

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมหลายชนิดมักประสบกับปัญหาน้ำที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมักจะปนเปื้อนด้วยสารบางประเภทที่ถูกส่งปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือภายนอกโรงงานโดยไม่มีการบำบัดก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอย่างร้ายแรง และมีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของคนอาศัยอยู่บริเวณนั้น ถึงแม้ภาครัฐจะมีการบังคับให้โรงงานเหล่านี้ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย แต่สิ่งหนึ่งที่พบเป็นประจำก็คือ “น้ำทิ้งจากโรงงานยังคงมีสารพิษปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง” หลายโรงงานที่แม้จะมีการเดินระบบบำบัดแล้วก็ยังไม่สามารถจัดการกับของเสียเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสาเหตุสำคัญอันหนึ่งเกิดจากการเลือกเทคนิคที่ใช้ไม่เหมาะสม "โรงงานย้อมผ้า" เป็นตัวอย่างหนึ่งของปัญหาด้านเทคนิคที่เห็นได้ชัดเจน

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมสามารถผลิตข้าวได้จำนวนมาก ทำให้มีแกลบที่เกิดขึ้นจากโรงสีข้าวในปีหนึ่งๆ มีปริมาณแกลบสูงถึงประมาณ 5,878 พันตัน จากการสำรวจโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในปี 2540 ของเหลือทิ้งเหล่านี้บางส่วน ถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ย วัสดุปรองนอน ในโรงเรือนเลี้ยงเป็ด เลี้ยงไก่ และในยุคที่ประเทศ มีความต้องการพลังงานสูง แกลบถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิง ทดแทนพลังงานจากน้ำมันดิบ นอกจากนี้ขี้เถ้า ที่ได้จากการเผาไหม้ของแกลบ ยังสามารถส่งออกขายต่างประเทศได้อีกในราคา กิโลกรัมละ 3-4 บาท ซึ่งนับว่าเป็นผลพลอยได้นอกเหนือจากการใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

จากการศึกษาค้นคว้าทั้งในและต่างประเทศ พบว่าในแกลบและขี้เถ้าแกลบมีซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นับว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง ที่นับวันแต่จะมีเพิ่มขึ้น และมีวัฏจักรการผลิตสั้น นอกจากนี้ซิลิกาและคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับความชื้น และสารเคมีได้ดี จึงนิยมใช้เป็นสารดูดความชื้น ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรมอาหารและยา และยังสามารถนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมได้อีกด้วย ดังนั้นการดูดซับสีย้อมด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่น่าจะช่วยลดปริมาณแกลบที่เหลือทิ้งจากโรงสีข้าวและสามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

โครงการนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาวิธีการสกัดซิลิกาและคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบและศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่

เตรียมจากแกลบ ซึ่งผ่านวิธีการล้างด้วยกรดและเบสที่ความเข้มข้นต่างกัน และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Congo red

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการสกัดซิติกาและคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบ
- 1.2.2 ศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแกลบ
- 1.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Congo red

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาวิธีการสกัดซิติกาและคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบ
- 1.3.2 ศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของซิติกาและคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบ
- 1.3.3 ศึกษาการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแกลบ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 การเตรียมตัวดูดซับซิติกาจากแกลบ โดยผ่านการล้างด้วยกรด
- 1.4.2 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบ โดยผ่านการล้างด้วยเบส
- 1.4.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเตรียมตัวดูดซับซิติกา และคาร์บอนกัมมันต์
- 1.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบและศึกษาคุณลักษณะของซิติกาและคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้
- 1.4.5 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย Congo red

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำสิ่งเหลือใช้จากการเกษตรมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ และ นำข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับสีย้อม Congo red ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากแกลบ ไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสีได้

บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แกลบ [1]

แกลบข้าว คือ ผลผลิตที่ได้จากการสีข้าว เป็นเปลือกของข้าวสาร เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการผลิตข้าวสาร เมล็ดมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เม็ดยาวสีเหลืองอมน้ำตาล หรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิประเทศที่มีการปลูกข้าว ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกแกลบข้าวรายใหญ่ของโลก นอกจากการนำแกลบข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่าง ๆ แล้ว ยังสามารถนำไปผสมกับวัสดุอื่น ๆ ทำเป็นวัสดุก่อสร้างแล้ว แกลบข้าวยังถูกนำไปผลิตเป็นขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เพื่อนำขี้เถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์อีกมาก ซึ่งส่วนประกอบหลักของขี้เถ้าแกลบ คือ ซิลิกา (SiO_2) สามารถนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี และการเผาที่อุณหภูมิสูง ซิลิกาในขี้เถ้าแกลบมีทั้งที่เป็น ซิลิกาผลึก (Crystalline Silica) ซิลิกาผลึกสามารถแบ่งย่อยเป็นหลายชนิดตามความแตกต่างของรูปร่าง ลักษณะผลึกและความหนาแน่นของซิลิกา รูปร่างของผลึกมีหลายแบบ เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หกเหลี่ยม สี่เหลี่ยมลูกบาศก์และเส้นยาว และซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีรูปร่างไม่เป็นผลึก (Non-crystalline Silica)

2.2 ซิลิกา [1-3]

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวของซิลิกอนและออกซิเจน มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐานและมีรูพรุนจำนวนมาก ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ กำจัดความชื้นได้ง่าย มีพื้นที่ผิวกว้างและมีความแข็งแรง มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว 1,700 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,230 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรด ทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก แต่สามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง และรวมกับออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่ได้ ไม่ลุกติดไฟที่สามารถหลอมเป็นแก้วที่มีสัมประสิทธิ์การแตกตัวต่ำ มีการนำความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของแก้ว ในทางการค้า ซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิกอนและถูกใช้ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุก่อสร้าง ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ซิลิกามีคุณสมบัติทางเคมีค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่า ซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ เลย เพราะซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปได้ และอุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา การเตรียมและสภาวะของ ซิลิกาชนิดอสัณฐาน จะว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกา ที่เป็นเช่นนี้เพราะอสัณฐานซิลิกามีพื้นที่ผิวมาก

ซิลิกาโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปสินแร่ธรรมชาติ ซึ่งมีสารเจือปนจำนวนมากและยากต่อการกำจัดออกไป อีกทั้งต้องอาศัยกระบวนการบดย่อยหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคของซิลิกาที่เล็กพอ นั่นคือ ต้องอาศัยพลังงานจำนวนมากต่อการเตรียมแต่ละครั้ง แต่อีกทางเลือกหนึ่ง คือ การเตรียมซิลิกาจากแคลบ ข้อดีของซิลิกาในแคลบ คือ จำนวนสารเจือปนตามธรรมชาติมีจำนวนน้อยและขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็ก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดอนุภาคของซิลิกาที่ได้จากแคลบ [3]

วัสดุเริ่มต้น	ความบริสุทธิ์ (%)	ขนาดอนุภาค (μm)
SiO ₂	99.99	0.8
กากคาร์บอน	< 2 *	0.04-0.01

หมายเหตุ *กากคาร์บอนหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส นาน 3 ชม. และผ่านการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3 N

ในทางอุตสาหกรรมมีการนำเอาสินแร่ควอตซ์มาบดให้ละเอียด หลังจากเผาในอุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดคาร์บอนในสินแร่ควอตซ์ แล้วชะล้างด้วยกรดแก่ (เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดไนตริก) แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง สุดท้ายวิเคราะห์ปริมาณสารเจือปนที่ตกค้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (อาจเป็น ICP หรือ XRF)

ตารางที่ 2.2 สารเจือปนของสินแร่ควอตซ์ [3]

สารเจือปน	ปริมาณ (%)
Fe	4-5
Mg	10-15
Zr	8-9
Al	2-3
C	5-8
S	น้อยกว่า 1
Mn	7-9.5
Ti	8-11
K	4.5-5

2.3 คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) [4-8]

คาร์บอนกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ หรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่มักเป็นพวกเซลลูโลสที่มาจากพืชและต้นไม้ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ไผ่ เศษไม้เหลือทิ้ง และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ กะลา มะพร้าว ขี้เถ้า ชังข้าวโพด เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ แอนทราไซต์ เป็นต้น ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์นั้นมีไม่มาก เช่น กระดูก หรือ เขาสัตว์ เป็นต้น มาผ่านกรรมวิธีการกระตุ้นทางกายภาพหรือทางเคมี จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี

คาร์บอนกัมมันต์เป็นรูปอสัณฐานของถ่าน คือ มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน จะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวให้มากที่สุด โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ พื้นที่ผิวของคาร์บอนที่ได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 500-2000 ตารางเมตรต่อกรัม ใช้สำหรับการดูดซับสีกลิ่น หรือ สารปนเปื้อนอื่น ๆ

