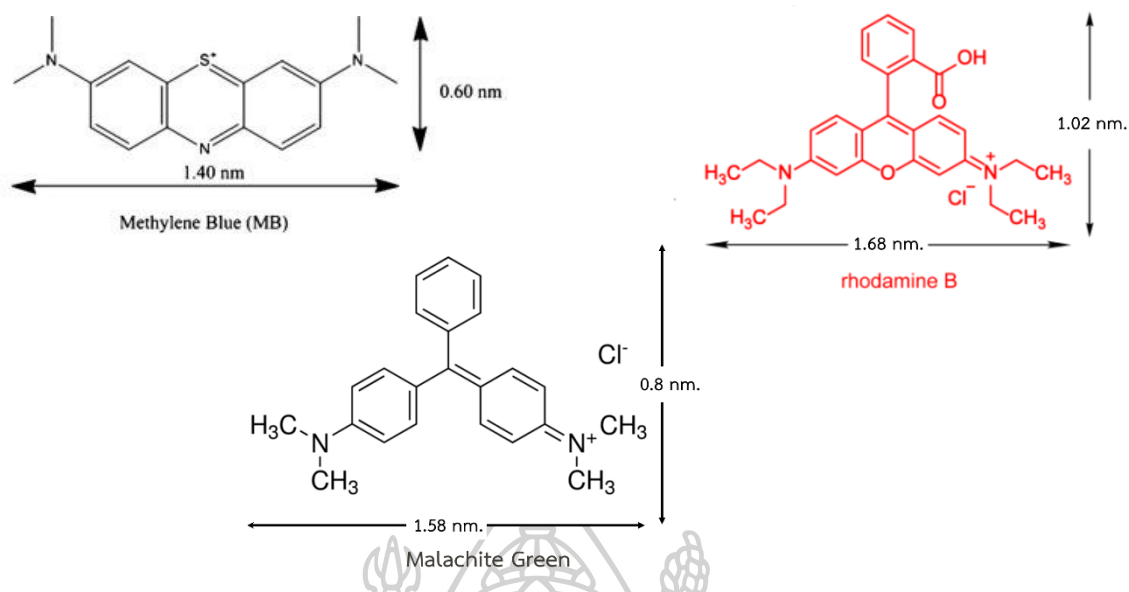
ภาพที่ 53 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 8 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 7.5 และ 15 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Flow rate (mL/min)		
		5	7.5	15
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	4.7811x10 ⁻⁵	6.0056x10 ⁻⁵	1.5670x10 ⁻⁴
	N_o (g L ⁻¹)	73.0988	66.7745	49.0715
	R^2	0.9897	0.9748	0.9794
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	1.4546x10 ⁻²	1.8505x10 ⁻²	4.8199x10 ⁻²
	τ (min)	301.0757	179.6376	65.9815
	R^2	0.9897	0.9748	0.9794
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	4.7813x10 ⁻²	6.0056x10 ⁻²	1.5670x10 ⁻¹
	Q_o (mg g ⁻¹)	567.4540	518.7948	375.7384
	R^2	0.9897	0.9748	0.9794
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	538.6602	475.4129	343.5416
	a	3.9603	2.9462	2.8628
	R^2	0.9872	0.9820	0.9915

4.3.1.3 สีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) ที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์จากผักตบชวาที่ไม่ผ่านการเจือ

จากภาพที่ 54 และตารางที่ 9 ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น พบว่าเวลาเบรคท루ของสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), มาลาไคท์กรีน (MG) และโรดามีนบี (RhB) มีค่าเท่ากับ 66, 17 และ 20 min ตามลำดับ ในแบบจำลอง Bohart-Adams ค่า N_0 ของสีย้อม MB มีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ สีย้อม MG และสีย้อม RhB โดยมีค่าเท่ากับ 45.9629, 31.1229 และ 22.3612 g/L ตามลำดับ เนื่องจากตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับคือ W800 จากผลการทดสอบ BET W800 มี S_{micro} เท่ากับ 473.446 m^2/g และมีค่า S_{external} เท่ากับ 454.608 m^2/g แสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็นรูพรุนขนาดไมโครมีพื้นที่ผิวมากกว่าส่วนที่เป็นรูพรุนขนาดมีโซ สีย้อม MB มีขนาดโมเลกุล (Molecular size) เท่ากับ 0.6 nm. $\times$ 1.4 nm. และมีน้ำหนักโมเลกุล 319 g/mol [48, 69] สีย้อม MG มีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 0.8 nm. $\times$ 1.58 nm. และน้ำหนักโมเลกุล 365 g/mol [70] และสีย้อม RhB มีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 1.68 nm. $\times$ 1.02 nm. และน้ำหนักโมเลกุล 479 g/mol [47, 71] แสดงดังภาพด้านล่าง พบว่าขนาดโมเลกุลของสีย้อม MB มีขนาดเล็กที่สุดจึงทำให้สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนขนาดไมโคร มากกว่าสีย้อม MG และสีย้อม RhB ตามลำดับ แนวโน้มคล้ายคลึงกับแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าค่า τ ของสีย้อม MB มีค่ามากกว่าสีย้อม MG และสีย้อม RhB โดยมีค่าเท่ากับ 94.52, 59.77 และ 45.23 นาที เนื่องจากสีย้อม MB มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด จึงสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับคาร์บอนได้มากกว่าสีย้อม MG และสีย้อม RhB ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ [47, 72] สอดคล้องกับแบบจำลอง Thomas พบว่าค่า Q_0 ของสีย้อม MB มีค่ามากกว่าสีย้อม MG และสีย้อม RhB โดยมีค่าเท่ากับ 354.6327, 237.6883 และ 169.9644 mg/g ตามลำดับ อีกทั้งยังสอดคล้องกับแบบจำลอง Dose-Response พบว่าค่า Q_0 ของสีย้อม MB มีค่ามากกว่าสีย้อม MG และสีย้อม RhB โดยมีค่าเท่ากับ 336.6032, 214.1678 และ 151.0742 mg/g ตามลำดับ



ภาพที่ 54 กราฟเบรคท루ของ 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

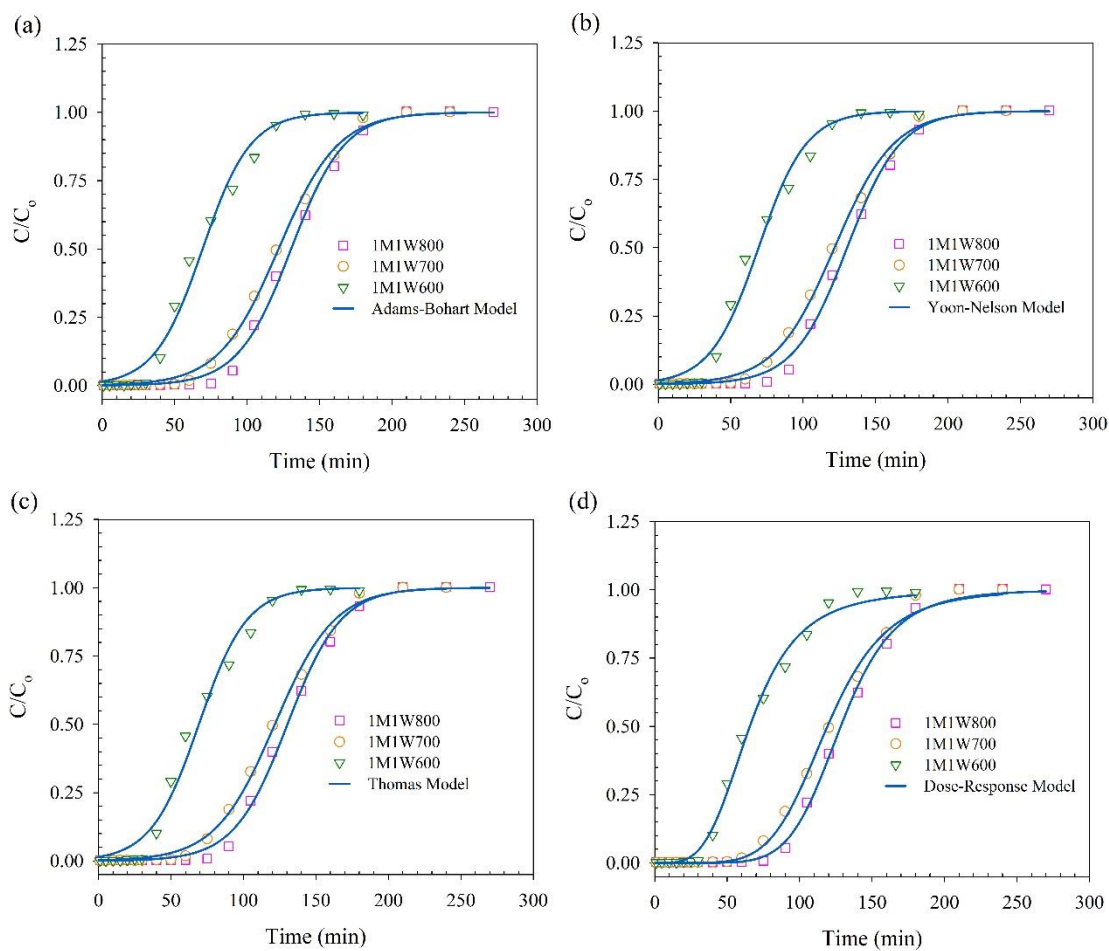
ตารางที่ 9 ข้อมูล 4 โมเดลจาก W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB), โรดามีนบี (RhB) และมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Dye type		
		MB	RhB	MG
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	1.3587×10^{-4}	2.0543×10^{-4}	1.5762×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	45.9629	22.3612	31.1229
	R^2	0.9846	0.9629	0.9676
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	4.1304×10^{-2}	6.2538×10^{-2}	5.0787×10^{-2}
	τ (min)	94.52	45.23	59.77
	R^2	0.9846	0.9629	0.9676
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	1.3588×10^{-1}	2.0543×10^{-1}	1.5762×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	354.6327	169.9644	237.6883
	R^2	0.9846	0.9629	0.9676
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	336.6032	151.0742	214.1678
	a	3.3947	2.5463	2.6627
	R^2	0.9952	0.9863	0.9529

4.3.2 ตัวดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

4.3.2.1 อุณหภูมิของการกระตุ้นที่แตกต่างกันในคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนดูดซับสีย้อมเมทิลินบลู (MB)

จากภาพที่ 55 และตารางที่ 10 ที่ดูดซับสีย้อม MB ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน โดยผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 เวลาเบรคทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 40, 78 และ 94 min ตามลำดับ จากแบบจำลอง Bohart-Adams พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากค่า N_0 มีค่า 34.3539, 59.1946 และ 63.5466 g/L ตามลำดับ จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยพิจารณาจากค่า τ มีค่า 69.26, 121.66 และ 130.37 นาที จากแบบจำลอง Thomas พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่า Q_0 มีค่า 265.4740, 458.8569 และ 492.7528 mg/g จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนี้ 251.6186, 478.8216 และ 485.2570 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สระเหยออกมาได้มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Changqing Su และคณะ [73] จากผลการทดสอบที่ได้จากเทคนิค BET ของ 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 มีค่าพื้นที่ผิว S_{BET} 634.512, 1093.512 และ 1052.668 m^2/g ตามลำดับ โดย 1M1W800 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดอาจเนื่องมาจากมีขนาดของรูพรุนที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมากกว่า 1M1W700 เมื่อพิจารณาจากค่า S_{micro} และ $S_{external}$ จะเห็นได้ว่าค่า S_{micro} แสดงถึงพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดไมโคร ของ 1M1W700 โดยมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 759.5739 m^2/g ซึ่งมากกว่าของ 1M1W800 (467.471 m^2/g) แต่ค่า $S_{external}$ ซึ่งแสดงถึงพื้นที่ผิวรูพรุนขนาดมีโซของ 1M1W800 มีค่าเท่ากับ 585.197 m^2/g มากกว่าของ 1M1W700 (333.938 m^2/g) โดยโมเลกุลของสีย้อมทั้งสามชนิดมีขนาดพอเหมาะกะกับขนาดรูพรุนของ 1M1W800



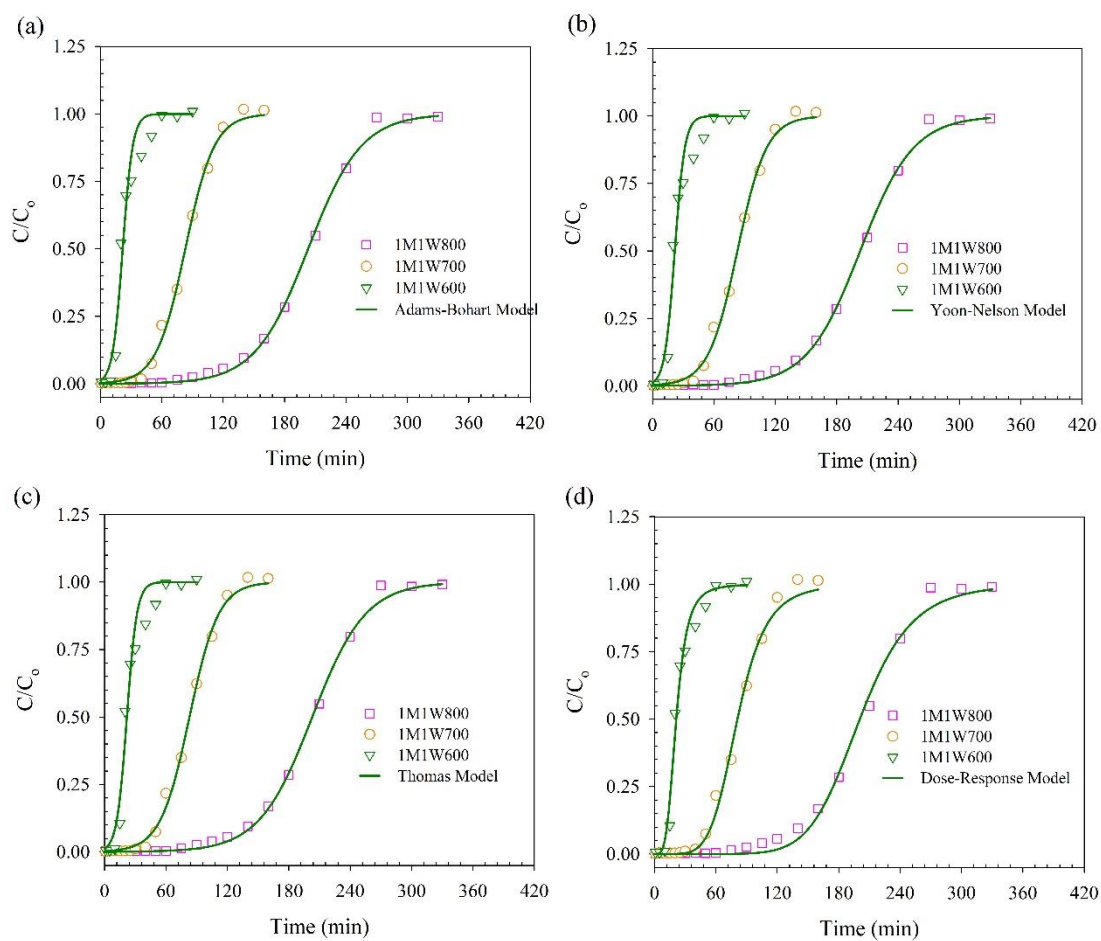
ภาพที่ 55 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 10 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Activation temperature(°C)		
		600	700	800
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	1.9515×10^{-4}	1.5986×10^{-4}	1.7786×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	34.3539	59.1946	63.5466
	R^2	0.9880	0.9981	0.9978
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	6.0606×10^{-2}	4.8851×10^{-2}	5.4467×10^{-2}
	τ (min)	69.26	121.66	130.37
	R^2	0.9880	0.9981	0.9978
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	1.9515×10^{-1}	1.5986×10^{-1}	1.7787×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	265.4740	458.8569	492.7528
	R^2	0.9880	0.9981	0.9978
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	251.6186	478.8216	485.2570
	a	3.8673	3.5520	6.9563
	R^2	0.9952	0.9971	0.99864

4.3.2.2 อุณหภูมิของการกระตุ้นที่แตกต่างกันในคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG)

จากภาพที่ 56 และตารางที่ 11 ที่ดูดซับสีย้อม MG ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน โดยผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 มีเวลาเบรคทูลเท่ากับ 14, 53 และ 142 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Bohart-Adams พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า N_0 มีค่า 10.8404, 40.1073 และ 101.7239 g/L ตามลำดับ จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า τ มีค่า 21.83, 83.02 และ 202.9929 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Thomas พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า Q_0 มีค่า 83.8533, 310.8816 และ 788.8391 mg/g ตามลำดับ จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดย มีค่าเท่ากับ 81.8863, 303.8171 และ 779.9386 mg/g ตามลำดับ