คาร์บอนกัมมันต์นิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสารทั้งที่อยู่ในสถานะก๊าซและของเหลวในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยแบ่งการใช้งานตามลักษณะรูปร่างของคาร์บอนกัมมันต์ คือ คาร์บอนกัมมันต์ชนิดที่เป็นผงละเอียดจะนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับสารละลายหรือของเหลว เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพื่อฟอกสีและทำให้มีรสดีขึ้น ใช้ดูดกลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้ในการดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการในอุตสาหกรรมแอลกอฮอล์และเครื่องดื่ม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ส่วนคาร์บอนกัมมันต์ที่เป็นเม็ดหรือเกล็ดจะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น อุตสาหกรรมเครื่องปรับอากาศใช้คาร์บอนกัมมันต์ในการดูดก๊าซต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษทั้งที่ใช้ในกิจการทหารและที่ใช้ในงานทั่วไป เป็นต้น

2.3.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์โดยทั่ว ๆ ไป แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน โดยทั่วไปมักใช้วิธีเผาที่ไม่มีอากาศเพื่อไม่ให้วัตถุดิบกลายเป็นเถ้า ซึ่งอุณหภูมิในการเผาประมาณ 200-400 องศาเซลเซียส และขั้นตอนการนำถ่านไปเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ ที่เรียกว่าการกระตุ้น (activation) แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางเคมีและการกระตุ้นทางกายภาพ

1. **การกระตุ้นทางเคมี** เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้สารเคมี เช่น แคลเซียมคลอไรด์ สังกะสี-คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งสามารถแทรกซึมได้ทั่วถึง ทำให้ส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ละลายหมดไปได้เร็วขึ้นจากนั้นนำไปเผาในถังที่มีออกซิเจนเป็นเวลาหลายชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งติดมากับถ่านกัมมันต์ออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างอยู่เลย เพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

2. การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการกระตุ้นด้วยการใช้แก๊ส หรือไอน้ำซึ่งใช้อุณหภูมิในการเผากระตุ้นค่อนข้างสูงประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส เพราะไอน้ำใช้จะต้องเป็นไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ สลายไป ทำให้โครงสร้างภายในมีลักษณะรูพรุน (porous) อยู่ทั่วไป ขนาดของรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่สามารถนำมาใช้งานได้โดยทันที โดยไม่ต้องล้างสารที่เหลือตกค้าง นอกจากนี้ยังอาจจะใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันก็ได้ คือ เมื่อใช้สารเคมีกระตุ้นแล้วนำไปกระตุ้นต่อโดยใช้แก๊สหรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด เพื่อการเพิ่มจำนวนรูพรุนให้มากขึ้น



รูปที่ 2.1 ถ่านกัมมันต์ [6]

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) [9-20]

การดูดซับ เป็นการแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน ปรากฏการณ์การดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับเอง คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกละลายนั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวและขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ จึงสามารถแยกองค์ประกอบที่ต้องการออกได้ โดยเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับองค์ประกอบนั้น

2.4.1 ลักษณะการดูดซับมี 2 ลักษณะ คือ

ก. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ดังนั้นองค์ประกอบที่ยึดเกาะแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถแทรกเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอขององค์ประกอบนั้นก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิปกติ ให้ความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของ

การควบแน่น ขึ้นอยู่กับความดันย่อยของก๊าซหรือของเหลวชนิดนั้นและสามารถดูดซับก๊าซและของเหลวไว้ได้ในปริมาณสูงมากต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อลดความดันของระบบลงหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคายซับ ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวถูกละลายกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

ข. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง จะให้ความร้อนออกมาสูงมากเพราะการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ขึ้นกับความดันมากนัก และดูดซับตัวถูกละลายได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับ ได้เพราะองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้

2.4.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกละลายและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะมีทั้งการเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี

2.4.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)

ในเวลาที่เกิดการดูดซับหรือสภาวะที่ตัวถูกละลายเคลื่อนที่ออกจากสารละลายและก่อให้เกิดความเข้มข้นเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของของแข็งจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวละลายที่ผิวหน้า ที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Adsorption) เป็นร้อยละของน้ำหนัก หรือ น้ำหนัก หรือปริมาตรของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับหนึ่งหน่วยน้ำหนัก โดยทั่วไปมักควบคุมให้อุณหภูมิของการดูดซับคงที่ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความดันที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ เส้นความสัมพันธ์ที่ได้เรียกว่า ไอโซเทอม (Isotherm) ซึ่งเป็นลักษณะที่ขึ้นอยู่กับชนิดของรูพรุนบนตัวดูดซับ เมื่อความ

เข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิคงที่นี้ โดยทั่วไปจำนวนของสารที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง

2.4.4 รูปแบบของ Adsorption Isotherm มี 6 รูปแบบ [18] แสดงในรูปที่ 2.5 คือ

ก. Type I Isotherm

เป็นการดูดซับที่พบมากที่สุด ซึ่งดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมบนผิวของตัวดูดซับได้หนาเพียงหนึ่งชั้น (Single Layer Adsorption) พบทั้งในการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของ Microporous Powders ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative Pressure) ต่ำ ๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง ๆ เข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น Microporous หรือ Nonporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

ข. Type II Isotherm

พบมากในการดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อย ๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ก่อนันต์) โดยจะเกิดบน Nonporous Powder ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนกว้างกว่า Micropore (1.5 มิลลิเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection Point or Knee of Isotherm) เกิดเมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น Monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม Relative Pressure จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ Multi-layer

ค. Type III Isotherm

เป็นการดูดซับคล้าย Type II Isotherm แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับของของเหลว ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำ ปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าการเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวถูกดูดซับ

ง. Type IV Isotherm

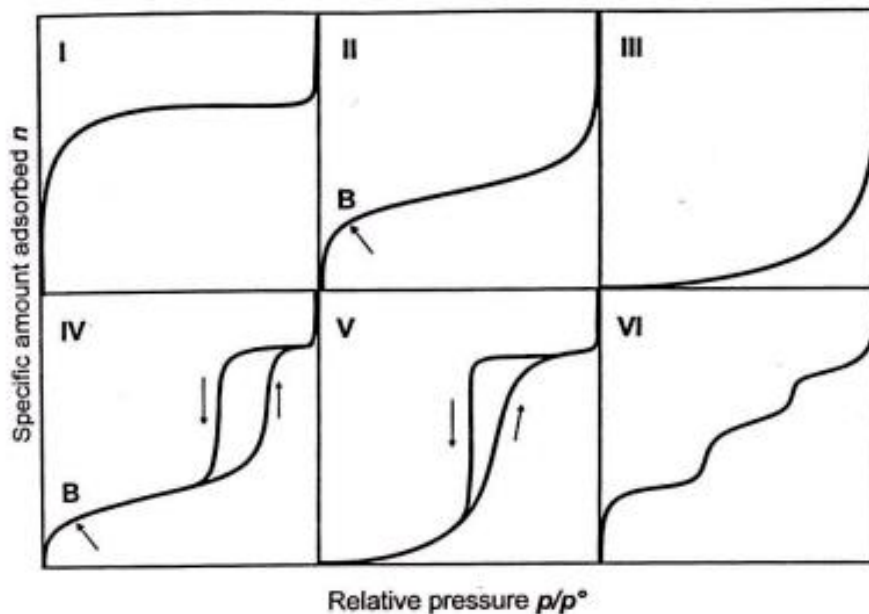
เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type II Isotherm ความหนาของโมเลกุลชั้นแรก ๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนเล็ก ๆ ภาพในตัวดูดซับเต็มหมดแล้วเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับรัศมีประมาณ 15-1000 อังสตรอม ความชันที่มีจุดเปลี่ยนกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Type II Isotherm คือเกือบเป็น Monolayer สมบูรณ์

จ. Type V Isotherm

เป็นการดูดซับคล้ายกับ Type III Isotherm ในช่วงความเข้มข้นต่ำ ๆ แต่เมื่อการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะเข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV Isotherm เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาค้ำกันและขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 15-1000 อังสตรอม

ฉ. Type VI Isotherm หรือ Stepped Isotherm

มีลักษณะการดูดซับเป็นขั้นๆ รูปร่างของสเทปจะขึ้นอยู่กับระบบและอุณหภูมิ



รูปที่ 2.2 รูปแบบของ Adsorption Isotherm [19]

2.4.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetic Models)

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับวิเคราะห์อย่างง่ายในรูป Pseudo-First Order Equation และ Pseudo-Second Order Equation ในรูปแบบของ Ho และ McKey ปี 1998 ดังนี้คือ

1) Pseudo-First Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_c - q_t) \quad (2.1)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo-First Order

q_c คือ ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

q_t คือ ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา t

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

$$q_t = q_c \quad \text{ที่} \quad t = \infty$$

ดังนั้น

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303}t \quad (2.2)$$

2) Pseudo-Second Order Equation

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ k_1 คือ ค่า Rate Constant ของการดูดซับแบบ Pseudo – Second Order

q_e คือ ปริมาณการดูดซับสารที่สภาวะสมดุล

q_t คือ ปริมาณการดูดซับสารที่เวลา t

กำหนดให้สภาวะเริ่มต้นคือ

$$q_t = 0 \quad \text{ที่} \quad t = 0 \quad \text{และ}$$

$$q_t = q_t \quad \text{ที่} \quad t = t$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.4)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (2.5)$$

2.4.6 แบบจำลองสมดุลดูดซับ (Adsorption Isotherm Models)

กระบวนการดูดซับ จะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน ที่จุดนี้ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสภาวะต่างๆ เช่น ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นในสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ ซึ่งใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (2.6)$$

เมื่อ q_0 คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับที่สมดุลหลังการดูดซับ (mg/g)

c_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายก่อนการดูดซับ (mg/L)

c_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

สมดุลดูดซับเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหรือความดันของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (Equilibrium concentration) กับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ (Specific equilibrium amount adsorbed) สำหรับที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งแบบจำลองสมดุลดูดซับที่นิยมใช้ในการอธิบาย ได้แก่ แบบจำลองสมดุลดูดซับของ Linear, Langmuir และ Freundlich ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองแต่ละชนิดเป็นดังนี้ [31]

1) Linear Adsorption Isotherm

แบบจำลองนี้ค่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะจะแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุลของสารถูกดูดซับที่สภาวะหนึ่ง ๆ โดยปกติจะเรียกว่า Henry's Law โดยมีสมการเป็น

$$q = K_H C \quad (2.7)$$

โดยที่ K_H คือ ค่าคงที่ของสมดุลดูดซับของ Henry แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Linear นี้เหมาะสมใช้อธิบายกับระบบที่มีความเข้มข้นเจือจางเท่านั้น

2) Langmuir Adsorption Isotherm

แบบจำลองสมดุลดูดซับแบบ Langmuir มีสมมติฐานของการดูดซับ คือ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir มีสมการเป็น

$$q = \frac{q_{\max} K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.8)$$

โดยที่ K_L คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir และ q_{\max} คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุดซึ่งใช้การบอกขีดจำกัดของการดูดซับแบบชั้นเดียว สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของ Langmuir สามารถแปลงให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $1/q$ และ $1/C$ ดังสมการที่ 2.9

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_{\max} K_L} \right) \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (2.9)$$

3) แบบจำลองสมดุลดูดซับของ Freundlich

แบบจำลองนี้ ค่าปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ (q) แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับที่สมดุลยกกำลังค่าคงที่ (C^n) จึงเขียนสมการได้เป็น

$$q = K_F C^n \quad (2.10)$$

โดยที่ K_F และ n คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของ Freundlich สมการแบบจำลองสมมูลดูดซับ Freundlich สามารถแปลงเป็นสมการเชิงเส้นระหว่าง $\ln q$ กับ $\ln C$ ดังสมการที่ 2.11

$$\ln q = \ln K_H + n \ln C \quad (2.11)$$

4) BET Adsorption Isotherm

BET Adsorption Isotherm ถูกพัฒนาโดย Brunauer Emmett และ Teller (BET) จากการดูดซับที่ถูกจำกัดให้โมเลกุลปกคลุมตัวดูดซับโดยรอบเพียงหนึ่งชั้นความหนาของ Langmuir Adsorption Isotherm มาเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) BET Adsorption Isotherm มีสมมุติฐานเบื้องต้นคือ โมเลกุลของตัวดูดซับสามารถจับในบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับและสามารถที่จะซ้อนทับโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยกันได้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเต็มช่องว่างของตัวดูดซับความร้อนของการดูดซับของชั้นที่สองจะถูกสมมุติเท่ากับความร้อนของสารละลายข้างนอกและความแตกต่างของความร้อนของการดูดซับในชั้นแรก สมการ BET Adsorption Isotherm แสดงดังนี้

$$q = \frac{A c_i}{(C - c_i)(1 + c_i)} \quad (2.12)$$

เมื่อ q_i คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

c_i คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)

i คือ ชั้นของการดูดซับ เช่น 1, 2, 3,.....

A, B และ C คือ ค่าคงที่

สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\frac{c_i}{q_i} = \frac{C}{A} + \left(\frac{Bc_i - 1}{A}\right)c_i - \frac{B}{A}c_i^2 \quad (2.13)$$

2.4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือ ธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

1) ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ได้แก่

ก. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เช่นการใช้ซังข้าวโพดในการดูดซับ PCP เปรียบเทียบกับการใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับ PCP (33 mg/g) ซึ่งสูงกว่าซังข้าวโพด (10 mg/g) เนื่องจากโครงสร้างของถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากกว่าซังข้าวโพดจึงทำให้สามารถดูดซับ PCP ได้ดีกว่า นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน คือถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลงด้วย

ข. ขนาดของตัวดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

ค. เคมี่ที่ผิวหน้า

หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วยแต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2) ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ

ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

ก. ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน ตัวอย่างเช่น การดูดซับฟีนอล, 2-CP, 4-CP และ 2,4,6-TCP ด้วยชีวมวลเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* และชีวมวลเห็ดนางฟ้า *Pleurotus sajor caju* พบว่า ลำดับความสามารถดูดซับ $2,4,6-TCP > 4-CP > 2-CP > \text{ฟีนอล}$ เนื่องจากสารประกอบคลอโรฟีนอลมีความสามารถละลายน้ำน้อยกว่าฟีนอลจึงทำให้มีความสามารถดูดซับที่ดีกว่า

ข. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น กรณีสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้นการดูดซับจะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งดูได้จากการดูดซับ PCP และ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่า

ความสามารถดูดซับ PCP สูงกว่า TCP เนื่องจาก PCP มีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP

ค. ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล

นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

ง. ผลของ $[H^+]$ หรือ pH

ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้วค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ ตัวอย่างเช่น การดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP ด้วยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (บ่อไม่เติมอากาศ) ความสามารถในการดูดซับของสารประกอบคลอโรฟีนิล โดยกากตะกอนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยการดูดซับ 4-CP และ 2,4-DCP เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง และการดูดซับฟีนิลด้วยกากตะกอนแห่งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH 6 ถึง 8

จ. ผลของอุณหภูมิ

ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

3) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับ จะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

2.5 สีย้อม [21-27]

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหินเมื่อน้ำมันปิโตรเลียม หรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟินซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำเรา จะสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อม มีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดกัน

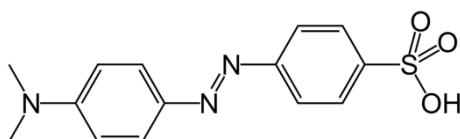
แน่นอน อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) , แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) , แรงไอออน (ionic force) และ พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีเชื่อม กับ โมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ การเกิดสีของสีเชื่อม สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกติมองเห็น ได้เกิดจาก การเรียงตัวของกลุ่มอะตอม ประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีเชื่อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่า “โครโมฟอร์” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso Group) กลุ่มไนโตร (Nitro Group) กลุ่มอะโซ (Azo Group) กลุ่มเอทิลีน (Ethylene Group) กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl Group) กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group) กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)

สีเชื่อม (Dyes) เป็นสารประกอบที่มีสี สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสีเชื่อมจะมีหมู่ฟังก์ชันที่ ทำให้เกิดสี เรียกว่า คลอโมฟอร์ (Chromophores) ได้แก่ azo group ($-N=N-$) , nitroso group ($-N=O$) , azoxy group ($-N=N-O-$) , nitro group (NO_2) เป็นต้น นอกจากนี้ สีเชื่อมยังมี ออกโซโครม (Auxochromes) ซึ่งเป็น หมู่ฟังก์ชันที่ยึดสีให้ติดกับผ้า ได้แก่ $-COOH$, $-NH_2$, $-SO_3H$, $-OH$ เป็นต้น

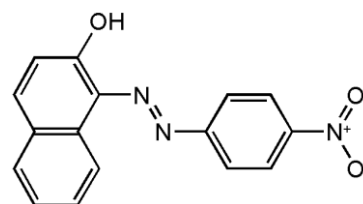
2.5.1 การจำแนกสีเชื่อมตามโครงสร้าง

เราอาจจำแนกสีเชื่อมตาม โครงสร้างของสีเชื่อมออกเป็นประเภทต่างๆ และมักเรียกชื่อ ตาม โครงสร้างหรือหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ใน โครงสร้างนั้น ตัวอย่างเช่น