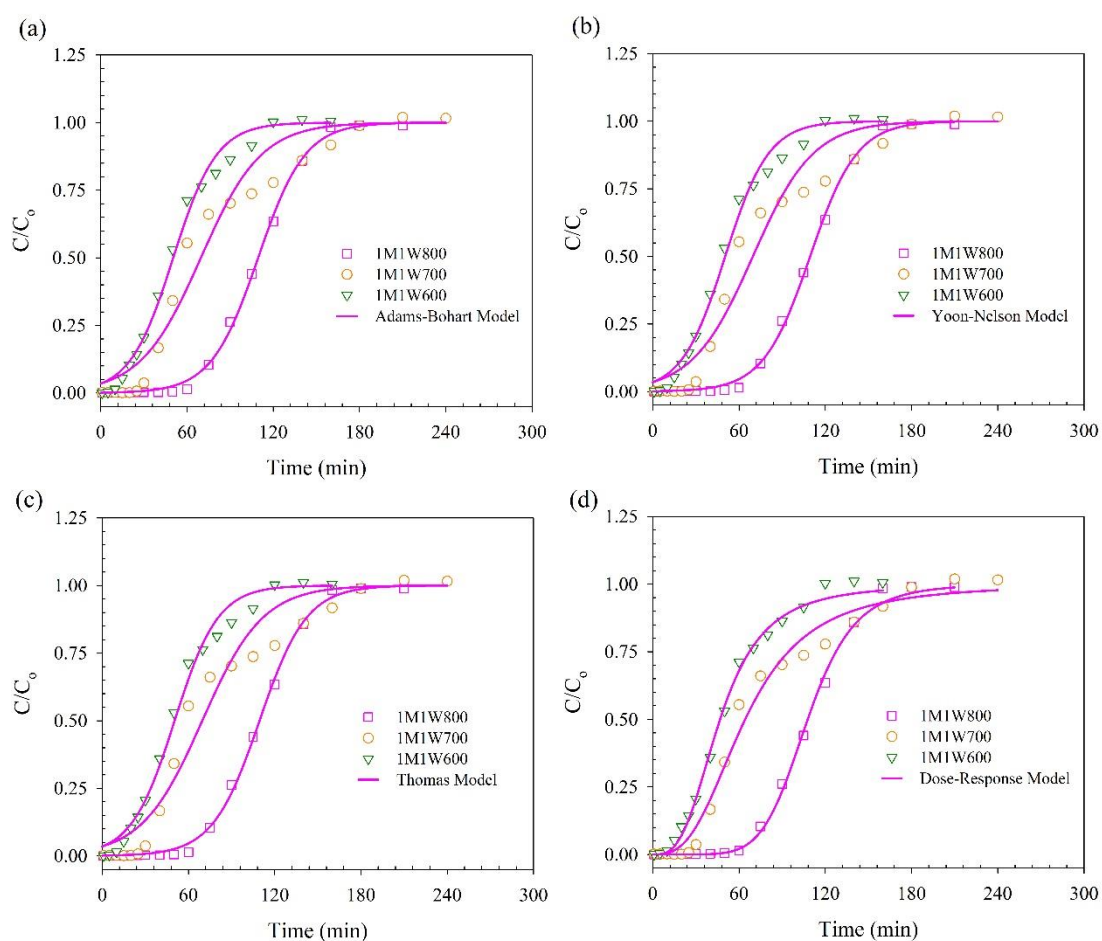
ภาพที่ 56 กราฟเบรคทูรของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 11 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Activation temperature(°C)		
		600	700	800
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	6.5559x10 ⁻⁴	2.3175x10 ⁻⁴	1.2228x10 ⁻⁴
	N_o (g L ⁻¹)	10.8408	40.1073	101.7239
	R^2	0.9692	0.9973	0.9983
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	2.0408 x10 ⁻¹	7.0314x10 ⁻²	3.8498x10 ⁻²
	τ (min)	21.83	83.02	202.9929
	R^2	0.9692	0.9973	0.9983
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	6.5559x10 ⁻¹	2.3175x10 ⁻¹	1.2228x10 ⁻¹
	Q_o (mg g ⁻¹)	83.8533	310.8816	788.8391
	R^2	0.9692	0.9973	0.9983
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	81.8863	303.8171	779.9386
	a	3.9438	5.7188	7.8925
	R^2	0.9848	0.9945	0.9951

4.3.2.3 อุณหภูมิของการกระตุ้นที่แตกต่างกันในคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB)

จากภาพที่ 57 และตารางที่ 12 ที่ดูดซับสีย้อม RhB ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน โดยผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น 1M1W600, 1M1W700 และ 1M1W800 มีเวลาเบรคทูลเท่ากับ 21, 35 และ 74 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Bohart-Adams พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า N_0 มีค่า 24.6718, 34.7633 และ 54.6579 g/L ตามลำดับ จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า τ มีค่า 50.4313, 69.6565 และ 109.48 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Thomas พบว่าอุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นพิจารณาจากค่า Q_0 มีค่า 189.3576, 266.7047 และ 429.0976 mg/g ตามลำดับ จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 175.9409, 246.2559 และ 422.5441 mg/g ตามลำดับ



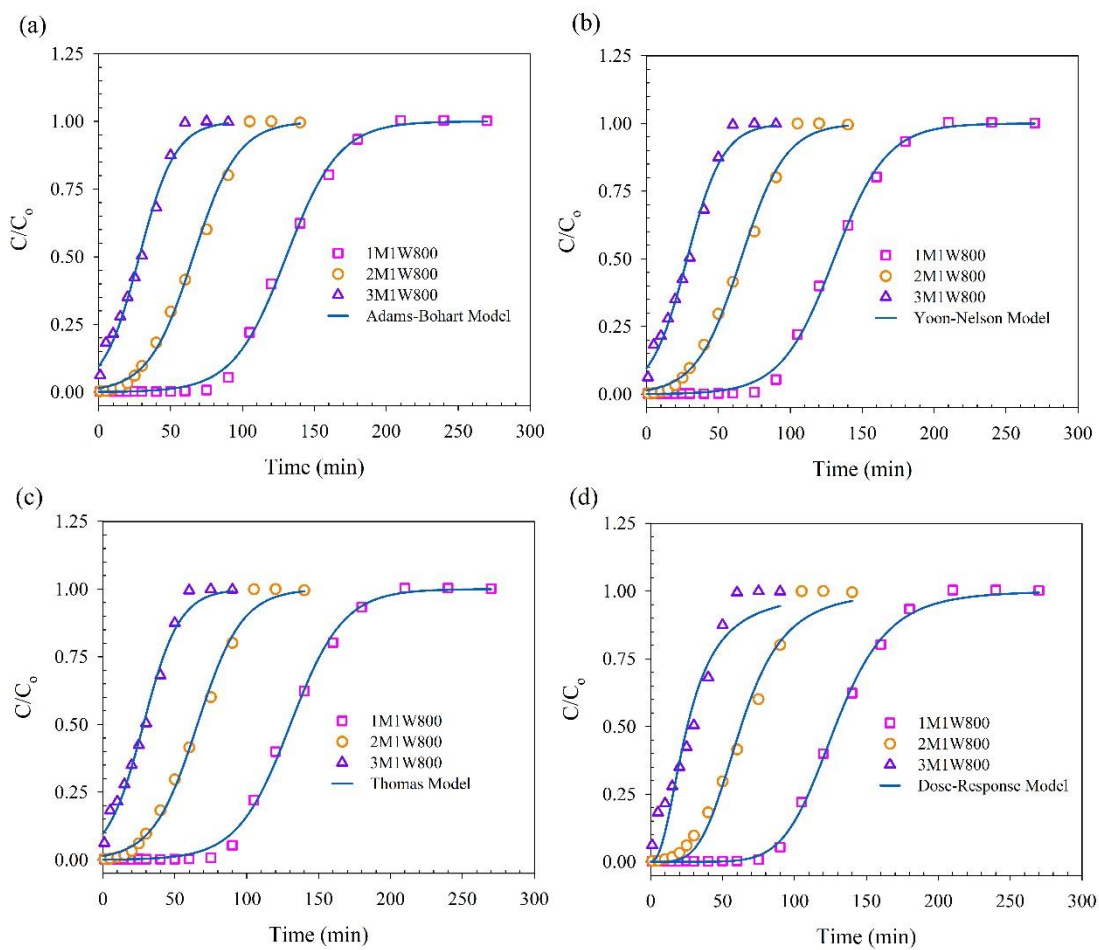
ภาพที่ 57 กราฟเบรคทูรของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB) โดยการกระตุ้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model (b) Yoon-Nelson model (c) Thomas model (d) Dose-Response model

ตารางที่ 12 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 1M1W700 และ 1M1W600 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB) โดยอุณหภูมิในการกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Activation temperature(°C)		
		600	700	800
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	2.1770×10^{-4}	1.5320×10^{-4}	1.9522×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	24.6718	34.7633	54.6579
	R^2	0.9901	0.9592	0.9986
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	6.6228×10^{-2}	4.7526×10^{-2}	6.1229×10^{-2}
	τ (min)	50.4313	69.6565	109.48
	R^2	0.9901	0.9592	0.9986
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	2.1771×10^{-1}	1.5320×10^{-1}	1.9522×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	189.3576	266.7047	429.0976
	R^2	0.9901	0.9592	0.9986
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	175.9409	246.2559	422.5441
	a	3.0393	2.8634	6.5755
	R^2	0.9958	0.9863	0.9978

4.3.2.4 ปริมาณการเจือด้วยไนโตรเจนที่แตกต่างกันในคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจนดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB)

จากภาพที่ 58 และตารางที่ 13 ที่ดูดซับสีย้อม MB ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจน โดยการแปรผันปริมาณการเจือไนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อปริมาณการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 เวลาเบรคทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 94, 30 และ 2 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Bohart-Adams พบว่าเมื่อปริมาณการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับลดลงพิจารณาจากค่า N_0 มีค่า 63.5466, 32.6045 และ 14.5589 g/L ตามลำดับ จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าปริมาณการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลงพิจารณาจากค่า τ มีค่า 130.37, 65.72 และ 28.17 นาที ตามลำดับ จากแบบจำลอง Thomas พบว่าปริมาณการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลงพิจารณาจากค่า Q_0 มีค่า 492.7528, 252.0010 และ 108.0219 mg/g ตามลำดับ จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่อปริมาณการเจือไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลงพิจารณาจากค่า Q_0 มีค่า 485.2570, 240.8603 และ 97.4472 mg/g ตามลำดับ จากการเพิ่มปริมาณเมลามีนที่เป็นแหล่งไนโตรเจน พบว่าปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhenhao Li และคณะ [74] และผลจากการทดสอบด้วยเทคนิค BET ของ 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 พบว่ามีค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด (S_{BET}) 1052.668, 465.255 และ 286.944 m²/g ตามลำดับ โดย 1M1W800 มีความสามารถในการดูดซับสูงสุด อาจเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนมากที่สุด



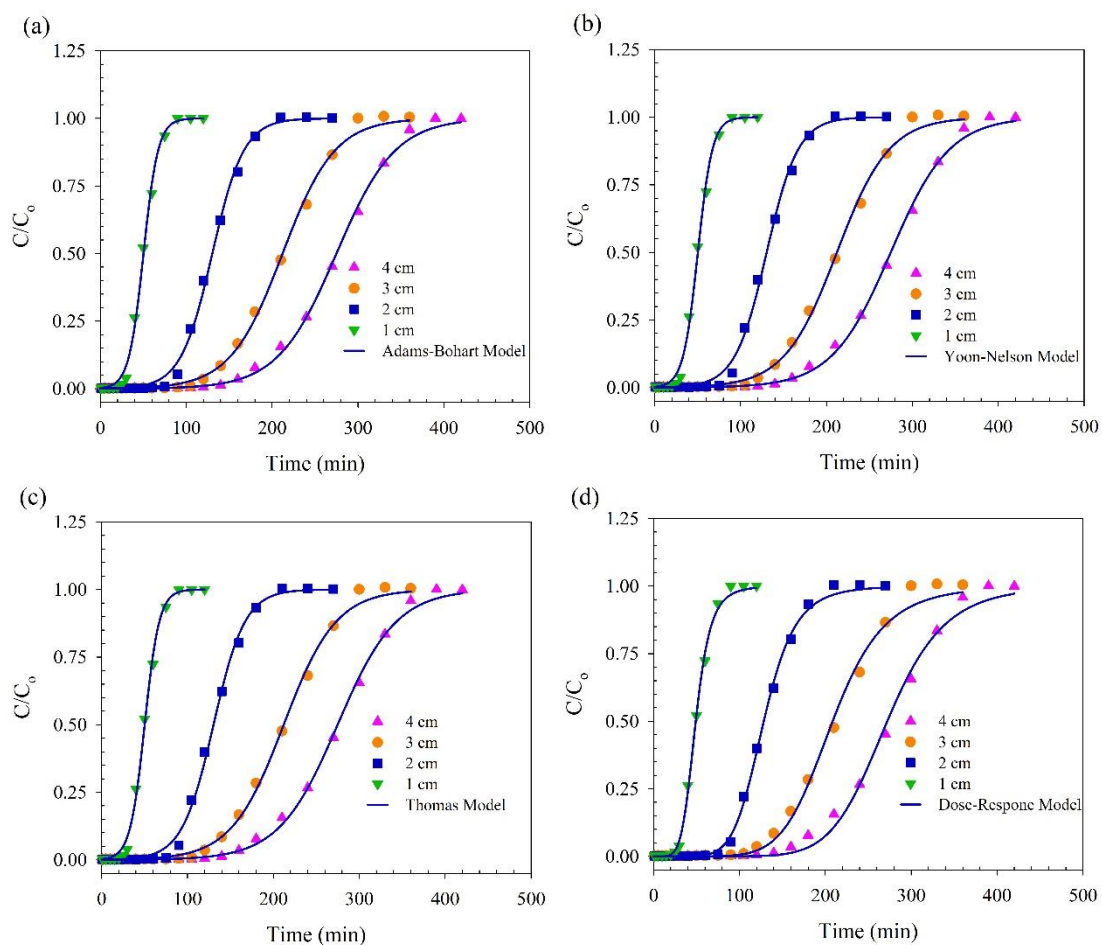
ภาพที่ 58 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อม MB โดยการแปรผันปริมาณการเจือไนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 13 ข้อมูล 4 โมเดลจาก 1M1W800, 2M1W800 และ 3M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ดูดซับสีย้อม MB โดยการแปรผันปริมาณการเจือในโตรเจนที่ต่างกัน โดยอัตราการไหลของสารละลาย 10 mL/min, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Activation temperature(°C)		
		3M1W800	2M1W800	1M1W800
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	2.5584x10 ⁻⁴	2.0768x10 ⁻⁴	1.7786x10 ⁻⁴
	N_o (g L ⁻¹)	14.5589	32.6045	63.5466
	R^2	0.9901	0.9948	0.9978
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	7.9490x10 ⁻²	6.4526x10 ⁻²	5.4467x10 ⁻²
	τ (min)	28.17	65.72	130.37
	R^2	0.9901	0.9948	0.9978
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	2.5585x10 ⁻¹	2.0768x10 ⁻¹	1.7787x10 ⁻¹
	Q_o (mg g ⁻¹)	108.0219	252.0010	492.7528
	R^2	0.9901	0.9948	0.9978
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	97.4472	240.8603	485.2570
	a	2.2412	4.0903	6.9563
	R^2	0.9573	0.9862	0.99864

4.3.2.5 ความสูงของคอลัมน์ที่แตกต่างกันของตัวดูดซับที่ดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) จากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 59 และตารางที่ 14 ที่ Bed height แตกต่างกัน 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย MB เริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรคงที่ อัตราการไหล 10 mL/min พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อ Bed height สูงขึ้น 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร เวลาเบรคทหรมีค่าเท่ากับ 33, 94, 143 และ 189 นาที ตามลำดับ เมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าน้อยลงแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง เนื่องจากที่ความสูงของ Bed height ที่มากขึ้นทำให้มีตำแหน่งว่องไวที่ว่าง (Vacant active site) มากขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Koninika Tanzim และคณะ [61] พิจารณาค่า N_0 เมื่อ Bed height สูงขึ้น พบว่าค่า N_0 มีแนวโน้มที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Vinodhini และคณะ [62] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าน้อยลง สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams จากค่า τ เมื่อ Bed height สูงขึ้น ค่า τ มีแนวโน้มที่สูงขึ้น สำหรับแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้มีการดูดซับที่มากขึ้น จึงทำให้ Q_0 มีค่ามากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] ส่วนแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] เมื่อพิจารณาค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response มีความสอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1 เซนติเมตร เป็น 2 เซนติเมตร, 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร โดยค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 28.08%, 39.17% และ 40.32% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Thomas สำหรับแบบจำลอง Dose-Response Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 28.89%, 39.79% และ 43.34% ตามลำดับ



ภาพที่ 59 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

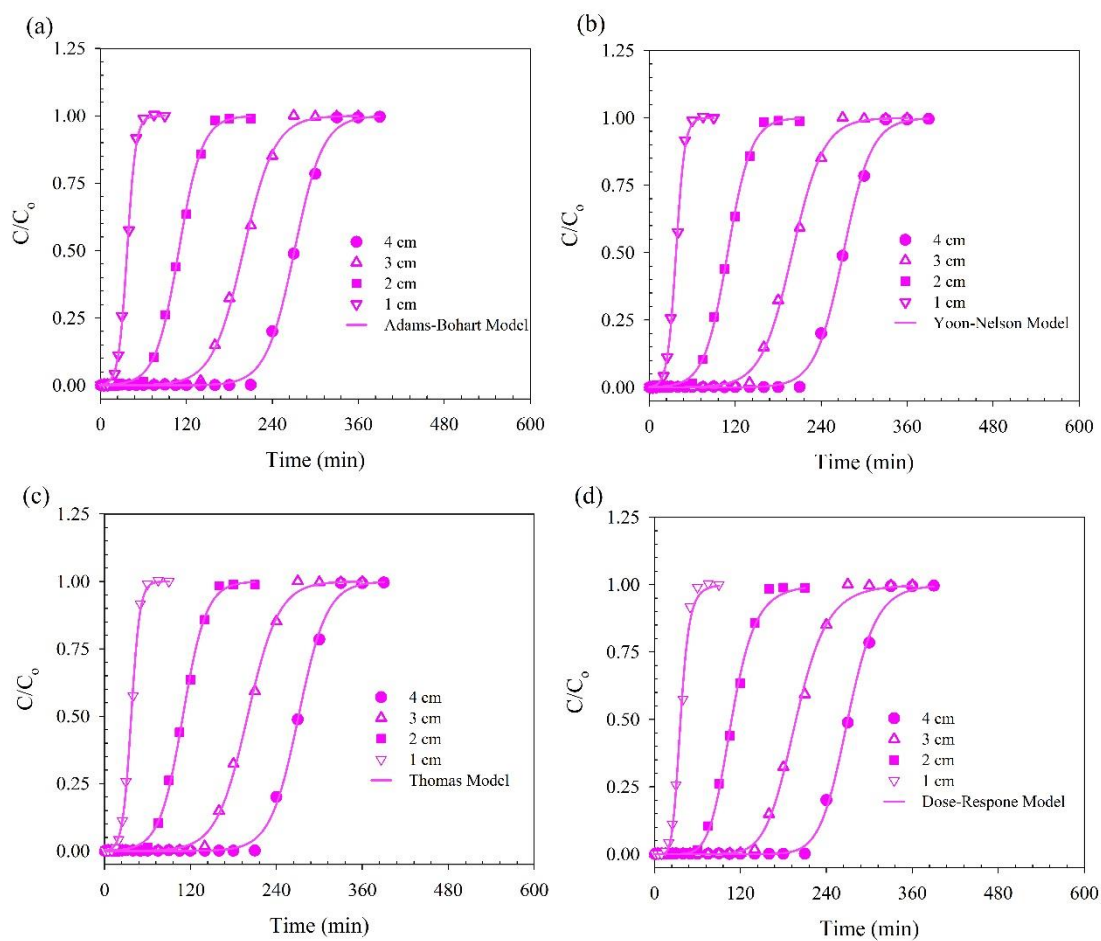
ตารางที่ 14 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Bed height (cm)			
		1	2	3	4
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	3.7717×10^{-4}	1.7786×10^{-4}	1.0587×10^{-4}	9.2153×10^{-5}
	N_o (g L ⁻¹)	49.8755	63.5466	69.4218	69.8068
	R^2	0.9973	0.9978	0.9980	0.9987
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	1.1757×10^{-1}	5.4467×10^{-2}	3.2830×10^{-2}	2.9250×10^{-2}
	τ (min)	50.25	130.3743	212.13	274.84
	R^2	0.9973	0.9978	0.9980	0.9987
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	3.7722×10^{-1}	1.7787×10^{-1}	1.0587×10^{-1}	9.2154×10^{-2}
	Q_o (mg g ⁻¹)	384.7093	492.7528	535.3823	545.2184
	R^2	0.9973	0.9978	0.9980	0.9987
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	376.5200	485.2570	526.3291	539.8313
	a	5.6314	6.9563	6.8951	8.1346
	R^2	0.9986	0.9986	0.9956	0.9959

4.3.2.6 ความสูงของคอลัมน์ที่แตกต่างกันของตัวดูดซับที่ดูดซับสีย้อมโรดามีนบี (RhB)

จากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 60 และ ตารางที่ 15 ที่ Bed height แตกต่างกัน 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย RhB เริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรคงที่ อัตราการไหล 10 mL/min พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อ Bed height ที่สูงขึ้น 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร เวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 24, 25, 153 และ 225 นาที ตามลำดับ เมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าน้อยลงแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง เนื่องจากที่ความสูงของ Bed height ที่มากขึ้นทำให้มีตำแหน่งว่องไวที่ว่าง (Vacant active site) มากขึ้น มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น จึงมีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Koninika Tanzim และคณะ [61] พิจารณาค่า N_0 เมื่อ Bed height สูงขึ้น มีค่า N_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Vinodhini และคณะ [62] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson เมื่อมีค่าน้อยลงแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams จากค่า τ เมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า τ มีแนวโน้มที่สูงขึ้น จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีมากขึ้น (Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า Q_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] จากค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response มีความสอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 2 เซนติเมตร, 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร โดยค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 52.02%, 77.15% และ 85.12% ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Thomas และ Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 53.38%, 79.62% และ 88.91% ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Dose-Response



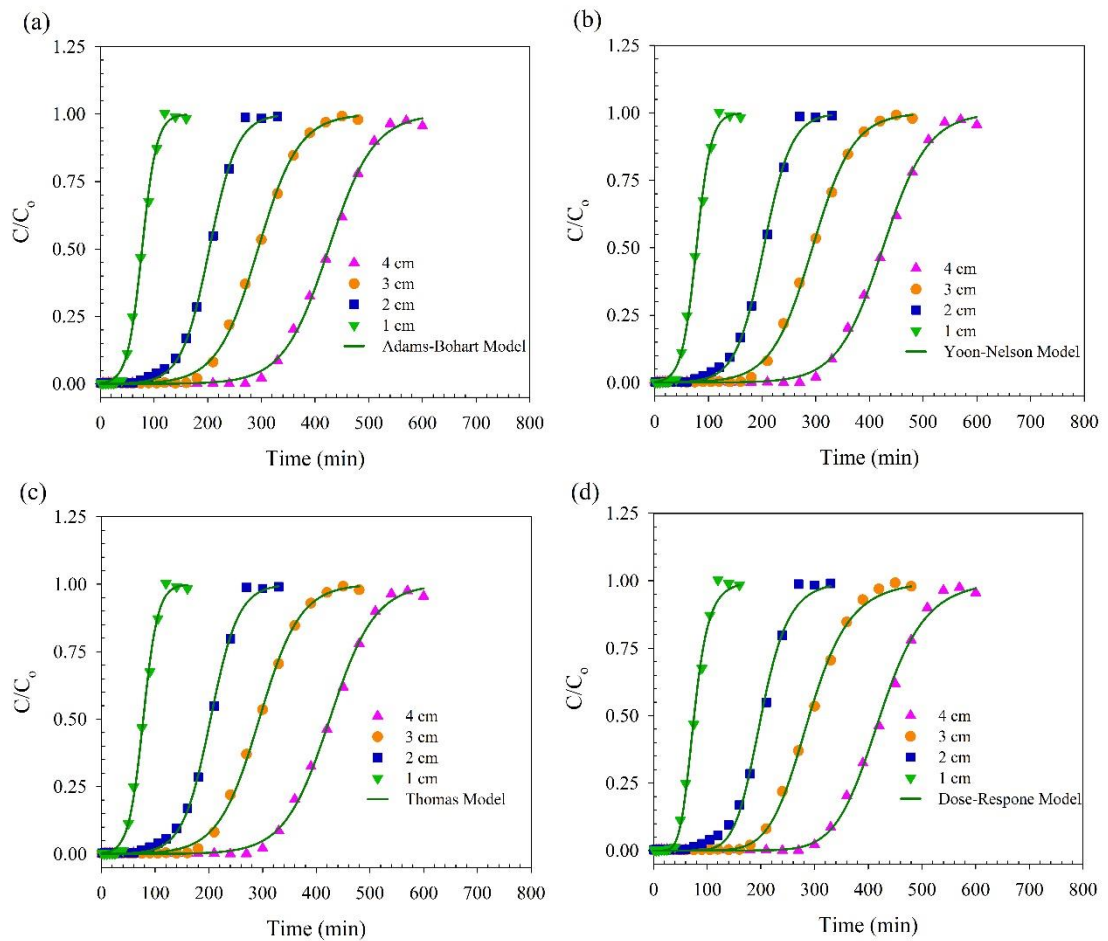
ภาพที่ 60 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 15 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Bed height (cm)			
		1	2	3	4
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	5.4123×10^{-4}	1.9521×10^{-4}	1.6332×10^{-4}	1.4938×10^{-4}
	N_o (mg L ⁻¹)	36.5886	54.6579	65.1886	66.5299
	R^2	0.9986	0.9986	0.9983	0.9983
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	1.6632×10^{-1}	6.1229×10^{-2}	5.0391×10^{-2}	4.5949×10^{-2}
	τ (min)	37.40	109.4753	199.74	270.9572
	R^2	0.9986	0.9986	0.9983	0.9983
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	5.4123×10^{-1}	1.9522×10^{-1}	1.6332×10^{-1}	1.4939×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	282.2637	429.0976	500.0239	522.5240
	R^2	0.9986	0.9986	0.9983	0.9983
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	275.4959	422.5441	494.8506	520.4313
	a	5.9901	6.5755	9.0489	13.6476
	R^2	0.9961	0.9978	0.9981	0.9981

4.3.2.7 ความสูงของคอลัมน์ที่แตกต่างกันของตัวดูดซับที่ดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) จากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 61 และตารางที่ 16 ที่ Bed height 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย MG เริ่มต้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรคงที่ และอัตราการไหล 10 mL/min พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น และเวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 48, 142, 215 และ 334 นาที ตามลำดับ เมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าน้อยลงแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง เนื่องจากที่ความสูงของ Bed height มากขึ้นทำให้มีตำแหน่งว่างไวที่ว่าง (Vacant active site) มากขึ้น มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Koninika Tanzim และคณะ [61] เมื่อพิจารณาค่า N_0 เมื่อ Bed height สูงขึ้น ค่า N_0 แนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Vinodhini และคณะ [62] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson เมื่อมีค่าน้อยลงแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่น้อยลง สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams สำหรับค่า τ เมื่อ Bed height สูงขึ้น ค่า τ แนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งมีค่า 77.72, 202.9929, 293.7974 และ 425.08 นาที ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นทำให้ปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับมากขึ้น โดยค่า Q_0 มีค่าเท่ากับ 582.3815, 788.8391, 828.4117 และ 837.9609 mg/g ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 567.1904, 779.9386, 806.3260 และ 818.4392 mg/g ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] ค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ Bed height สูงขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Bed height จาก 1 เป็น 2 เซนติเมตร, 3 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร โดยค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 35.45%, 42.25% และ 43.89% ในแบบจำลอง Thomas และ Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 37.51%, 38.45% และ 40.53% ในแบบจำลอง Dose-Response



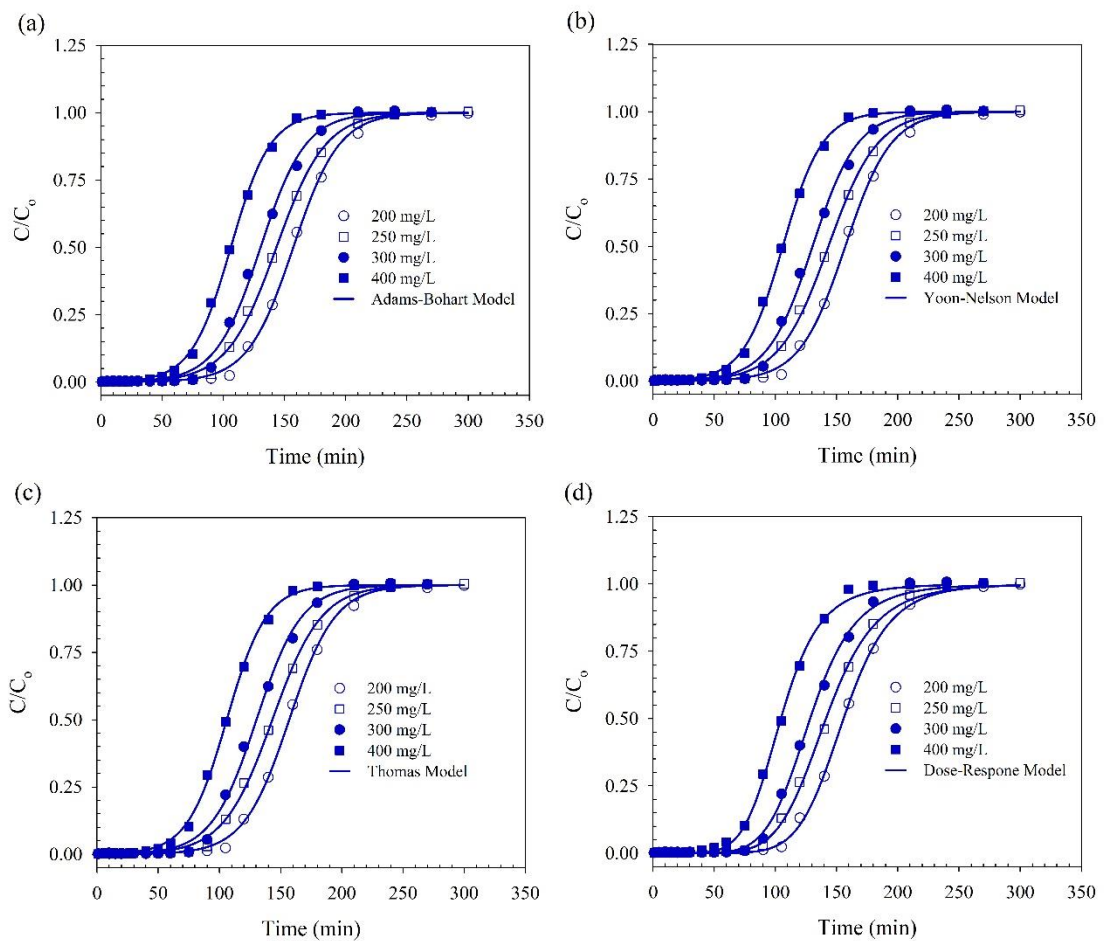
ภาพที่ 61 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 16 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความสูง 1, 2, 3 และ 4 cm (อัตราการไหล: 10 mL/min และความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Bed height (cm)			
		1	2	3	4
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	2.4167×10^{-4}	1.2228×10^{-4}	8.2819×10^{-5}	7.6322×10^{-5}
	N_o (mg L ⁻¹)	75.5094	101.7239	102.960	105.2121
	R^2	0.9969	0.9983	0.9991	0.9985
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	7.3733×10^{-2}	3.8498×10^{-2}	2.6292×10^{-2}	2.3767×10^{-2}
	τ (min)	77.72	202.9929	293.7974	425.08
	R^2	0.9969	0.9983	0.9991	0.9985
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	2.4169×10^{-1}	1.2228×10^{-1}	8.2826×10^{-2}	7.404×10^{-2}
	Q_o (mg g ⁻¹)	582.3815	788.8391	828.4117	837.9609
	R^2	0.9969	0.9983	0.9991	0.9985
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	567.1904	779.9386	806.3260	818.4392
	a	5.5286	7.8925	7.6536	10.0295
	R^2	0.9960	0.9951	0.9988	0.9981