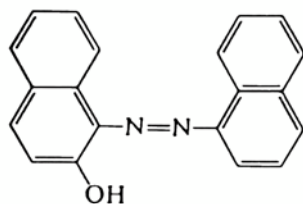
Azo dyes



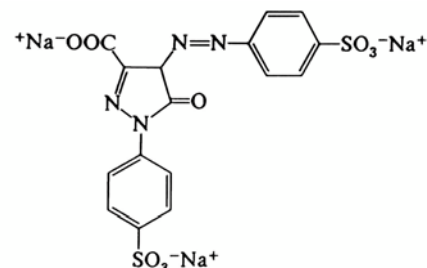
Methyl orange [24]



Para red [24]

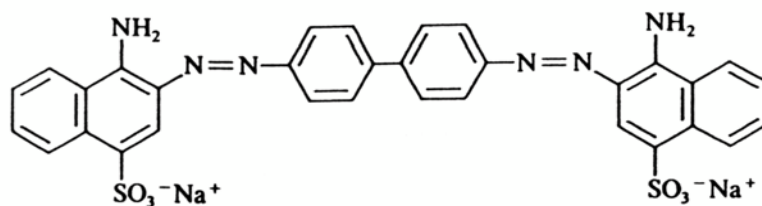


Naphthyl red [24]



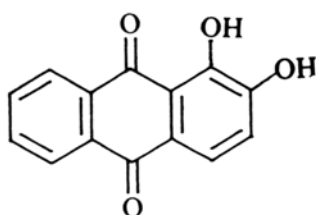
Tatrazine [24]

Disazo dyes

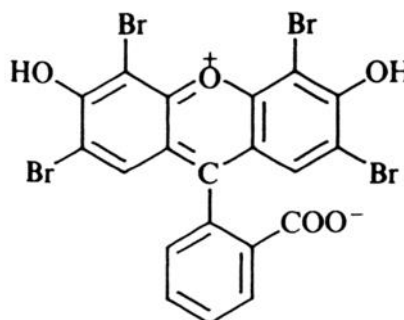


Congo red [24]

Anthraquinonoid dyes

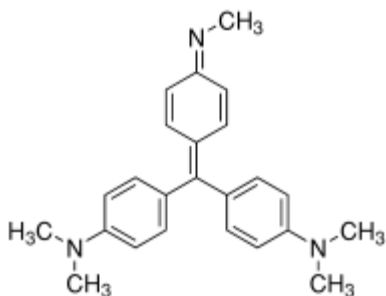


Alizarin [24]

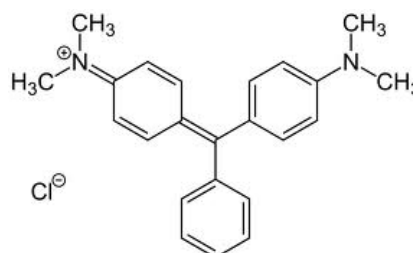


Eosin (Tetrabromofluorescein) [24]

Triphenylmethane dyes



Methyl violet [24]



Malachite green [24]

นายวิลเลียม เพอร์กิน (William Perkin) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษพบวิธีสังเคราะห์สีม่วงโดยบังเอิญ ส่งผลให้ในเวลาต่อมา นักวิทยาศาสตร์สามารถค้นพบวิธีสังเคราะห์สีใหม่ๆ นับร้อยสี ปัจจุบันมีการผลิตสีสังเคราะห์ออกมามากมาย และสามารถแบ่งสีออกได้หลายประเภท เพื่อให้เหมาะกับเส้นใยแต่ละชนิด และกระบวนการย้อมซึ่งมีลักษณะต่างกัน จึงมีการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีต่างๆ โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีตามการนำไปใช้ เพราะสีย้อมผ้าที่มีคุณภาพต้องมีความคงทนในการซัก มี

ความคงทนต่อแสง และต้องมีความคงทนต่อความร้อน ซึ่งกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งสีย้อมตามวิธีใช้ เป็น 12 ประเภท ได้แก่

1) สีดิสเพอร์ส (Disperse Dyes)

เป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด (cellulose acetate) และนำมาย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyester) ได้ด้วย เนื่องจากเส้นใยทั้งสองประเภทสามารถดูดน้ำได้น้อย สีดิสเพอร์สมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีซีดง่ายหากถูกควันหรือก๊าซบางชนิด สีประเภทนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) ที่เหมาะสม สามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

2) สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสถานะ สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

3) สีเบสิก (Basic Dyes)

เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (chromophore) ให้ประจุบวก (cation) บางครั้งเรียก สีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลสเส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสี ได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง

4) สีแอซิด (Acid Dyes)

คือ ตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์กรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยโพลีเอไมด์ (polyamide) เป็นต้น

5) สีเมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and Premetallized Dyes)

เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex) กับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่า โครงสร้างของเส้นใยจะสามารถ

รวมตัวกับไอออนของโลหะ ก่อรูปเป็นสารประกอบภายในทำให้สีมีความคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่า สีไครเรทท์ ส่วนที่เรียกว่า สีมอร์แดนท์ต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะเส้นใยโปรตีน

6) สีไครเรทท์ (Direct Dyes)

เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกๆ ที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งเรียกสีย้อมฝ้ายส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (AZO) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิก ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

7) สีเอโซอิก (Azoic Dyes)

เป็นสีในกลุ่มสารประกอบเอโซเหมือนกัน แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล (phenol) ซึ่งละลายน้ำได้ก่อน สีในกลุ่มนี้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

8) สีวัต (Vat Dyes)

เป็นสีที่มีความคงทนดีที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสม จึงจะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ อย่างไรก็ตามไม่ใช่สีวัตทุกตัวจะมีความคงทนเหมือนกัน นอกจากนี้สีวัตสามารถย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ด้วย

9) สีกำมะถัน (Sulphur or Sulphide Dyes)

สีประเภทนี้ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง สีชนิดนี้ไม่สโต

10) สีออกซิไดซ์ (Oxidation Colorants)

เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม

11) สีโอเนียม (Onium Dyes)

เป็นสีพิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ โดยเลือกพิกเมนต์ที่มีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและแสงนำมาปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อม

12) สีมินเนอรัล (Mineral Colorants)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำหลายชนิด นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

2.5.2 การบำบัดสีในน้ำทิ้ง

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่รังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธีดังนี้

1) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดที่ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้ คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดที่โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสี ย้อมถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้ไปอย่างสมบูรณ์ โดยใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนเช่น โพลีอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของ โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการในตรีพีเคชั่น

2) กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสีโดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

ก. ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

ข. ระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศและไม่มียูทิลิตี้รวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดินโดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

3) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการ ที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้อง

ผ่านการเผาและการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอช ก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงก็ตาม

4) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบ อินทรีย์เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำให้โมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนขึ้น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของ สีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มีประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

5) เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

ก. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้ในการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมสีดิสเพอร์สที่ใส่ย้อมเส้นใยประเภท โพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมสีซัลเฟอร์ สีแวก และสีอะโซอิกที่ใส่ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมดิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ข. ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับใช้กำจัดอออนสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตามสีย้อมที่ใส่ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

ค. ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนาไปใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคลิติก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

ง. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใส่ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สาร อิเล็กโทรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโตรไลต์เหล่านี้ ออกมาและนำกลับมาใช้ได้ด้วย

6) เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้น มีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆ กัน แต่มีวัตถุประสงค์เดียวกันคือเพื่อลดผลกระทบต่างๆ ให้เหลือน้อยที่สุด ตัวอย่าง เช่น

ก. ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงานประสิทธิภาพในการกำจัดสีก่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกันดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

ข. ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กโตรไลซิสที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีน และไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันนัลไว้แลกเปลี่ยนไอออน หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Jame และ R.S. Rao [13] ได้ทำการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบแกลบ พบว่าแกลบประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน คือ เถ้าแกลบ 20 % เซลลูโลส (Cellulose) 38 % ลิกนิน (Lignin) 22 % เพนโทส (Pentose) 18 % และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ 2 %

F. Adam [14] ได้ทำการศึกษาร้อยละขององค์ประกอบของเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบ พบว่า เถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide, SiO_2) มากกว่า 94 %