4.3.2.8 ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) เริ่มต้นแตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 52 และตารางที่ 7 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB แตกต่างกันว่า 200, 250, 300 และ 400 mg/L โดยใช้อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 200, 250, 300 และ 400 mg/L เวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 115, 101, 94 และ 74 นาที ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้นจะมีแรงขับ (Driving force) มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Naghmeh Fallah และคณะ [66] เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า N_0 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams เมื่อพิจารณาค่า τ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า τ มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ EhsanSalehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงขับในการถ่ายโอนมวลไปยังพื้นที่ผิวดูดซับเกิดความอิ่มตัวรวดเร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] ค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response มีความสอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 200 mg/L เป็น 250 mg/L, 300 mg/L และ 400 mg/L โดยค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 14.72%, 24.31% และ 33.45% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Thomas และ Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 14.13%, 23.53% และ 32.67% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Dose-Response



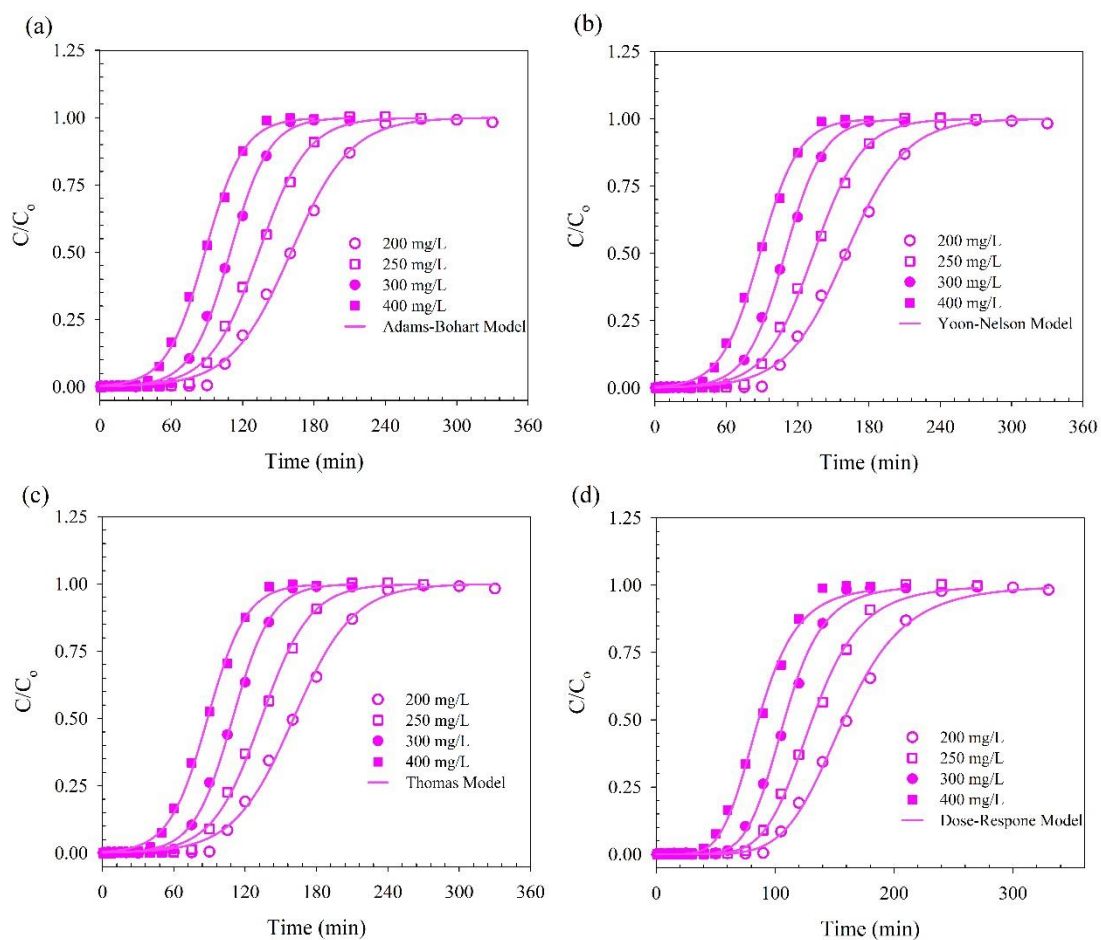
ภาพที่ 62 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 17 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Concentration(mg/L)			
		200	250	300	400
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	1.5366×10^{-4}	1.7786×10^{-4}	1.9405×10^{-4}	2.6190×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	51.1160	58.6414	63.5466	68.2285
	R^2	0.9991	0.9992	0.9978	0.9978
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	4.989×10^{-2}	5.3532×10^{-2}	5.4467×10^{-2}	6.2089×10^{-2}
	τ (min)	157.14	143.33	130.37	106.07
	R^2	0.9991	0.9992	0.9978	0.9978
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	1.5366×10^{-1}	1.7787×10^{-1}	1.9409×10^{-1}	2.6192×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	396.3996	454.7318	492.7528	529.0077
	R^2	0.9991	0.9992	0.9978	0.9993
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	392.8237	448.3373	485.2570	521.1464
	a	8.2269	6.9619	6.9563	6.5147
	R^2	0.9993	0.9991	0.9986	0.9989

4.3.2.9 ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมโรดามีนบี (RhB) เริ่มต้นแตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 63 และตารางที่ 18 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB แตกต่างกันไปเท่ากับ 200, 250, 300 และ 400 mg/L โดยใช้อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 200, 250, 300 และ 400 mg/L เวลาเบรคทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 108, 91, 74 และ 52 นาทีตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้นจะมีแรงขับ (Driving force) มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Naghme Fallah และคณะ [66] เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า N_0 มีแนวโน้มที่ลดลง พิจารณาแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams เมื่อพิจารณาค่า τ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า τ มีค่าแนวโน้มที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ehsan Salehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงขับ ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลไปยังพื้นผิวของดูดซับจึงเกิดความอิ่มตัวรวดเร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] จากค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 200 mg/L เป็น 250 mg/L, 300 mg/L และ 400 mg/L โดยค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 2.95%, 4.79% และ 9.47% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Thomas สำหรับแบบจำลอง Dose-Response Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 2.95%, 5.09% และ 8.52% ตามลำดับ



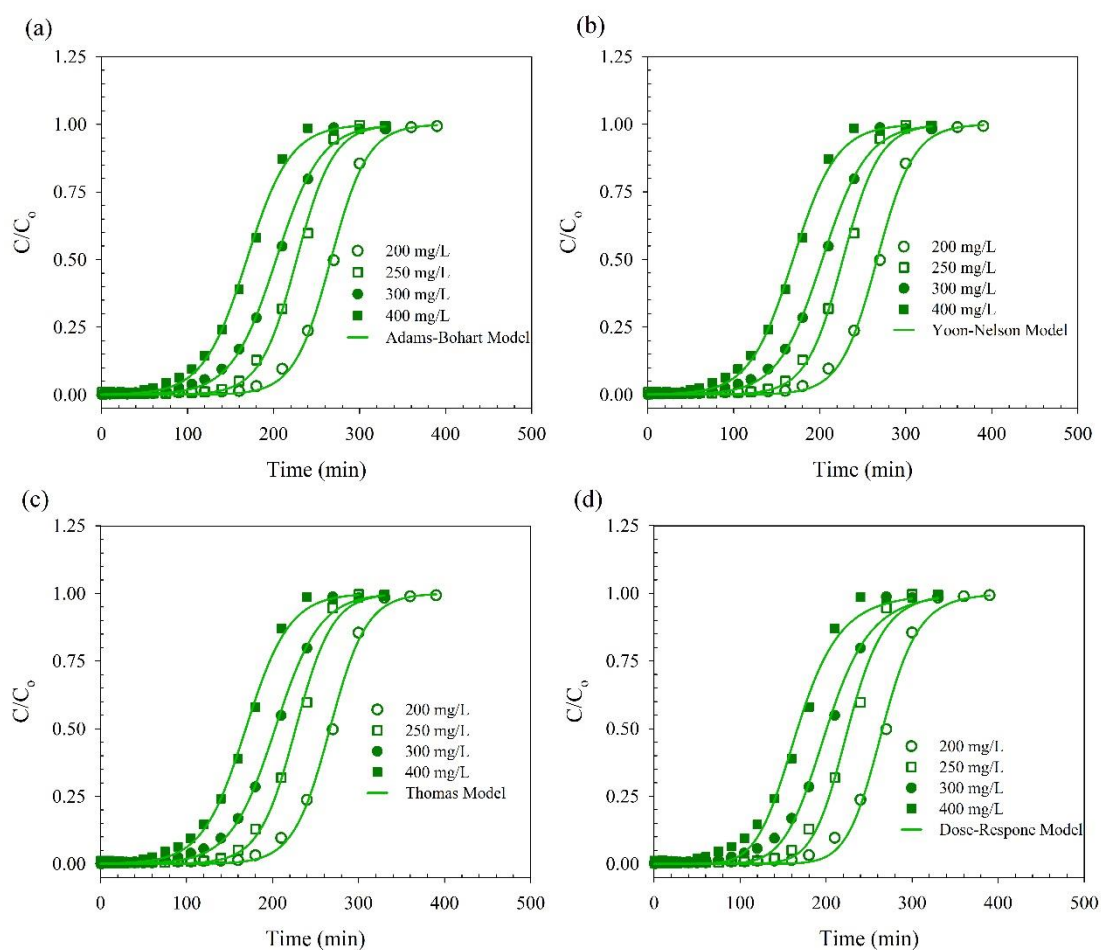
ภาพที่ 63 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น RhB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 18 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น RhB 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Concentration(mg/L)			
		200	250	300	400
Adams-Bohart	$k_{AB} \text{ (L mg}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{)}$	1.4950×10^{-4}	1.908×10^{-4}	1.9212×10^{-4}	1.9522×10^{-4}
	$N_o \text{ (g L}^{-1}\text{)}$	52.8140	54.3715	54.6579	57.8471
	R^2	0.9978	0.9981	0.9986	0.9981
Yoon–Nelson	$k_{YN} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	3.9676×10^{-2}	4.8799×10^{-2}	6.1229×10^{-2}	6.1438×10^{-2}
	$\tau \text{ (min)}$	160.65	133.55	109.48	88.40
	R^2	0.9978	0.9981	0.9986	0.9981
Thomas	$k_{TH} \text{ (mg mL}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{)}$	1.4950×10^{-1}	1.9081×10^{-1}	1.9212×10^{-1}	1.9522×10^{-1}
	$Q_o \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	409.4681	421.5625	429.0976	448.2482
	R^2	0.9978	0.9981	0.9986	0.9981
Dose-Response	$Q_o \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	402.0828	413.9476	422.5441	436.3458
	a	6.1277	6.3546	6.5755	5.2379
	R^2	0.9977	0.9978	0.9978	0.9964

4.3.2.10 ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาลาโคท์กรีน (MG) เริ่มต้นแตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 64 และตารางที่ 19 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG แตกต่างกันว่า 200, 250, 300 และ 400 mg/L โดยใช้อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น 200, 250, 300 และ 400 mg/L พบว่าเวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 108, 91, 74 และ 52 นาที ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้นจะมีแรงขับ (Driving force) มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Naghmeh Fallah และคณะ [66] เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า N_0 มีแนวโน้มที่ลดลง จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams เมื่อพิจารณาค่า τ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า τ มีแนวโน้มที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ehsan Salehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่า 640.5947, 703.5486, 779.9386 และ 859.0379 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงขับ ทำให้การถ่ายโอนมวลไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดความอิ่มตัวรวดเร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yunhui Zhang และคณะ [64] ค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 200 mg/L เป็น 250 mg/L, 300 mg/L และ 400 mg/L โดย Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 10.08%, 22.68% และ 32.84% ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Thomas ในขณะที่ Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 9.83%, 21.75% และ 34.1% ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Dose-Response



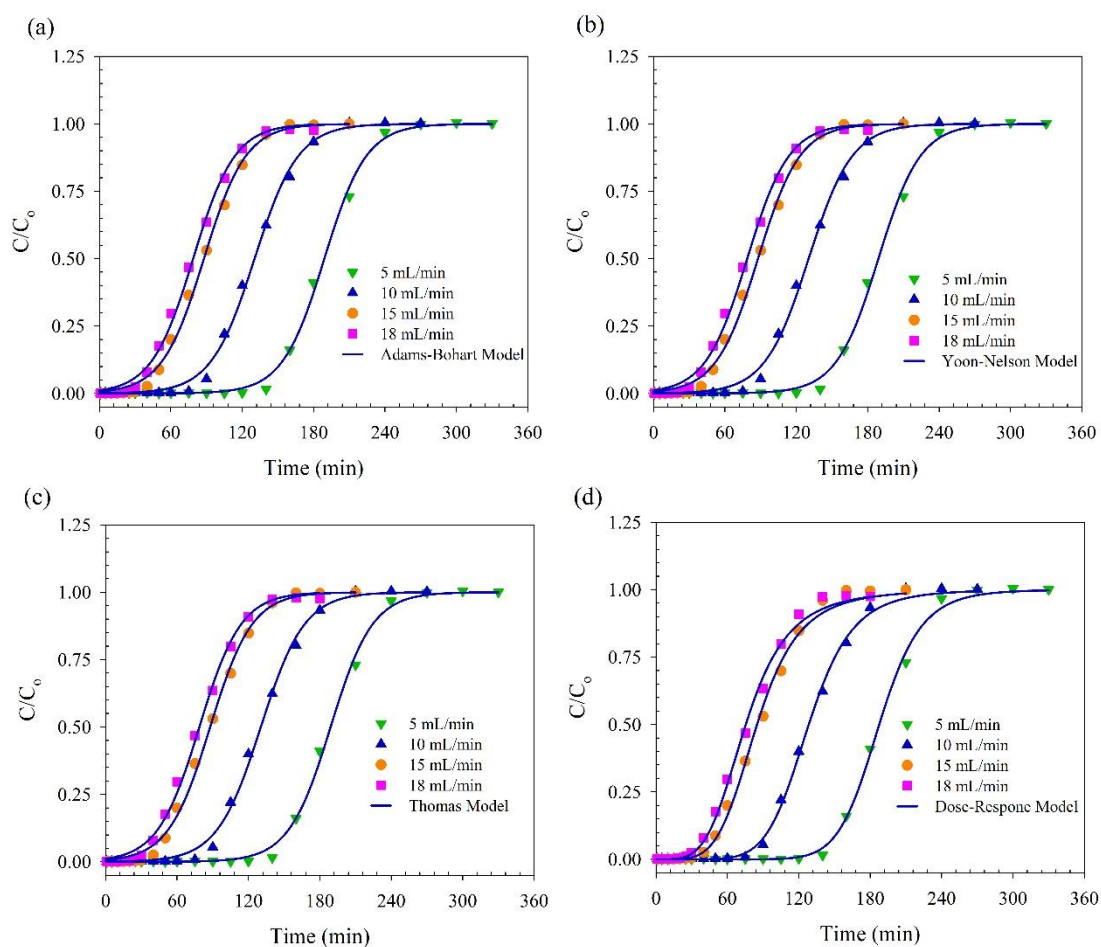
ภาพที่ 64 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MG 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 19 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น MG 200, 250, 300 และ 400 mg/L (อัตราการไหล 10 mL/min และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon–Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Concentration(mg/L)			
		200	250	300	400
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	9.4659×10^{-5}	1.2228×10^{-4}	1.8574×10^{-4}	2.2693×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	87.5035	91.2660	101.7239	112.1889
	R^2	0.9981	0.9981	0.9983	0.9977
Yoon–Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	3.8498×10^{-2}	3.9495×10^{-2}	4.6798×10^{-2}	4.6955×10^{-2}
	τ (min)	266.6569	226.8609	202.9929	168.9173
	R^2	0.9981	0.9981	0.9983	0.9977
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	9.640×10^{-2}	1.2228×10^{-1}	1.8576×10^{-1}	2.3378×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	642.9807	707.7775	788.8391	854.1311
	R^2	0.9981	0.9965	0.9983	0.9977
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	640.5947	703.5486	779.9386	859.0379
	a	12.6764	10.7641	7.8925	6.7318
	R^2	0.9966	0.9942	0.9951	0.9928

4.3.2.11 อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) ที่แตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 65 และตารางที่ 20 ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 5, 10, 15 และ 18 mL/min พบว่าเวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 151, 93, 51 และ 42 นาที ตามลำดับ สำหรับค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] และค่า N_0 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย Ehsan Salehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} เพิ่มขึ้น ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson เมื่อมีค่า k_{YN} เพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams โดยที่อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า τ มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 238.5895, 130.37, 95.49 และ 78.72696 นาที ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับแบบจำลอง Dose-Response พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 446.5334, 485.2570, 548.1960 และ 549.4645 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลาย จะทำให้มีแรงขับของโมเลกุลของสารเข้าไปในตัวดูดซับได้มากขึ้น รวมถึงความแตกต่างบริเวณผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของสีย้อมที่มีความเข้มข้นที่ต่างกัน จึงช่วยผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้น [75] จากค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5 mL/min เป็น 10 mL/min, 15 mL/min และ 18 mL/min ค่า Q_0 เพิ่มขึ้น 7.13%, 19.21% และ 21.40% ตามลำดับ สำหรับแบบจำลอง Thomas ในขณะที่แบบจำลอง Dose-Response Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 8.67%, 22.77% และ 23.05% ตามลำดับ



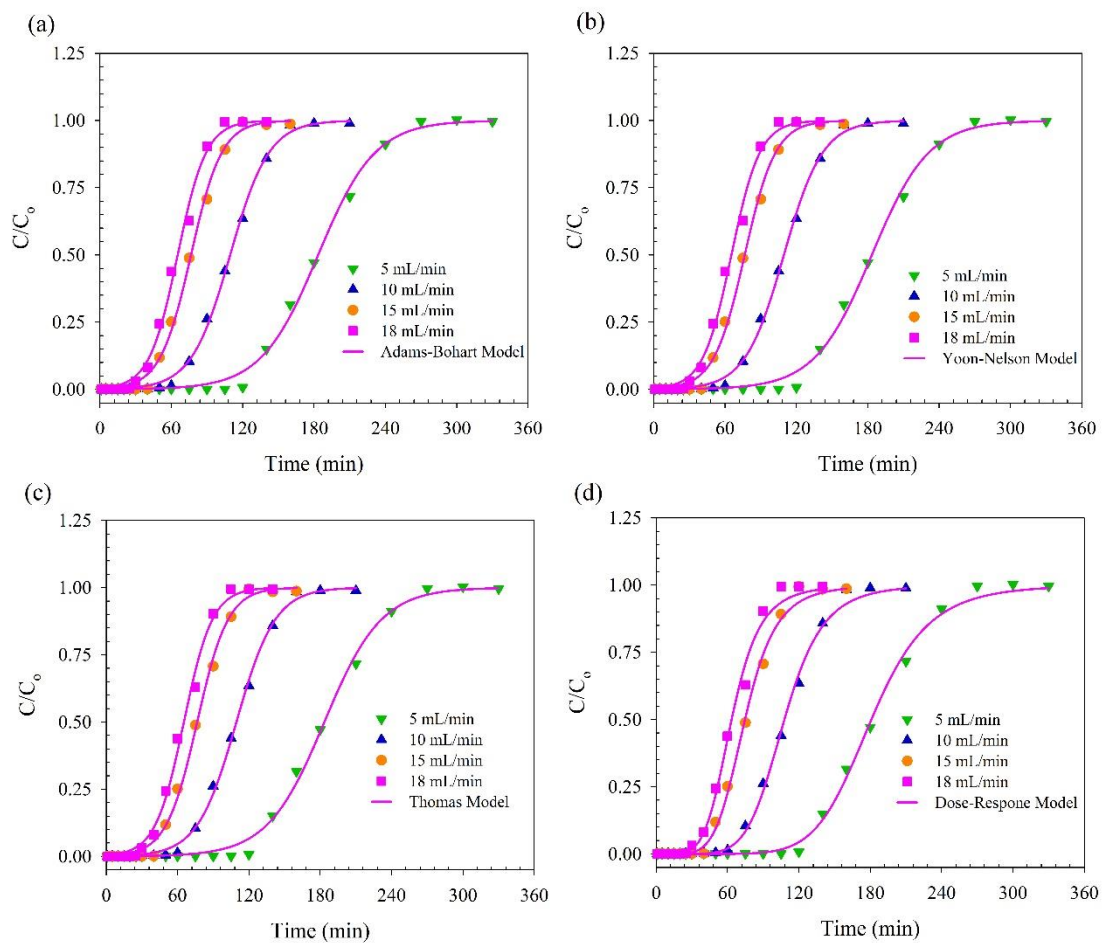
ภาพที่ 65 กราฟเบรคทรูของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 20 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Flow rate (mL/min)			
		5	10	15	18
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	7.5655×10^{-5}	1.7786×10^{-4}	1.803×10^{-4}	1.8084×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	59.2760	63.5466	71.1929	71.2859
	R^2	0.9978	0.9978	0.9918	0.9969
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	2.3606×10^{-2}	3.9816×10^{-2}	5.4467×10^{-2}	5.7017×10^{-2}
	τ (min)	238.5895	130.37	95.49	78.72696
	R^2	0.9978	0.9978	0.9918	0.9969
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	7.5569×10^{-2}	1.2837×10^{-1}	1.7787×10^{-1}	1.8084×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	459.9393	492.7528	548.3093	558.3489
	R^2	0.9936	0.9978	0.9918	0.9969
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	446.5334	485.2570	548.1960	549.4645
	a	5.3855	6.9563	3.4118	4.1598
	R^2	0.9951	0.9986	0.9924	0.9974

4.3.2.11 อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมโรดามีนบี (RhB) ที่แตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 66 และ ตารางที่ 21 ที่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 5, 10, 15 และ 18 mL/min โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของโรดามีนบี (RhB) 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่าทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น 5, 10, 15 และ 18 mL/min พบว่าเวลาเบรคทรมีค่าเท่ากับ 132, 74, 48 และ 33 นาที ตามลำดับ สำหรับค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] และ N_0 มีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย Ehsan Salehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson เมื่อมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams โดยที่อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า τ มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 183.45, 109.48, 65.33782 และ 65.33782 นาที ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีค่าลดลง สำหรับแบบจำลอง Dose-Response พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า Q_0 มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 343.6825, 422.5441, 426.6120 และ 428.6852 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้มีแรงขับของโมเลกุลของสีย้อมเข้าไปในตัวดูดซับได้มากขึ้น รวมถึงความแตกต่างบริเวณผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของสีย้อมมีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน จึงช่วยผลักดันให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้น [75] ค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5 mL/min เป็น 7.5 mL/min, 10 mL/min และ 15 mL/min Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 23.15%, 25.56% และ 26.68% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Thomas และในแบบจำลอง Dose-Response Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 22.905%, 24.13% และ 24.73% ตามลำดับ



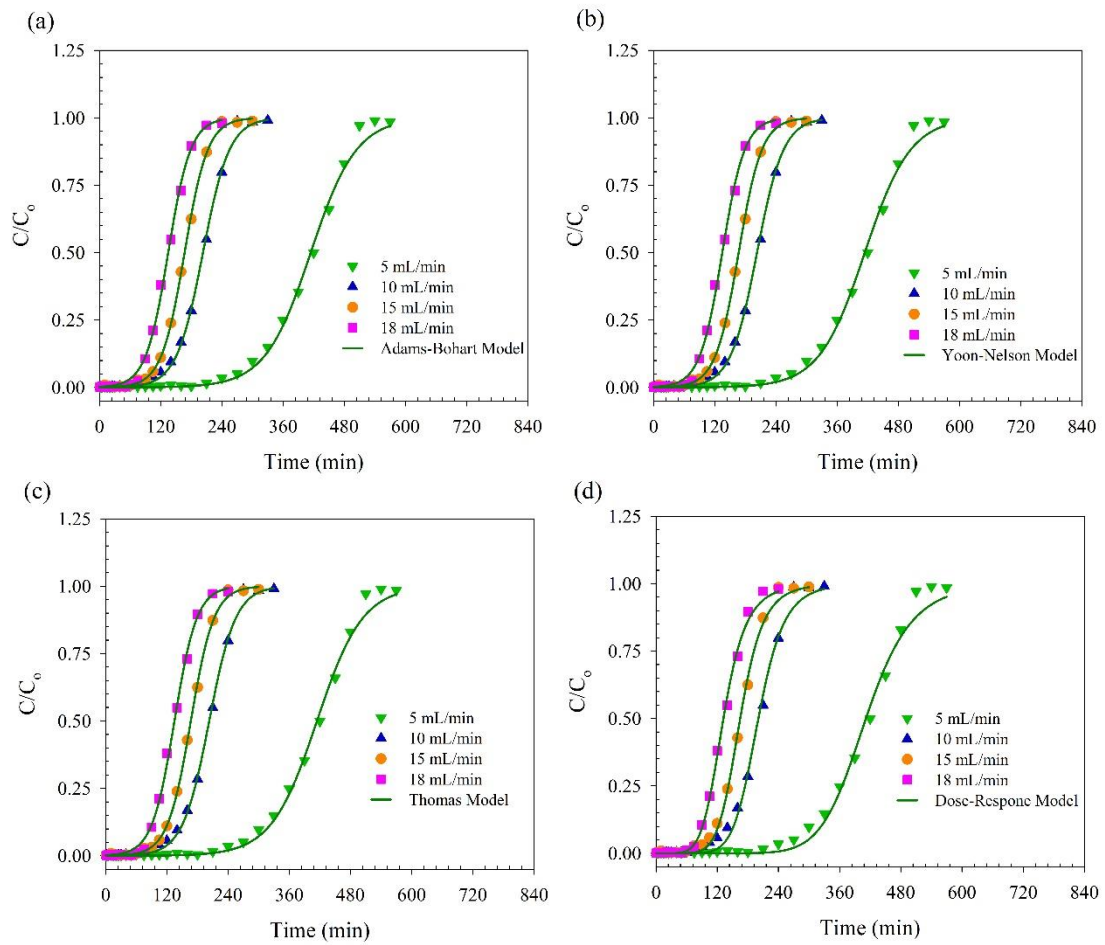
ภาพที่ 66 กราฟเบรคทูรของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการใช้ของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 21 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RhB 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Flow rate (mL/min)			
		5	10	15	18
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	1.3555×10^{-4}	1.9522×10^{-4}	2.4944×10^{-4}	2.7457×10^{-4}
	N_o (g L ⁻¹)	44.9312	54.6579	56.4373	56.9629
	R^2	0.9973	0.9986	0.9971	0.9958
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	4.1718×10^{-2}	6.1229×10^{-2}	7.7029×10^{-2}	8.3492×10^{-2}
	τ (min)	183.45	109.48	76.52	65.33782
	R^2	0.9973	0.9986	0.9971	0.9958
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	1.3555×10^{-1}	1.9522×10^{-1}	2.4944×10^{-1}	2.7457×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	348.4253	429.0976	437.47341	441.40745
	R^2	0.9973	0.9986	0.9971	0.9958
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	343.6825	422.5441	426.6120	428.6852
	a	7.4955	6.5755	5.6527	5.3040
	R^2	0.9977	0.9978	0.9972	0.9949

4.3.2.12 อัตราการไหลของสารละลายสีย้อมมาลาไคท์กรีน (MG) ที่แตกต่างกันที่ถูกดูดซับจากคาร์บอนกัมมันต์ผ่านการเจือด้วยไนโตรเจน

จากภาพที่ 67 และตารางที่ 22 ที่อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 5, 10, 15 และ 18 mL/min โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของมาลาไคท์กรีน (MG) 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm พบว่า ทั้ง 4 แบบจำลอง Bohart-Adams, Thomas, Yoon-Nelson และ Dose-Response มีค่า $R^2 > 0.95$ แสดงถึงความเหมาะสมในการอธิบายลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น เวลาเบรคทรมีค่าลดลงโดยเท่ากับ 364, 141, 117 และ 79 นาที ตามลำดับ สำหรับค่า k_{AB} ในแบบจำลอง Bohart-Adams มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงอัตราเร็วในการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] และค่า N_0 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น 97.9820, 101.7239, 119.5332 และ 123.9464 g/L ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัย Ehsan Salehi และคณะ [67] จากแบบจำลอง Yoon-Nelson พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า k_{YN} ในแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีการถ่ายโอนมวลที่มากขึ้น สอดคล้องกับแบบจำลอง Bohart-Adams โดยเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่า τ มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 414.29, 202.9929, 166.96 และ 134.85 นาที ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Teck Nam Ang และคณะ [63] จากแบบจำลอง Thomas พบว่าเมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า Q_0 มีค่าลดลง โดยจากแบบจำลอง Dose-Response พบว่าอัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นค่า Q_0 มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 754.9700, 779.9386, 916.3180 และ 942.2505 mg/g ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้มีแรงขับของโมเลกุลของสารเข้าไปในตัวดูดซับได้มากขึ้น และความเข้มข้นที่ความแตกต่างบริเวณผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของสีย้อม จึงช่วยให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้น [75] ค่า Q_0 ในแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Dose-Response สอดคล้องกัน พบว่าเมื่อ อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5 mL/min เป็น 7.5 mL/min, 10 mL/min และ 15 mL/min ค่า Q_0 เพิ่มขึ้นคิดเป็น 3.81%, 21.99% และ 26.46% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Thomas และ Q_0 มีค่าเพิ่มขึ้น 3.31%, 21.37% และ 24.81% ตามลำดับ ในแบบจำลอง Dose-Response



ภาพที่ 67 กราฟเบรคทูร์ของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) (a) Adams-Bohart model, (b) Yoon-Nelson model, (c) Thomas model และ (d) Dose-Response model

ตารางที่ 22 ข้อมูลของ 4 โมเดลจาก 1M1W800 ใน Fixed-bed column ที่อัตราการไหลของสารละลาย 5, 10, 15 และ 18 mL/min (ความเข้มข้นเริ่มต้นของ MG 300 mg/L และที่ความสูง 2 cm) ของ Adams-Bohart model, Yoon-Nelson model, Thomas model และ Dose-Response model

Model	Parameter	Flow rate (mL/min)			
		5	10	15	18
Adams-Bohart	k_{AB} (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	7.5113×10^{-5}	1.2228×10^{-4}	1.4665×10^{-4}	1.4945×10^{-4}
	N_o (mg L ⁻¹)	97.9820	101.7239	119.5332	123.9464
	R^2	0.9948	0.9983	0.9996	0.9979
Yoon-Nelson	k_{YN} (min ⁻¹)	2.2323×10^{-2}	3.8498×10^{-2}	4.3974×10^{-2}	4.5525×10^{-2}
	τ (min)	414.29	202.9929	166.96	134.85
	R^2	0.9948	0.9983	0.9996	0.9979
Thomas	k_{TH} (mg mL ⁻¹ min ⁻¹)	7.5113×10^{-2}	1.2228×10^{-1}	1.4665×10^{-1}	1.4945×10^{-1}
	Q_o (mg g ⁻¹)	759.8517	788.8391	926.9069	960.8785
	R^2	0.9948	0.9983	0.9996	0.9979
Dose-Response	Q_o (mg g ⁻¹)	754.9700	779.9386	916.3180	942.2505
	a	9.1439	7.8925	7.2833	5.9124
	R^2	0.9902	0.9951	0.9979	0.9980