สรารุช ศรีคุณ [28] ได้ศึกษาคุณสมบัติการดูดซับสีข้อมและไอออนโลหะตะกั่ว ด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนด้วยกระบวนการคาร์บอนในเซชันสองแบบ คือ กระบวนการคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและภายใต้ความดันสูญญากาศ และทำการกระตุ้นต่อดัวยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาผลของการบำบัดถ่านกัมมันต์ด้วยสารเคมี ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันภายใต้ความดันสูญญากาศมีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ประสิทธิภาพในการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการคาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน การบำบัดถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อ

ลิตร จะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ประสิทธิภาพการดูดซับไอโอดีนและเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 แบบดีขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียนและบำบัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร สามารถดูดซับสีเขียวเบสิกกรีน 4 (BasicGreen 4) ได้มากกว่าสีแอซิดบลู 113 (Acid Blue 113) และสีไดเร็กต์บลู 80 (Direct Blue 80) พบว่า ไอโซเทอมการดูดซับสีเขียวเบสิกกรีน 4 และไอออนโลหะตะกั่ว (Pb^{2+}) สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ประสิทธิภาพการดูดซับสีเขียวเบสิกกรีน 4 และไอออนโลหะตะกั่วของถ่านกัมมันต์ที่คาร์บอนในเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเท่ากับ 312.50 และ 7.97 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตามลำดับ ส่วนประสิทธิผลการดูดซับสีเขียวเบสิกกรีน 4 และไอออนโลหะตะกั่วของถ่านกัมมันต์ที่คาร์บอนในเซชันภายใต้ความดันสูญญากาศ เท่ากับ 312.50 และ 8.43 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสองแบบสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo Second Order)

พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และคณะ (2551) [29] ได้ศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับจากแกลบ 3 ชนิด ได้แก่ แกลบไม่ต้มกรด แกลบต้มกรด และซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรด เพื่อเปรียบเทียบหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทำการทดลองด้วยชุดปั่นกววนจากเครื่องกววนแม่เหล็กไฟฟ้าและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรดเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการดูดซับ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรด โดยการดูความเป็นผลึกด้วยวิธีการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรดมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกของซิลิกาคลอไรด์และบางส่วนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานและจากการตรวจวัดปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรด โดยวิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ พบว่าประกอบด้วย ซิลิกาออกไซด์ ร้อยละ 92.50 และจากการตรวจวัดพื้นที่และปริมาตรของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที พบว่าพื้นที่ผิวของซิลิกาที่สกัดจากแกลบไม่ต้มกรดเท่ากับ 223.4 ตารางเมตรต่อกรัมของตัวดูดซับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนเท่ากับ 30.98 อังสตรอม จากการศึกษาการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยซิลิกาจากแกลบ พบว่าระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคือ 7 ชั่วโมง และผลการศึกษาสมการไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟลูคคิซได้สมการเป็น $q_e = \frac{158.7301C_e}{6.1111 - C_e}$ และ $q_e = 0.3310C_e^{0.4289}$ ตามลำดับ และมีค่า R^2 ของการดูดซับสมการ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟลูคคิซ คือ 0.7746 และ 0.7621 ตามลำดับ

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543) [30] ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสอายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี ในขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันตัวแปรคือ อุณหภูมิและเวลา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชันของไม้ทั้งสองชนิด คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที และขั้นการกระตุ้นถ่านคาร์บอน โดยตัวแปรคืออุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และชนิดของก๊าซในการกระตุ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นของถ่านคาร์บอนจากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี อยู่ที่สภาวะเดียวกันคือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ขนาดอนุภาค 0.3 - 0.6 มิลลิเมตร และใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 5 ปี คือ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 6.37 ร้อยละผลิตภัณฑ์ 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบแลงเมียร์ 1497.32 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีที 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บีกเกอร์ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
2. ไมโครปิเปต
3. แท่งแก้วคนสาร
4. ขวดสีชาขนาด 100 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่ง (Mettler Toledo รุ่น AX 205 ที่มีความแม่นยำ ± 0.0001 กรัม)
6. เครื่องเขย่า (ZHICHENG รุ่น ZHWY-100B)
7. เครื่อง UV-Spectrophotometer
8. เครื่อง Centrifuge (GEMMY รุ่น PLC-012 series)
9. ตู้อบ
10. เตาเผา
11. ตะแกรงขนาดรู 125 ไมโครเมตร
12. ขวดน้ำกลั่น
13. ขวดปริมาตรขนาด 250 และ 1000 มิลลิลิตร
14. โกร่งบดสาร

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. สารละลายกรดฟอสฟอริก
3. สี้อม Congo red

3.3 การเตรียมสารเคมีสำหรับการทดลอง

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.0 โมลาร์

ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ 120.00 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

- สารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 3.0 โมลาร์

เปิดสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 85 % โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาณ 204.7 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร

- การทำกราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red สำหรับการดูดซับ

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm โดยชั่งสี้อม Congo red 0.5 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน
2. เตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 10,20,30,40,50,60 และ 70 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm
3. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร
4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Congo red กับค่าการดูดกลืนแสง

3.4 การเตรียมตัวดูดซับ

3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์จากแกลบที่ผ่านการล้างด้วยเบส

1. นำแกลบ 100 กรัม มาต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3.0 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. ล้างแกลบที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ชั่งแกลบที่ผ่านการอบ 22 กรัม ใส่ชามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C
4. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของการเผาเป็น 700 °C ได้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

3.4.2 การเตรียมตัวดูดซับซิลิกาจากแกลบที่ผ่านการล้างด้วยกรด

1. นำแกลบจำนวน 100 กรัม มาต้มกับสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 3.0 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
2. ล้างแกลบที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งมีค่า pH ประมาณ 7 แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ชั่งแกลบที่ผ่านการอบ 22 กรัม ใส่ชามระเหย นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 125 ไมโครเมตร ได้เป็นซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C
4. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอุณหภูมิของการเผาเป็น 700 °C ได้เป็นซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

3.4.3 การหาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

1. ชั่งตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C 0.2 กรัม ใส่ในขวดสีชา 12 ขวด
2. เตรียมสารละลาย Congo red ความเข้มข้น 60 ppm ใส่ในขวดสีชาในข้อ 1 ขวดละ 20 มิลลิลิตร
3. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 °C
4. เก็บตัวอย่างทุก 15 นาที ใน 90 นาทีแรกและทุก 30 นาที ใน 180 นาทีต่อมา
5. นำสารละลายตัวอย่างมาแยกตัวดูดซับ โดยการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 4 นาที
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการแยกตัวดูดซับ และคำนวณความเข้มข้นของ Congo red ที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน
7. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณดูดซับจำเพาะจากสมการ

$$q = \left[\frac{C_0 - C_e}{m} \right] \times V$$

เมื่อ q = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สถานะสมดุล ($\mu\text{g/g}$)

C_0 = ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red ก่อนการดูดซับ ($\mu\text{g/ml}$)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red หลังการดูดซับ ($\mu\text{g/ml}$)

m = น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ (ml)

8. ชั่งตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C 0.2 กรัม ใส่ในขวดสีชา 4 ขวด

9. เตรียมสารละลาย Congo red ความเข้มข้น 20 ppm ใส่ในขวดสีชาในข้อ 8 ขวดละ 20 มิลลิลิตร
10. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 180 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35 °C
11. เก็บตัวอย่างทุก 60 นาที มาแยกตัวดูดซับโดยการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก ที่ความเร็วรอบ 2500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 4 นาที
12. นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการเหวี่ยงแยกมาวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย และคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ Congo red ที่เหลือในสารละลายจากกราฟมาตรฐาน
13. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณดูดซับจำเพาะ
14. ทำการทดลองข้อ 8 - 13 ซ้ำ โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย Congo red จาก 20 ppm เป็น 30,40 และ 50 ppm
15. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับเป็นเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C , ซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C และซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

3.4.4 การตรวจหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง

นำตัวดูดซับที่เตรียมไว้แล้วทั้ง 4 ตัว ไปตรวจหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง

จากการนำตัวคุณชนิดต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer, Philips model PW2400 แสดงดังตารางที่ 4.1