บทที่ 5

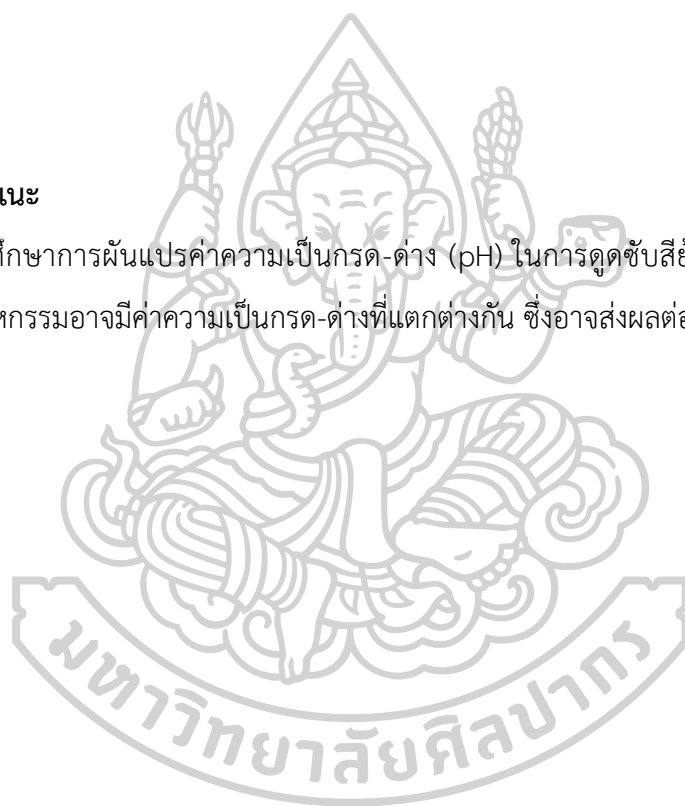
สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของการดูดซับของสีย้อมในสารละลายโดยใช้คาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับในระบบต่อเนื่อง ปรากฏว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวามีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่าคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวา เนื่องจากการเจือด้วยไนโตรเจนจะทำให้มีรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และหมู่ฟังก์ชัน ที่พื้นผิวมากขึ้นจากการที่อะตอมไนโตรเจนได้เข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอน ทำให้ส่วนไม่เป็นระเบียบมากขึ้น และส่วนที่เป็นรูพรุนขนาดมีโซมีมากขึ้นด้วย หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นยังเป็นตัวช่วยในการดูดซับเชิงกายภาพกับสีย้อมทั้งสามชนิด จากกระบวนการเตรียมคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวา พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นยิ่งสูงขึ้นความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวของรูพรุนระดับมีโซมีค่ามากขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงทำให้เมลามีนสลายตัวเป็นแก๊สแอมโมเนียได้มากขึ้น ส่วนที่เป็นรูพรุนระดับมีโซจึงมากขึ้นด้วย จากผลของปริมาณเมลามีนที่ใช้ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเมลามีนมากเกินไปทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมลดลง เนื่องจากส่วนเมลามีนที่มากเกินไป สามารถเกิดคาร์บอนเข้าไปปิดกั้นหรืออุดรูพรุนของเมทริกซ์คาร์บอน ทำให้ความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวลดลง การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ คือ ความสูงของเบตตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมและอัตราการไหลของสารละลายสีย้อมในคอลัมน์ จากการศึกษาการทำนายประสิทธิภาพโดยทำ Model fitting โดยใช้โมเดลของ Bohart-adam, Thomas, Yoon-nelson และ Dose-Response model เพื่อช่วยอธิบายความสามารถในการดูดซับสารละลายของคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวาสามารถอธิบายการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ ($R^2 > 0.95$) ผลของความสูงของเบตตัวดูดซับ พบว่าเมื่อความสูงของเบตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของตัวดูดซับที่มากขึ้น และพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น ส่วนผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมทำให้การดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมากขึ้น จะมีแรงขับที่มาก ทำให้เกิดการแพร่ได้มากขึ้น ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมากเกินไปพบว่ามีค่าการดูดซับลดลง อาจเป็นเพราะโมเลกุลของสีย้อมมีปริมาณมากเกินไปกับการดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับอิ่มตัวเร็วขึ้น ในขณะที่ผลของอัตราการไหลของสารละลายในคอลัมน์พบว่าที่อัตราการไหลของสารละลายในคอลัมน์มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับมากขึ้น อาจมาจาก

แรงขับที่มากขึ้นและความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างผิวของตัวดูดซับและสารละลายทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้มากขึ้น แต่เมื่อให้อัตราการไหลของสารละลายที่มากเกินไปมีค่าการดูดซับลดลงเนื่องจากเวลาที่อยู่ในคอลัมน์นานขึ้นทำให้มีเวลาเพียงพอในการเกิดการดูดซับและสัมผัสกันระหว่างตัวดูดซับกับสารละลายสีย้อม และสีที่ถูกดูดซับมากที่สุดคือ MG รองลงมาคือ MB และ RhB ตามลำดับ เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสีย้อม MG มีขนาดเหมาะสมที่สุด ในขณะที่ MB มีขนาดโมเลกุลเล็กเล็ก ส่วน RhB มีขนาดโมเลกุลใหญ่เกินไปสำหรับตัวดูดซับที่เตรียมได้ ดังนั้นตัวดูดซับคาร์บอนที่มีรูพรุนแบบมีโซเจือด้วยไนโตรเจนที่เตรียมจากผักตบชวาที่เหมาะสมในการทดลองนี้ คือ 1M1W800

5.1 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาการผันแปรค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในการดูดซับสีย้อม เนื่องจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้

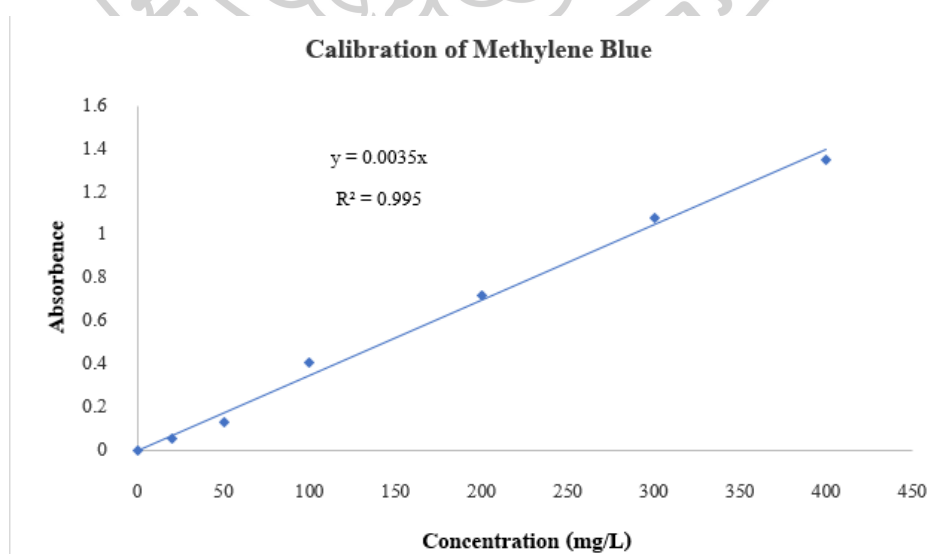


ภาพผนวก ก

กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายเมทิลีนบลู ซึ่งใช้เทียบหาค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ โดยค่าดูดกลืนแสงจะพิจารณาที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร

ตารางที่ 23 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารเมทิลีนบลู

ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลู (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0
20	0.01961
50	0.058375
100	0.11751
200	0.24071
300	0.370135
400	0.488035



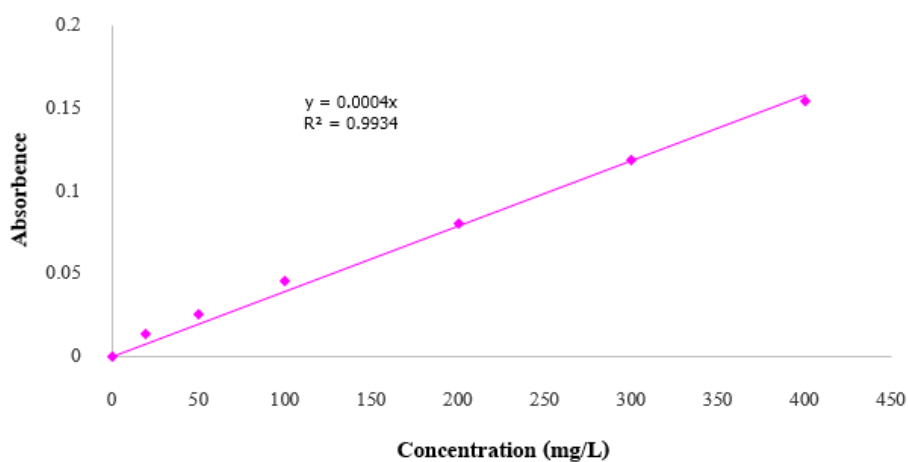
ภาพที่ 68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Methylene blue (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายโรดามีนบี ซึ่งใช้เทียบหาค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ โดยค่าดูดกลืนแสงจะพิจารณาที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร

ตารางที่ 24 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารโรดามีนบี

ความเข้มข้นของสารละลายโรดามีนบี (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0
20	0.014205
50	0.02613
100	0.045725
200	0.080125
300	0.1191
400	0.154725

Calibration of Rhodamine B



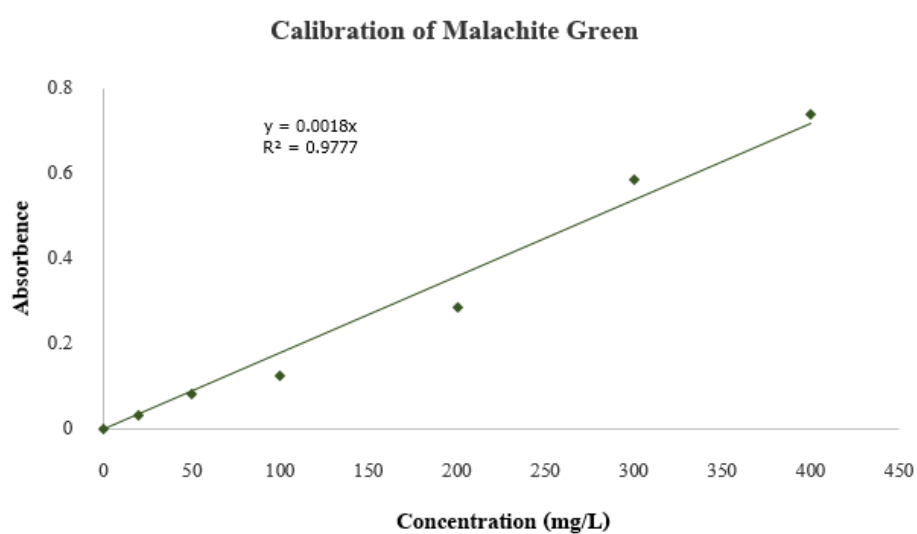
ภาพที่ 69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Rhodamine B (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายมาลาไคท์กรีน ซึ่งใช้เทียบ
หาค่าความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่เวลาใด ๆ โดยค่าดูดกลืนแสงจะพิจารณาที่ความยาว
คลื่น 617 นาโนเมตร

ตารางที่ 25 ค่าความเข้มข้นที่ใช้เทียบมาตรฐานและค่าการดูดกลืนแสงของสารมาลาไคท์กรีน

ความเข้มข้นของสารละลายโรดามีนบี (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0
20	0.031085
50	0.081805
100	0.123145
200	0.285945
300	0.586175
400	0.73892

i



ภาพที่ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลาย Malachite green (mg/L) กับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างคำนวณเกี่ยวกับงานวิจัย

การคำนวณเกี่ยวกับผลการดูดซับสารละลาย Methylene blue ความเข้มข้น 300 mg/L ที่ความสูงของ Bed height 2 cm ที่อัตราการไหล 10 mL/min โดยใช้ตัวดูดซับ 0.8102 g

$$V_{\text{eff}} = Qt_{\text{total}}$$

V_{eff} คือ ปริมาตร (L)

Q คือ อัตราการไหล (L/h)

t_{total} คือ เวลาทั้งหมด (h)

$$V_{\text{eff}} = (0.6 \text{ L/h})(4.5 \text{ h})$$

$$V_{\text{eff}} = 2.7 \text{ L}$$

Fixed-bed capacity (สีย้อมทั้งหมดที่ถูกดูดซับ)

$$q_c = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=\text{total}} C_{\text{ad}} dt$$

$$C_{\text{ad}} = C_0 - C_t$$

q_c คือ ความสามารถในการดูดซับที่เวลาเริ่มต้นถึงใดๆ (mg)

C_{ad} คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นเริ่มถึงเวลาใดๆ (mg/L)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C_t คือ ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (mg/L)

$$q_c = \frac{0.6}{1000} \int_{t=0}^{t=90} 300 \, dt$$

$$q_c = 16.2 \, \text{mg}$$

ปริมาณสีทั้งหมดที่เข้าคอลัมน์ (Total amount of dye entering the column)

$$q_{\text{total}} = \frac{C_0 Q_{t_{\text{total}}}}{1000}$$

q_{total} คือ ความสามารถในการดูดซับทั้งหมด (mg)

$$q_{\text{total}} = \frac{300(0.6)(270)}{1000}$$

$$q_{\text{total}} = 48.6 \, \text{mg}$$

เปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสีทั้งหมด (Total dye removal percentage)

$$R(\%) = \frac{q_c}{q_{\text{total}}} \times 100$$

$R(\%)$ คือ ความสามารถในการดูดซับออก(%)

$$R(\%) = \frac{16.2}{48.6} \times 100$$

$$R(\%) = 33.33 \, \%$$

ภาคผนวก ค

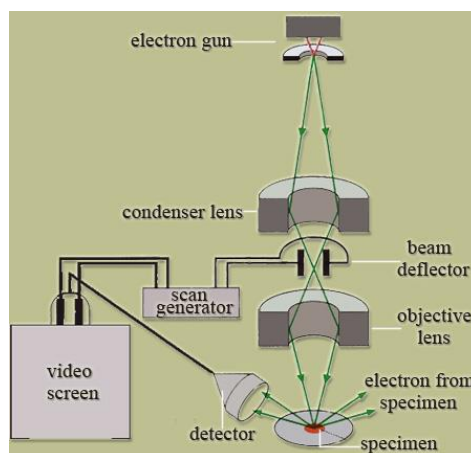
เครื่องมือและวิธีการตรวจสอบเอกลักษณ์ที่เกี่ยวข้อง

1. เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) [76]



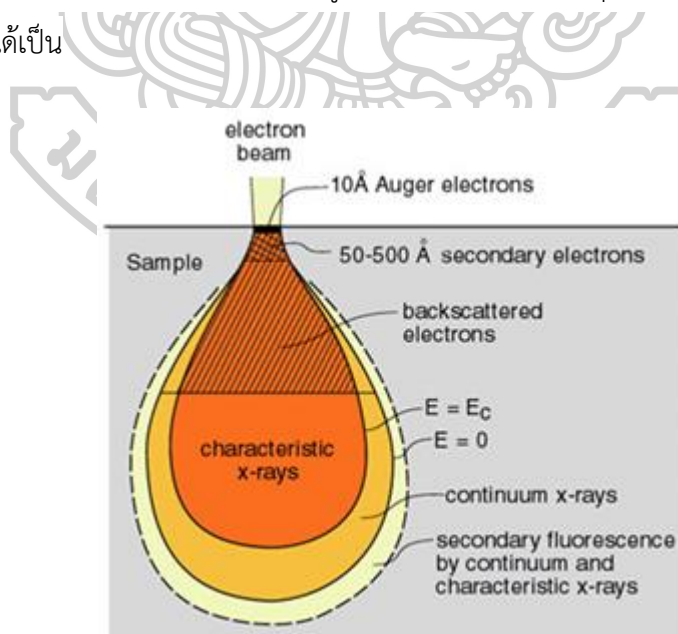
ภาพที่ 71 เครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะสัณฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดาที่มีค่าต่ำ ใช้ตัววัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 10000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



ภาพที่ 72 องค์ประกอบของเครื่อง SEM [77]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดมีต้นกำเนิดเป็นอิเล็กตรอนแทนแสง โดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอนถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสเตน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากขดลวด จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนต่อชิ้นงานหลายแบบ เนื่องจากลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น



ภาพที่ 73 การหลุดของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่างๆ [76]

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงาน 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) [76]

2. เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) [78]



ภาพที่ 74 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

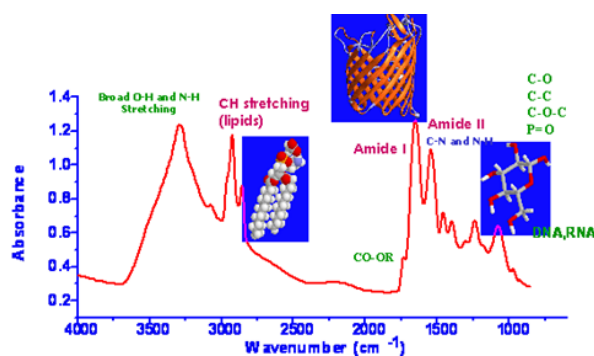
FTIR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

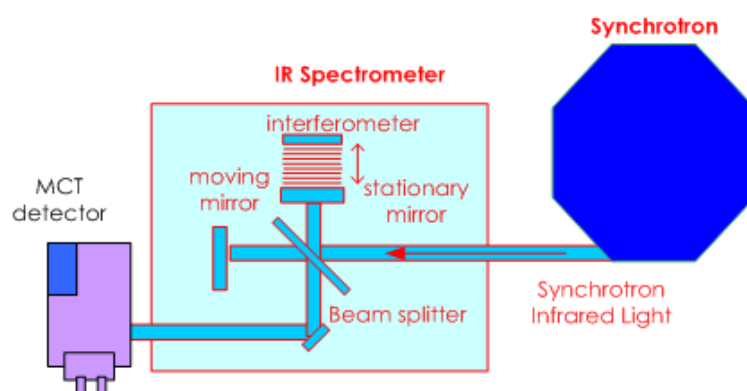
1. Near Infrared ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$)
2. Middle Infrared ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$)
3. Far Infrared ($200-10 \text{ cm}^{-1}$)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย

เทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum



ภาพที่ 75 กราฟแสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ได้จากเครื่อง FTIR [78]



ภาพที่ 76 ภาพแสดงเกี่ยวกับส่วนประกอบของเครื่อง FTIR Spectrometer [78]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR spectrometer ประกอบไปด้วย Light source, Interferometer Sample, Detector และ Computer