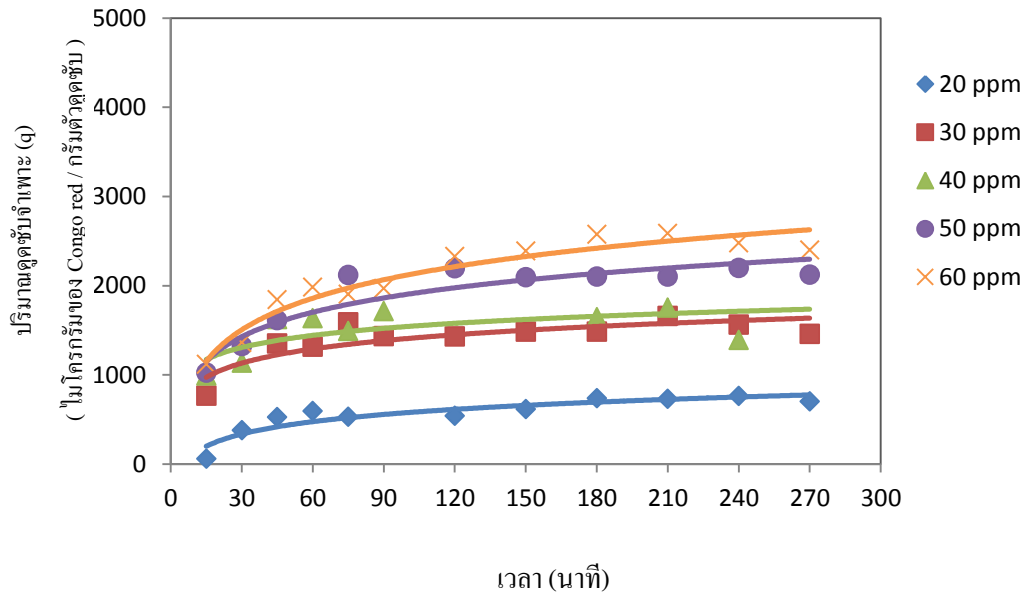
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer (XRF)

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)*													
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO	BaO
ตัวดูดซับซิลิกาเผาที่ 450 °C	<0.01	0.06	0.08	57.09	1.78	<0.01	<0.01	0.04	0.07	0.02	0.04	<0.01	<0.01	<0.01
ตัวดูดซับซิลิกาเผาที่ 700 °C	0.04	0.13	0.06	71.07	1.51	<0.01	<0.01	0.12	0.15	0.03	0.04	<0.01	<0.01	<0.01
ตัวดูดซับคาร์บอนเผาที่ 450 °C	10.30	1.56	0.05	3.22	0.11	0.36	0.05	0.38	5.59	1.37	0.36	0.01	0.03	0.07
ตัวดูดซับคาร์บอนเผาที่ 700 °C	31.65	5.30	0.13	13.50	0.18	2.76	0.23	1.57	18.73	4.20	1.26	0.01	0.04	0.22

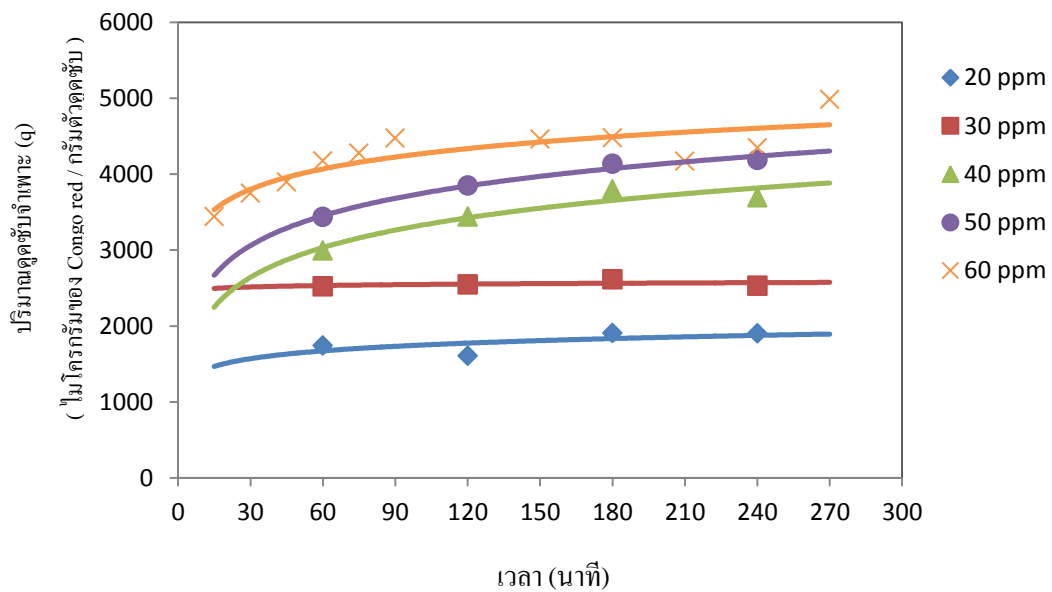
หมายเหตุ * 1. ปริมาณธาตุหาโดยวิธี Theoretical formulas, “fundamental parameter calculations”
2. ปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ได้คำนวณค่าให้อยู่ในรูป oxide ของธาตุนั้นๆ

4.2 การหาสมมูลการดูดซับสารละลาย Congo red

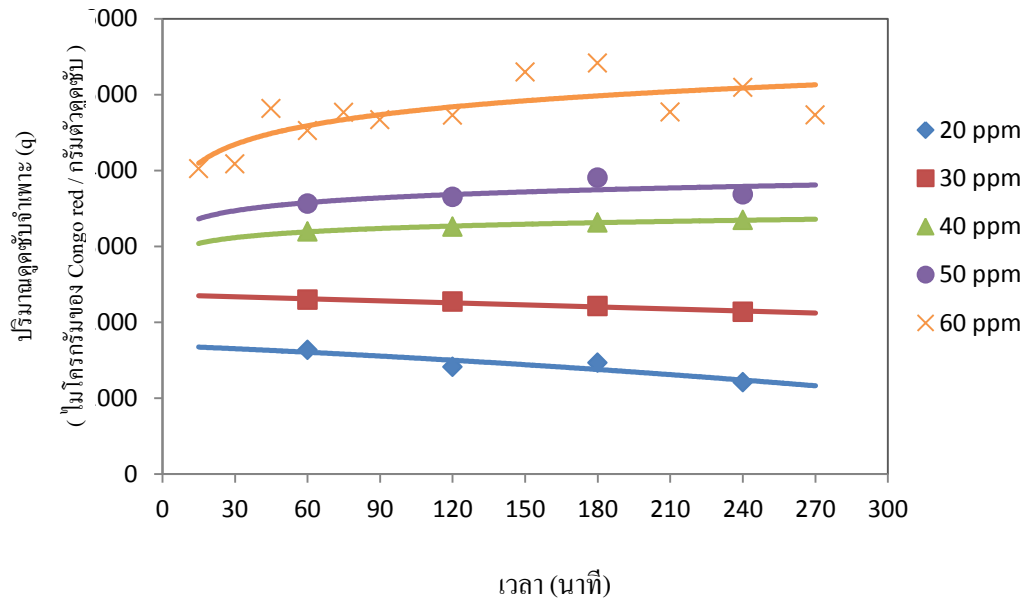
จากการดูดซับสารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 , 30 , 40 , 50 และ 60 ppm ด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ สามารถวัดปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.1 – 4.4



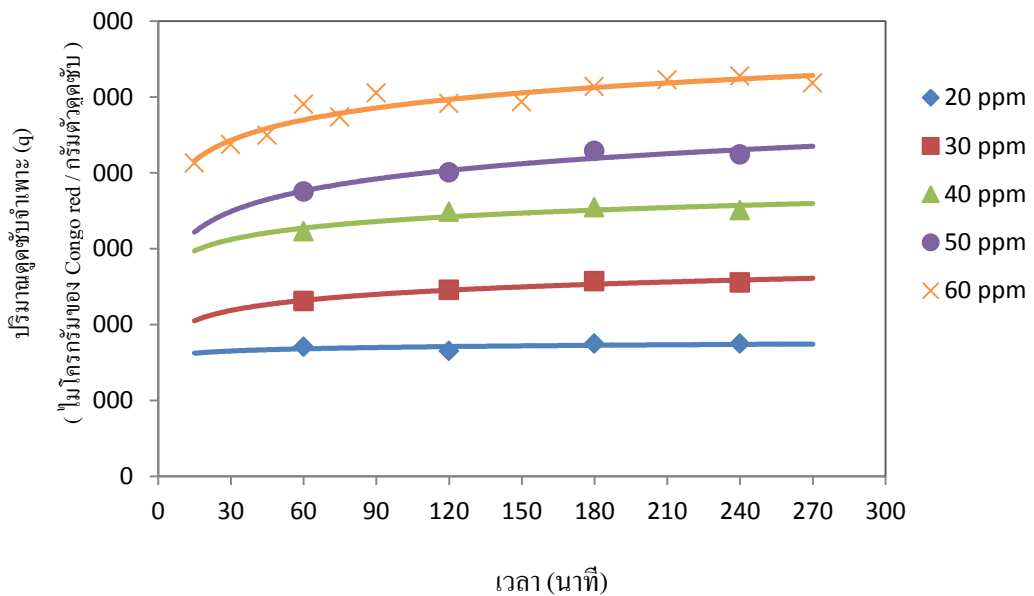
รูปที่ 4.1 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C



รูปที่ 4.2 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C



รูปที่ 4.3 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C



รูปที่ 4.4 ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาต่าง ๆ ของตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

จากรูปที่ 4.1 – 4.4 พบว่าการดูดซับสารละลาย Congo red ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดที่เตรียมจาก แกลบเข้าสู่สมดุลภายใน 150 นาที และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย Congo red จาก 20 ppm เป็น 60 ppm ส่งผลให้ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Congo red สูงขึ้นทำให้มีแรงขับเคลื่อนที่มากขึ้น ปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุล และความเข้มข้นที่สมดุล ที่ความเข้มข้น เริ่มต้นต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 – 4.5

ตารางที่ 4.2 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ Congo red (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
20	659	14.16
30	1513	17.88
40	1625	24.43
50	2135	29.12
60	2456	34.38

ตารางที่ 4.3 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นของ Congo red (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
20	1806	1.51
30	2565	2.82
40	3646	5.62
50	4057	10.39
60	4587	12.38

ตารางที่ 4.4 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

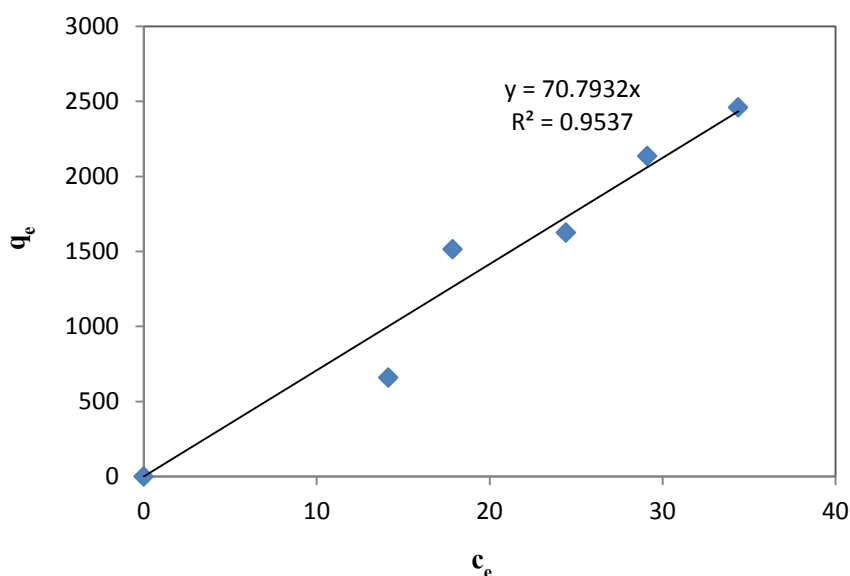
ความเข้มข้นของ Congo red (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
20	1364	7.24
30	2208	8.01
40	3308	7.74
50	3746	11.72
60	4958	9.84

ตารางที่ 4.5 ปริมาณดูดซับจำเพาะและความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลาย Congo red ที่ผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ

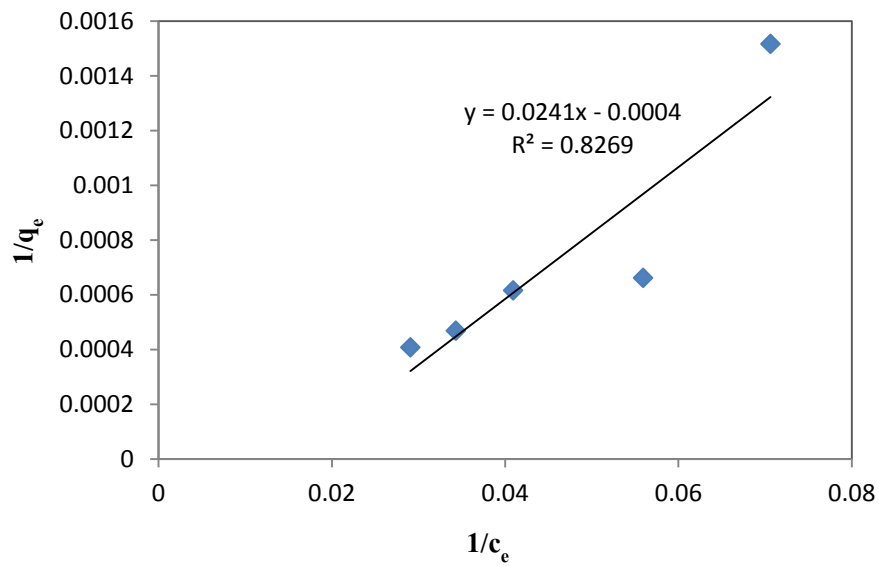
ความเข้มข้นของ Congo red (ppm)	ปริมาณดูดซับจำเพาะเข้าสู่สมดุล (q_e) (ไมโครกรัมของ Congo red/กรัมตัวดูดซับ)	ความเข้มข้นเข้าสู่สมดุล (c_e) (ppm)
20	1719	3.32
30	2528	4.41
40	3514	4.45
50	4177	6.44
60	5102	8.16

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับโดยใช้สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

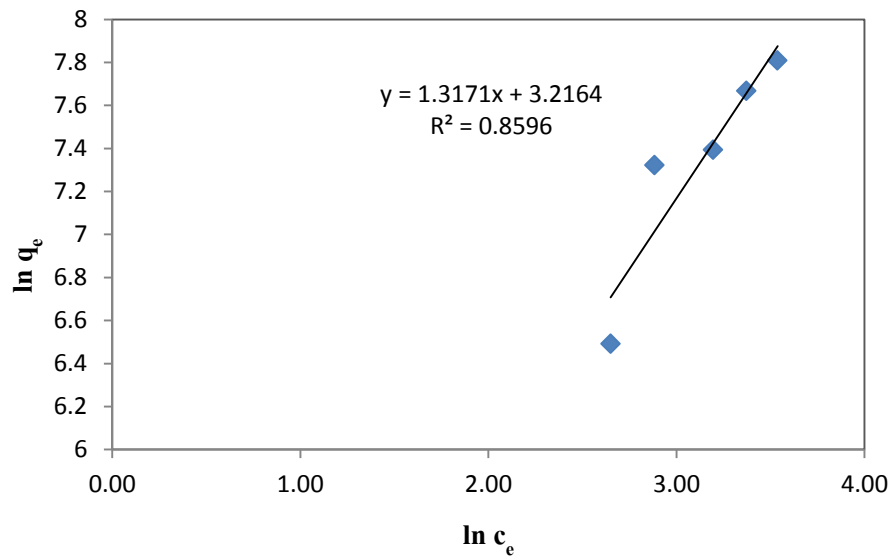
เมื่อพิจารณาผลการทดลองการดูดซับสารละลาย Congo red บนตัวดูดซับที่เตรียมจากแคลบสามารถอธิบายผลการทดลองได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ 3 สมการ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Linear แบบ Langmuir และแบบ Freundlich ซึ่งจากการวิเคราะห์สมการแบบ Linear แบบ Langmuir และแบบ Freundlich ให้เป็นสมการเชิงเส้น ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 - 4.16 โดยสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ ค่า R^2 และค่า χ^2 ของการดูดซับ แสดงดังตารางที่ 4.6 - 4.7



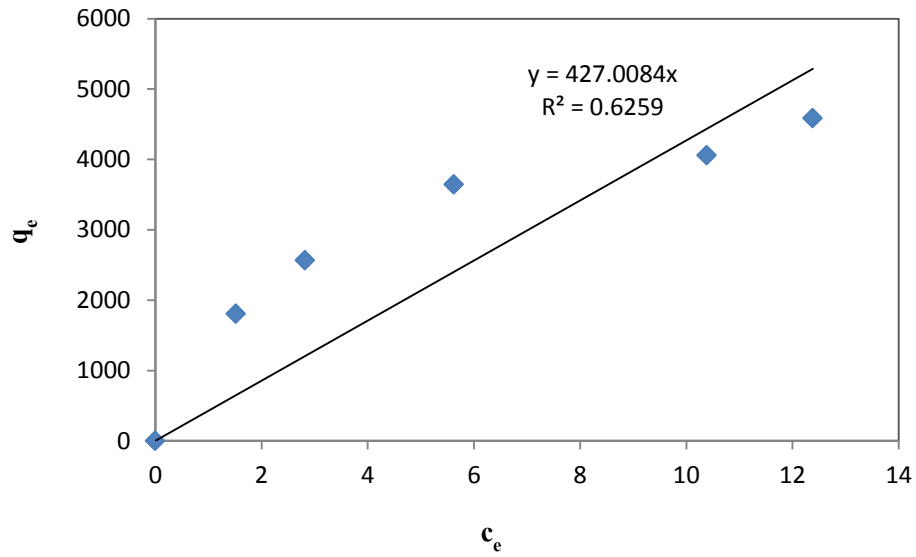
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