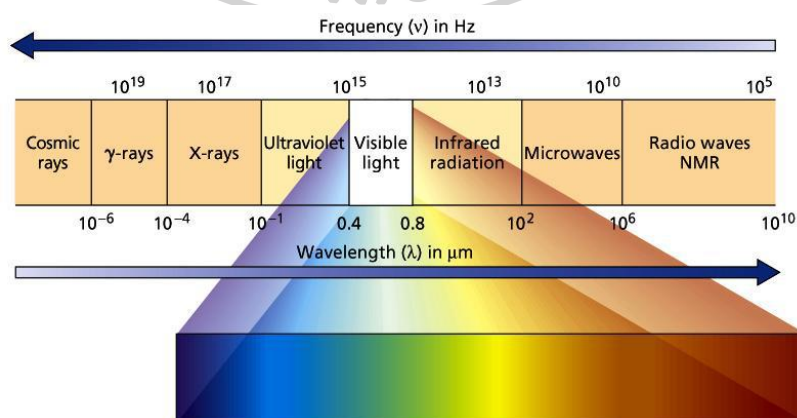
การใช้เครื่อง FTIR spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่าง ใช้เวลาน้อยและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ในการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพหรือเพื่อยืนยันสูตรโครงสร้างของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ชนิดของสารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างสารสกัดจากพืช ตัวอย่างพอลิเมอร์ เป็นต้น นอกจากการวิเคราะห์โดยใช้ช่วง Middle IR แล้ว ช่วง Near IR

3. เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer [79]



ภาพที่ 77 เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

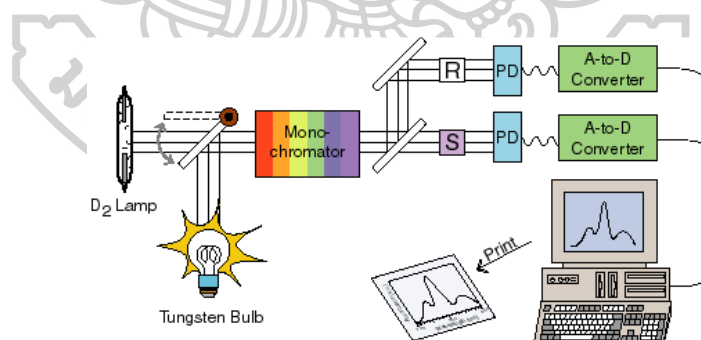
UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่ให้ภาพไวที่ดี และใช้กันอย่างแพร่หลาย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า Spectrum



ภาพที่ 78 สเปกตรัม UV-VIS [80]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ประกอบไปด้วย

1. Light source แหล่งกำเนิดรังสีเป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H₂ and D₂ lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง Visible ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น
2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึมหรือ เกรตติง
3. Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกาและควอตซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล
4. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด Silicon diode detector



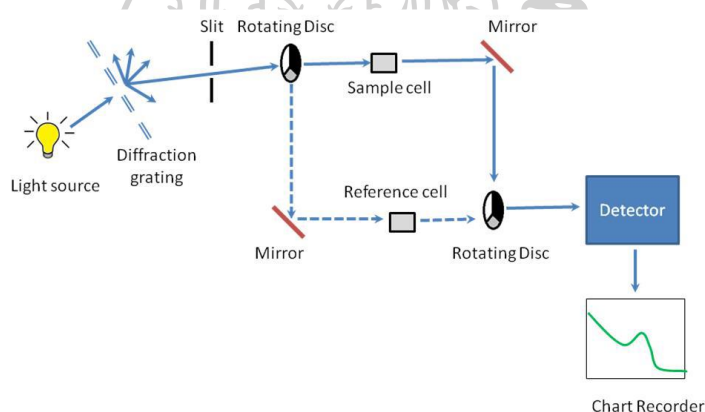
ภาพที่ 79 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer [80]

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. Single-Beam spectrophotometer เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสีจะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับ สัญญาณ เนื่อง

จากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดลำรังสีนี้จะไปสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

2. Double-Beam Spectrophotometer ลำรังสีจะผ่านโมนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit slit แล้ว ลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันลำรังสีจะผ่านไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



ภาพที่ 80 องค์ประกอบของเครื่อง Double beam spectrophotometer [80]

กฎของเบียร์ (Beer's Law)

"สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength) เท่ากัน ค่าแอมพลิจูดของแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย"

$$A \propto C$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นของตัวอย่าง (g.L^{-1})

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's Law)

"สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (Parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ค่าแอมบซอร์เบ้นซ์จะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength)"

$$A \propto l$$

เมื่อ l = ความหนา ความกว้างของเซลล์หรือระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (cm.)

กฎการดูดกลืนแสงเบียร์แลมเบิร์ต (Beer - Lambert Law or Law of Light Absorption)

เป็นการรวมกฎของเบียร์และของแลมเบิร์ตเข้าด้วยกัน "สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous solution) ค่าแอมบซอร์เบ้นซ์จะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง (Concentration) และระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Path length)"

$$A = alc$$

เมื่อ a = สภาวะการดูดกลืน ($L.g^{-1}.cm^{-1}$)

ถ้าความเข้มข้นของตัวอย่างเป็นโมลาริตี (Molarity; $mol.L^{-1}$) เราเรียกสภาวะการดูดกลืนว่า ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง (Molar absorptivity, ϵ) ของสารละลาย ซึ่งเป็นค่าจำเพาะของระบบการดูดกลืนหรือเป็นหมู่โครโมฟอร์ (Chromophore) ที่ใช้ในการระบุโครงสร้างของสาร [80]

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon lc$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ ($mol.L^{-1}$) ของตัวอย่าง

ϵ = ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของสารละลายเข้มข้น $1 mol.L^{-1}$ (molar absorptivity)

4. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET) [81]



ภาพที่ 81 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET) [82]

เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET) เป็นเครื่องวิเคราะห์พื้นที่จำเพาะของวัสดุ การวัดพื้นที่จำเพาะสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีนี้จะเป็นการวัดปริมาณของแก๊สไนโตรเจน แล้วคำนวณค่าออกมาเป็นจำนวนค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุน หลักการจาก บรูเนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ทำการศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งภายในรูพรุนและผิวหน้าของวัสดุ พบว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นบนผิววัสดุเป็นชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน หลังจากนั้นแก๊สไนโตรเจนจะกระจายตัวไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะหลายชั้น ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นดังสมการ “สมการของ BET”

$$\frac{1}{W \left[\left(\frac{P}{P_0} \right) - 1 \right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C-1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

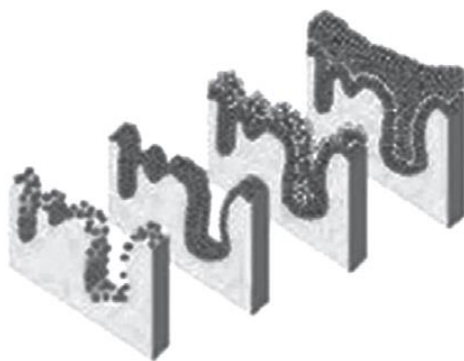
โดย W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0

W_m = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของสารลักษณะที่เป็นชั้นเดียว

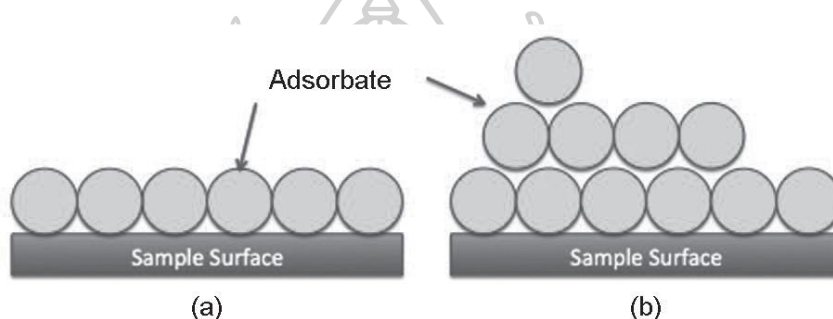
P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง (mmHg)

P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (mmHg)

C = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ



ภาพที่ 82 การดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ [81]



ภาพที่ 83 การดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนของวัสดุเป็นชั้น ๆ [81]

จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $1/W[(P_0/P) - 1]$ กับ P/P_0 จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 84 มีความชัน (Slope, s) ดังสมการ

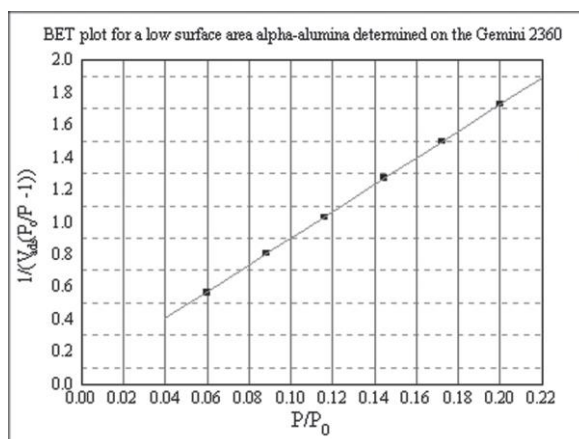
$$S = \frac{C-1}{W_m - 1}$$

และจุดตัดแกน y (y-intercept, i) ดังสมการ

$$i = \frac{1}{W_m C}$$

ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุใน ลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (W_m) คำนวณโดยนำ s และ i แทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{s+i}$$



ภาพที่ 84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ [81]

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุคำนวณโดยนำ W_m แทนค่าในสมการ

$$S_t = \frac{W_m N A_{cs}}{M}$$

โดย S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

N = เลขอาโวกาโดร (6.023×10^{23}) (mole/mol)

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 g/mol)

A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (16.2×10^{-23}) (m^2)

ค่า S_t ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ (w) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะหน่วยเป็น m^2/g

$$S = \frac{S_t}{w}$$

ปริมาตรรูพรุนรวม (V_p) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (r_p^-) ของวัสดุคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$V_p = \frac{W_s}{\rho}$$

$$r_p^- = \frac{2V_p}{S_t}$$

โดย W_s = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์

$$(P/P_o) \approx 1$$

ρ = ความหนาแน่นของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบน ผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์

$$(P/P_o) \approx 1$$

S_t = พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ในการทดลองตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะปะปริมาณรูพรุน โดยจะเปรียบเทียบตัวอย่าง 2 ตัวอย่างหรือจำนวน 2 เซลล์ เซลล์แรกใส่วัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่ตัวอย่างทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบจะมีการให้ความร้อนก่อนเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทำให้เซลล์เป็นสุญญากาศ เพื่อไม่ให้มีแก๊สชนิดอื่น หลังจากนั้นจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นจะให้แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเซลล์ทั้ง 2 ความดันภายในเซลล์ตัวอย่างความดันจะลดลงจากการดูดซับจนกระทั่งคงที่ (P) แต่ในเซลล์อ้างอิงความดันจะคงที่ (P_o) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกค่าคือ ค่าความดันสัมพัทธ์ (P/P_o) และปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับ (W) จากวัสดุตัวอย่าง จากนั้นจะปล่อยแก๊สเข้าไปอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก จนกระทั่งความดันของเซลล์ตัวอย่างคงที่ไม่ลดลง ($P/P_o \cong 1$) แสดงไม่เกิดการดูดซับอีก แล้วนำมาคำนวณตามสมการ [81]

5. เครื่อง X-ray Photoelectron Spectrometer (XPS) [83]



ภาพที่ 85 เครื่อง X-ray Photoelectron Spectrometer (XPS)[84]

เครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) เป็นเครื่องวิเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติบริเวณพื้นผิววัสดุ โดยหลักการเมื่อให้ลำแสงโฟตอน (Photon, $h\nu$) หรือความคลืนค่าเดียว (Mono-energetic) ลงบนพื้นผิวของวัสดุ แล้วอะตอมของวัสดุจะเกิดการดูดกลืน จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมหลุดออกมาเรียกว่า Photoelectric absorption ซึ่งอิเล็กตรอนหลุดออกมาจะมีการปลดปล่อยพลังงานจลน์ออกมา แล้วจะถูกวัดค่าด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Electron energy analyser โดยค่าพลังงานจลน์ที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน จากสมการ

$$KE = h\nu - BE - e\Phi$$

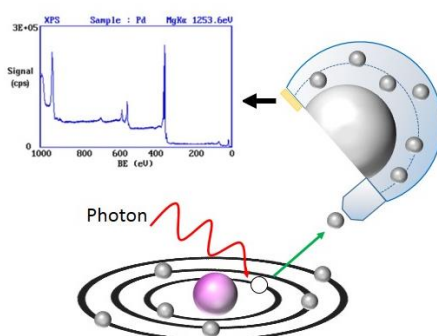
โดย KE = ค่าพลังงานจลน์ (Kinetic energy)

$h\nu$ = ค่าพลังงานของแสงที่ใช้

BE = ค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy)

$e\Phi$ = ค่า Work function ของ Electron energy analyser

จากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา จะไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน (Binding energy) ของวัสดุที่วัดได้ ซึ่งค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเป็นค่าจำเพาะ ที่สามารถระบุธาตุ องค์ประกอบและสถานะทางเคมี บริเวณพื้นผิวของวัสดุได้



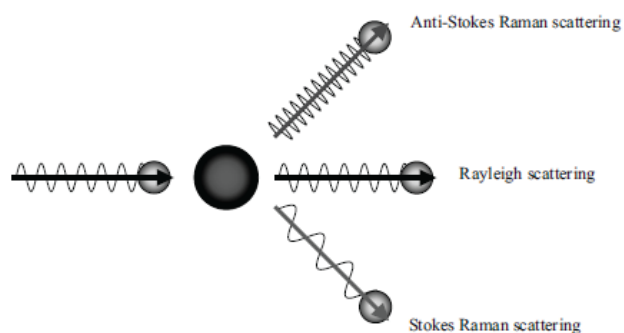
ภาพที่ 86 หลักการของเครื่อง XPS [83]

6. เครื่อง Raman spectrometer [85]



ภาพที่ 87 เครื่อง Raman spectrometer

เครื่อง Raman spectrometer เป็นเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างองค์ประกอบทางเคมี โดยหลักการกระเจิงของแสงที่เกิดจาก อนุภาคของแสงเข้าชนกับโมเลกุลของสาร ถ้าแสง Laser ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารที่เป็นของเหลวโปร่งแสง จะมีอนุภาคจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไป บางส่วนจะชนเข้ากับโมเลกุลของสารแล้วเปลี่ยนทิศทาง โดยการชนส่วนใหญ่พลังงานหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลง จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น จะเรียกว่า Rayleigh scattering แต่จะมีอนุภาคของแสงส่วนน้อยที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานหลังการชน จะเรียกว่าการชนแบบไม่ยืดหยุ่น โดยอนุภาคของแสง อาจ



ภาพที่ 88 การเกิดการกระเจิง (Scattering) [85]

มีความถี่มากขึ้นหรือลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงาน หลังการชนนี้เรียกว่า Raman scattering หากอนุภาคของแสงชนในสภาวะพื้น ความถี่หลังการชนจะลดลงเรียกว่า Stokes Raman scattering แต่หากอนุภาคของแสงชนในสภาวะกระตุ้นความถี่หลังการชนจะเพิ่มขึ้น เรียกว่า Anti-stokes raman scattering โดยทั่วไปแล้วจะวัดค่า Stokes raman scattering เนื่องจากสารจะอยู่ในสภาวะพื้น โดยสารแต่ละชนิดจะเปลี่ยนความถี่ของแสงแตกต่างกัน และความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมาได้ไม่เท่ากันอีกด้วย จึงนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของสารได้



รายการอ้างอิง

- [1] รศ. ดร. อรุณี คงดี อัลเตรด. การจำแนกและชนิดของสีย้อม. เข้าถึงเมื่อ 5/01/2020. เข้าถึงได้จาก http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a_kongdee/%E0%B8%84%E0%B8%A1362-%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%203%2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%A2%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%AA%E0%B8%B5-4p.pdf
- [2] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. คู่มือเทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. เข้าถึงเมื่อ 5/01/2020. เข้าถึงได้จาก <http://library.dip.go.th/multim6/ebook/IT%20%E0%B8%AA%E0%B8%AD3%20%E0%B8%8447.pdf>
- [3] LabChem. Methylene Blue. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.labchem.com/tools/msds/msds/LC16850.pdf>
- [4] ChemSpider. Methylene Blue. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.5874.html>
- [5] ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพสัตว์น้ำและผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ สมุทรสาคร. มอลาไคท์ กรีน (Malachite Green; MG). เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก https://www.fisheries.go.th/rgm-samutsa/content_list.asp?Cat_ID=7&subcat_id=22&content_id=41
- [6] C. S. Lu, C. C. Chen, Y. C. Chung, J. L. Jan. UV light induced photodegradation of malachite green on TiO₂ nanoparticles. Journal of Hazardous Materials, 141, 3: 520-528. (2007).
- [7] Mohammadreza Khodabakhsh. The properties, uses of Rhodamine B? what is the environmental problem? why to go for degradation? why the importants of visible light? เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก https://www.researchgate.net/post/The_properties_uses_of_Rhodamine_B_what_is_the_environmental_problem_why_to_go_for_degradation_why_the_importants_of_visible_light
- [8] Sigma-Aldrich. Rhodamine B. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sigma/r6626?lang=en®ion=US>
- [9] ขนิษฐา. สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1&read=true&count=true

- [10] อาจารย์ปราโมช เขียวชาญ อาจารย์สิริรัตน์ สุวณิชญ์เจริญ. ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก https://www.stou.ac.th/schools/shs/booklet/6_2548/occhealth.htm
- [11] พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. การตกตะกอนผลึก (Precipitation). เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก https://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=592
- [12] ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนพานนท์ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Ozone / โอโซน. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2770/ozone-%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0%B9%82%E0%B8%8B%E0%B8%99>
- [13] บริษัท กรีน วอเตอร์ ทรีท จำกัด. ระบบบำบัดน้ำเสีย. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://www.greenwatertreat.com/15414825/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%B3%E0%B8%9A%E0%B8%B1%E0%B8%94%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B9%80%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B9%82%E0%B8%94%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%98%E0%B8%B5%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A1%E0%B8%B5>
- [14] SciMath. Carbon nanotubes วัสดุแห่งอนาคต. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/7391-carbon-nanotubes>
- [15] Sandia National Laboratories. Diamonds are not forever. เข้าถึงเมื่อ 6/08/2020. เข้าถึงได้จาก https://www.sandia.gov/Pulsed-Power/res-areas/planetary_research/diamonds.html
- [16] J. Russell Hemley, R. Artem Oganov, M. Robert Hazen, P. Adrian Jones. Structure, bonding, and mineralogy of carbon at extreme conditions. *Mineralogy & Geochemistry*, 75, 47-77. (2013).
- [17] ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ : ตลาดยังมีความต้องการสูง ? เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://tujournals.tu.ac.th/tstj/detailart.aspx?ArticleID=3739>
- [18] บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. ถ่านปลุกฤทธิ์ ! เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=1606&Itemid=9
- [19] บุญชัย ตระกูลมหชัย. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนด. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2536)
- [20] Probst and Hick. *Synthetic Fuels*. Mc Graw Hill. (1985)

- [21] J.W. Hassler. Publication with activated carbon. New York: Mercel Dekker, Inc. (1974)
- [22] S.M. Kohan, P.M. Barkhordar. Thermalchemical conversion of biomass to fuels and chemistry, chapter VI, production of oil and char pyrolysis of wood, January. Mission Analysis for Federal Fuel from Biomass program Vol IV. (1979)
- [23] J.W. Hassler. Activated carbon. London: Leonard Hill. (1697)
- [24] ScienceDirect. Chemical Activation. เข้าถึงเมื่อ 5/01/2020. เข้าถึงได้จาก <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/chemical-activation>
- [25] ณัฐยา พุนสุวรรณ. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธี กระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสุรนารี. (2545)
- [26] M. El-Mootassem, C. Srinivasakannan, K. Suresh Kumar Reddy, A. Al Shoaibi. Synthesis and characterization of porous carbon from petroleum pitch using KOH. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 6, 53-69. (2018).
- [27] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. วัสดุรูพรุนคืออะไร. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก https://www.tci-thaijo.org/index.php/science_kmitl/article/download/93614/73294/
- [28] ปรินทร์ เต็มญารศิลป์. การเตรียมและวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง และไผ่หมาจู. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2551)
- [29] D. Salinas-Torres, M. José Mostazo-López, R. Ruiz-Rosas, E. Morallón, D. Cazorla-Amorós. Nitrogen-doped superporous activated carbons as electrocatalysts for the oxygen reduction reaction. Materials, 12, (2019).
- [30] M. Toyoda, M. Inagaki, Y. Soneda, T. Morishita. Nitrogen-doped carbon materials. Carbon, 132, 104-140. (2018).
- [31] G. McKay. Use of adsorbent for the removal of pollutants from wastewaters. New York: CRC. Press. (1996)
- [32] K.M. Yao. Removal of particulate matter by filtration. Science Technology 5(11): 378-282. (1971)
- [33] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2552)
- [34] มั่นสิน ตันจุลเวศม์. วิศวกรรมการปะปา เล่ม 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2539)

- [35] D. H. Chairman Everett (UK), R. A. W. Haul (FRG), L. Moscou (Netherlands), R. A. Pierotti (USA), J. Rouquerol (France), T. Siemieniowska (Poland), K. S. W. Sing (UK). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. เข้าถึงเมื่อ 5/01/2020. เข้าถึงได้จาก <http://publications.iupac.org/pac/pdf/1985/pdf/5704x0603.pdf>
- [36] เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์ (2539)
- [37] Nortis. What is Biomass? เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://www.nortisgroup.com/2016/10/02/what-is-biomass/>
- [38] iEnergyGuru. ชีวมวล (Biomass). เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://ienergyguru.com/2015/08/%E0%B8%8A%E0%B8%B5%E0%B8%A7%E0%B8%A1%E0%B8%A7%E0%B8%A5-biomass/>
- [39] รองศาสตราจารย์ ดร.นัยนันทน์ อริยกานนท์. ผักตบชวา. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก http://www.eric.chula.ac.th/ej/v22y2561/no3/ap49_56.pdf
- [40] NamthipNicha1. ผักตบชวา คือ. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <https://bumbutanam.wordpress.com/%E0%B8%9C%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B8%9A%E0%B8%8A%E0%B8%A7%E0%B8%B2/%E0%B8%9C%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%95%E0%B8%9A%E0%B8%8A%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD/>
- [41] ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Cellulose / เซลลูโลส. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA>
- [42] M. Lalit Srivastava. Chapter 2 - Cell wall, cell division, and cell growth. San Diego: Academic Press. (2002)
- [43] ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนานนท์ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Hemicellulose / เฮมิเซลลูโลส. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3154/hemicellulose-%E0%B9%80%E0%B8%AE%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA>

- [44] M. N. Belgacem, A. Gandini. 4 - The State of the Art of Polymers from Renewable Resources. Boston: William Andrew Publishing. (2013)
- [45] ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร. นิธิยา รัตนพานนท์ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. Lignin / ลิกนิน. เข้าถึงเมื่อ 28/05/2019. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/world/3289/lignin%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%99%E0%B8%B4%E0%B8%99>
- [46] C. Lapierre, W. Boerjan, J. Ralph. Lignin structure and its engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 240-249. (2019).
- [47] Y. Marco, E. García-Bordejé, L. Roldán. Bio-sourced mesoporous carbon doped with heteroatoms (N,S) synthesised using one-step hydrothermal process for water remediation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 222, 55-62. (2016).
- [48] F. Suárez-García, Á. Sánchez-Sánchez, A. Martínez-Alonso, J. M. D. Tascón. Synthesis, characterization and dye removal capacities of N-doped mesoporous carbons. *Journal of Colloid and Interface Science*, 450, 91-100. (2015).
- [49] Y. Li, T. Hu, W. Gao, X. Wang, Y. Tian. Engineering of rich nitrogen-doped and magnetic mesoporous carbon nanospheres with predictable size uniformity for acid dye molecules adsorption. *Microporous and Mesoporous Materials*, 279, 234-244. (2019).
- [50] S. Sujata Lata Rangabhashiyam, P. Balasubramanian. Biosorption characteristics of methylene blue and malachite green from simulated wastewater onto Carica papayawood biosorbent. *Surfaces and Interfaces*, 10, 197-215. (2018).
- [51] J. Chen, C. Xu, S. Li, Q. Gu, D. Wang, C. Jiang, Y. Liu. N-doped honeycomb-like porous carbon derived from biomass as an efficient carbocatalyst for H₂S selective oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123806. (2021).
- [52] C. Saka. BET, TG-DTG, FT-IR, SEM, iodine number analysis and preparation of activated carbon from acorn shell by chemical activation with ZnCl₂. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 95, 21-24. (2012).
- [53] L. Dongb, S. Wang, Z. Li, N. Lina, H. Xub, S. Gao. Sustainable supercapacitors of nitrogen-doping porous carbon based on cellulose nanocrystals and urea. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 4095-4103. (2020).

- [54] M. Smith, M. Ayiania, J.R. Alyssa Hensley, L. Scudiero, J.-S. McEwen, M. Garcia-Perez. Deconvoluting the XPS spectra for nitrogen-doped chars: An analysis from first principles. *Carbon*, 162, 528-544. (2020).
- [55] L. Pan, R. Gao, Z. Li, X. Zhang, L. Wang, J.-J. Zou. Cobalt nanoparticles encapsulated in nitrogen-doped carbon for room-temperature selective hydrogenation of nitroarenes. *Chinese Journal of Catalysis*, 39, 664-672. (2018).
- [56] N. Liu, Y. Li, T. Zhang, B. Wang, Y. Wang, L. Wang, J. Wei. Highly microporous nitrogen-doped carbons from anthracite for effective CO₂ capture and CO₂/CH₄ separation. *Energy*, 211, 118561. (2020).
- [57] X. Wang, Y. Tang, J. Chen, X. Wang, D. Wang, Z. Mao. Templated transformation of g-C₃N₄ nanosheets into nitrogen-doped hollow carbon sphere with tunable nitrogen-doping properties for application in Li-Ions batteries. *Carbon*, 168, 458-467. (2020).
- [58] F. Guo, X. Jiang, X. Jia, Y. Zhan, H. Zhou, L. Qian. Synthesis of nitrogen-doped hierarchical porous carbons from peanut shell as a promising electrode material for high-performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 30, 101451. (2020).
- [59] Y. Zhang, D. Dong, Y. Xiao, T. Wang, J. Wang, E. Carlos Romero, W.-p. Pan. High performance aqueous supercapacitor based on nitrogen-doped coal-based activated carbon electrode materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 580, 77-87. (2020).
- [60] Y. Ouyang, Y. Sun, J. Luo, H. Cao, X. Li, J. Ma, J. Liu, Y. Wang, L. Lu. Biomass-derived nitrogen self-doped porous activation carbon as an effective bifunctional electrocatalysts. *Chinese Chemical Letters*, In Press.
- [61] M. Z. Abedin, K. Tanzim. Adsorption of methylene blue from aqueous solution by pomelo (citrus maxima) Peel. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 4, 230-232. (2015).
- [62] N. Das, V. Vinodhini. Packed bed column studies on Cr (VI) removal from tannery wastewater by neem sawdust. *Desalination*, 264, 9-14. (2010).
- [63] R. Brent, Y. Teck, N. Ang, M. Taylor, R. Burrell, M. Kheireddine Aroua, S. Baroutian. Breakthrough analysis of continuous fixed-bed adsorption of sevoflurane using activated carbons. *Chemosphere*, 239, 124839. (2020).

- [64] F. Jin, Y. Zhang, Z. Shen, F. Wang, R. Lynch, A. Al-Tabbaa. Adsorption of methyltert-butyl ether (MTBE) onto ZSM-5 zeolite: Fixed-bed column tests, breakthrough curve modelling and regeneration. *Chemosphere*, 220, 422-431. (2019).
- [65] R. Palanivel, S. Dhananasekaran, S. Pappu. Adsorption of methylene blue, bromophenol blue, and coomassie brilliant Blue by α -chitin nanoparticles. *Journal of Advanced Research*, 7, 113-124. (2016).
- [66] M. Taghizadeh, N. Fallah. Continuous fixed-bed adsorption of Mo(VI) from aqueous solutions by Mo(VI) - IIP: breakthrough curves analysis and mathematical modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 104079. (2020).
- [67] M. Askari EhsanSalehi, Y. Darvishi. Novel combinatorial extensions to breakthrough curve modeling of an adsorption column — Depth filtration hybrid process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 86, 232-243. (2020).
- [68] P. Das, L. Das, A. Bhowal, C. Bhattacharjee. Treatment of malachite green dye containing solution using bio-degradable Sodium alginate/ NaOH treated activated sugarcane bagasse charcoal beads: Batch, optimization using response surface methodology and continuous fixed bed column study *Journal of Environmental Management* 276, 111272. (2020).
- [69] A.L. Ahmad S.F. Azha, S. Ismail. Coating paint for dyes removal: Performance and characteristic. *Journal of Water Process Engineering*, 15, 18-25. (2017).
- [70] M. Abbas Ahmad ZAINI, N. Boon SWAN. Adsorption of malachite green and congo red dyes from water: recent progress and future outlook. *Ecol Chem Eng S.*, 26, 119-132. (2019).
- [71] Merck. Rhodamine B. เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/rhodamineb479018188911?lang=en®ion=TH>
- [72] M. Raziq Rahimi Kooh, M. Khairud Dahri, B.L. Linda Lim. Application of *Casuarina equisetifolia* needle for the removal of methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution. *Alexandria Engineering Journal*, 54, 1253-1263. (2015).
- [73] Y. Guo, C. Su, L. Yu, J. Zou, Z. Zeng, L. Li. Insight into specific surface area, microporosity and N, P co-doping of porous carbon materials in the acetone adsorption. *Materials Chemistry and Physics*, 73, 123930, (2020).

- [74] B. Xing, Z. Li, Y. Ding, Y. Li, S. Wang. A high-performance biochar produced from bamboo pyrolysis within-situnitrogen doping and activation for adsorption of phenol and methylene blue. Chinese Journal of Chemical Engineering, In Press.
- [75] R. Brent Young, T. Nam Ang, M. Taylor, R. Burrell, M. Kheireddine Aroua, S. Baroutian. Breakthrough analysis of continuous fixed-bed adsorption of sevoflurane using activated carbons. Chemosphere, 239, 124839, (2020).
- [76] ศูนย์นวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. Scanning Electron Microscopy (SEM). เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39
- [77] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาลัยมหิดล. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Electron microscope. เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [78] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy). เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl41.html>
- [79] Materials Innovation Center (MIC). UV-Visible Spectrophotometer. เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=46
- [80] อ.ดร. สายรุ้ง เมืองพล. สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy). เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก https://appliedchem.mju.ac.th/government/25590629090647_appliedchem/Doc_25590804165321_206535.pdf
- [81] สุพะไชย จินดาอุตติกุล. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2555_189_60_p22-24.pdf
- [82] ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาลัยนเรศวร. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง Surface area and porosity analyzer (BET) เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก https://www.sci.nu.ac.th/slcs/tools.php?tool_ID=29
- [83] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). XPS X-Ray Photoemission spectroscopy . เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก <https://www.slri.or.th/th/bl5-3-xps.html>
- [84] ศูนย์บริการวิเคราะห์และทดสอบ วิทยาลัยปิโตรฯ จุฬาฯ ปิโตรเลียม วัสดุพอลิเมอร์ ปิโตรเคมี. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020. เข้าถึงได้จาก <https://ppcresearch.wordpress.com/spectroscopy/>

[85] ภก.เมธี สอพิติพร. รามาน สเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy). เข้าถึงเมื่อ 25/10/2020.
เข้าถึงได้จาก [https://www2.gpo.or.th/Portals/6/Newsletter/RDI NewsYr25No1-5.pdf](https://www2.gpo.or.th/Portals/6/Newsletter/RDI%20NewsYr25No1-5.pdf)





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ดิลก สะแสงตา
วัน เดือน ปี เกิด	5 พฤศจิกายน 2537
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ (วศ.บ) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	285/3 ม.1 ต.ด่านช้าง อ.ด่านช้าง จ.สุพรรณบุรี 72180
ผลงานตีพิมพ์	1.Dilok Sasaengta, Bussain Ksapabutr, Nattawut Chaiyut and Manop Panapoy, Efficient removal of methylene blue by low-cost and biodegradable highly effective adsorbents based on biomass in the fixed bed column, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 773:012056 DOI: 10.1088/1757-899X/773/1/012056 2.Dilok Sasaengta, Bussain Ksapabutr, Nattawut Chaiyut and Manop Panapoy, Efficient removal of methylene blue by low-cost and biodegradable highly effective adsorbents based on biomass in the fixed bed column, The 2nd International Conference on Materials Research and Innovation (ICMARI) 16-18 December 2019, Bangkok, Thailand