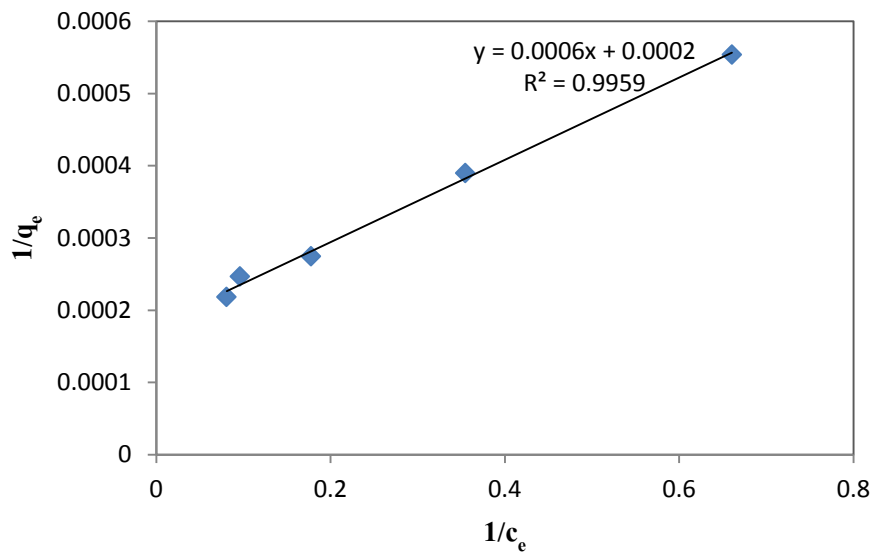
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



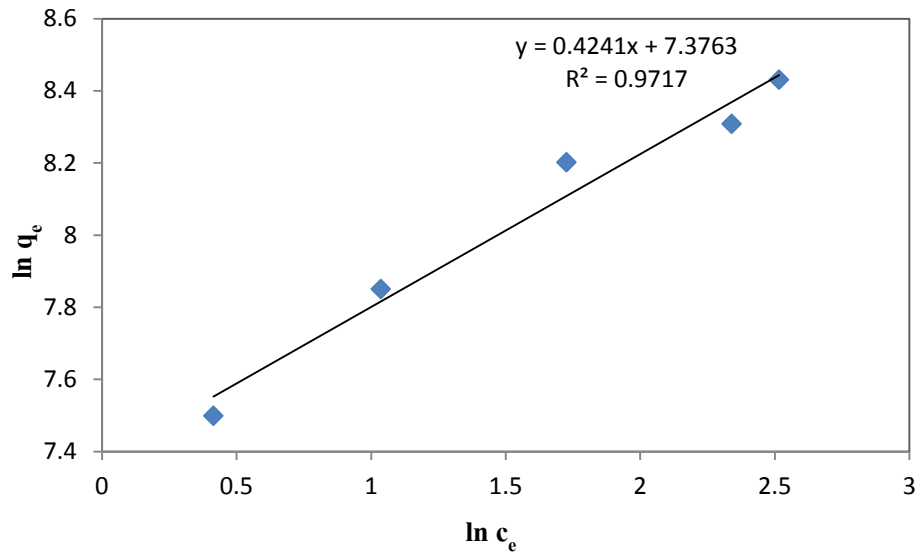
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



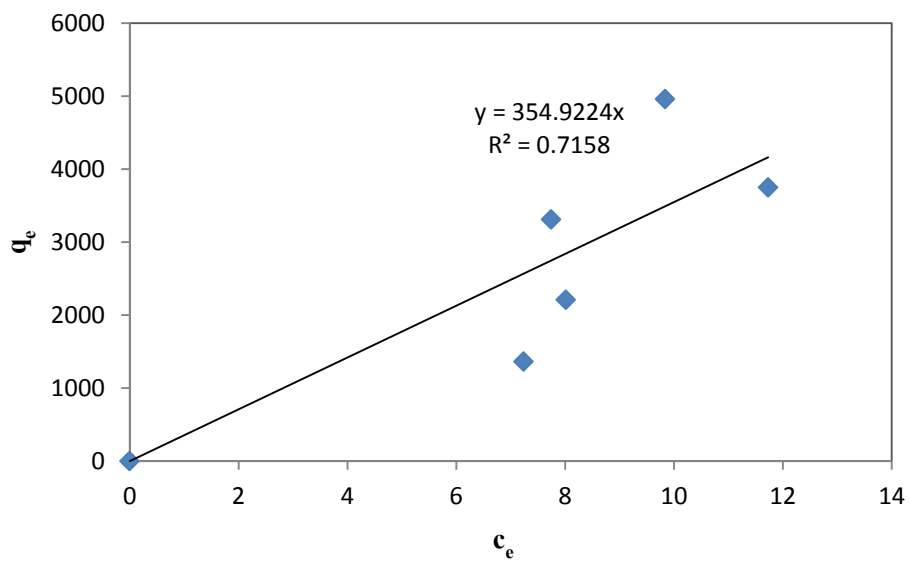
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



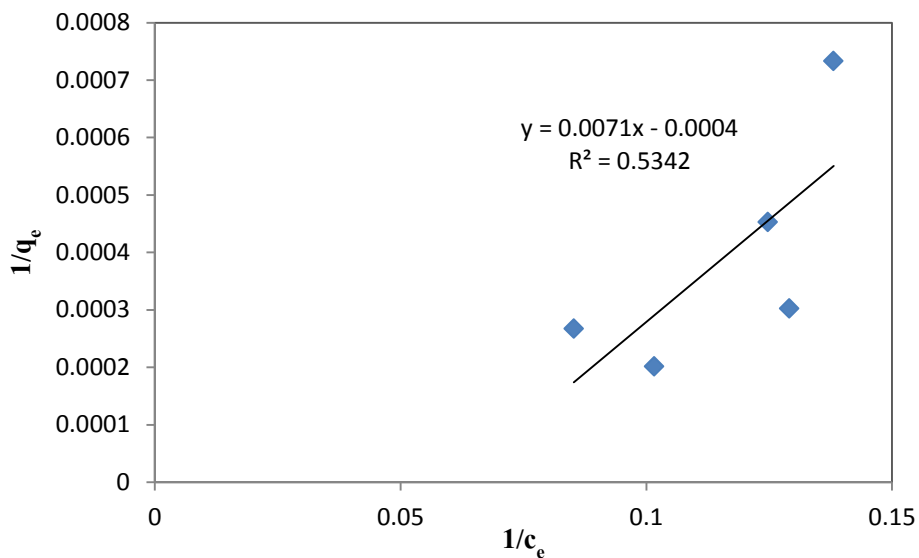
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



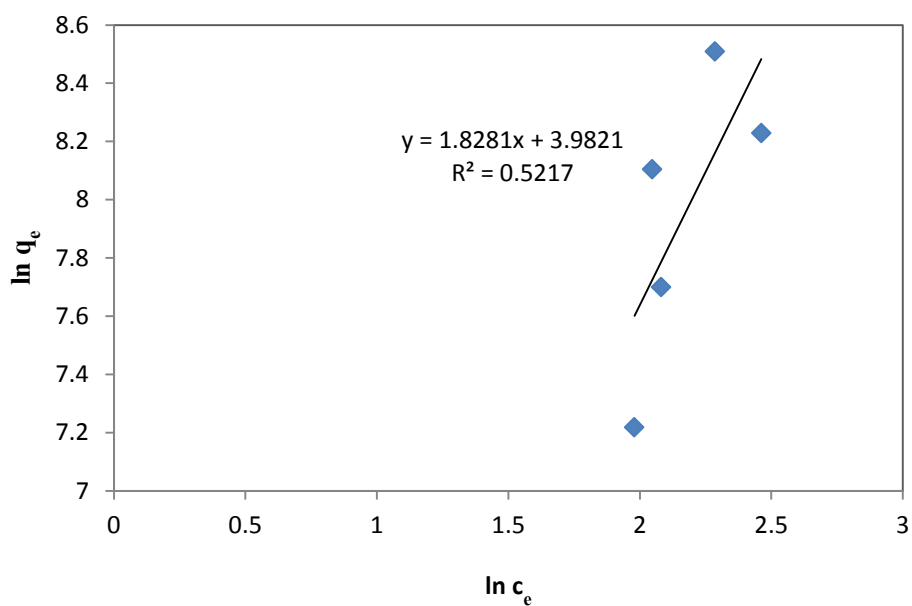
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



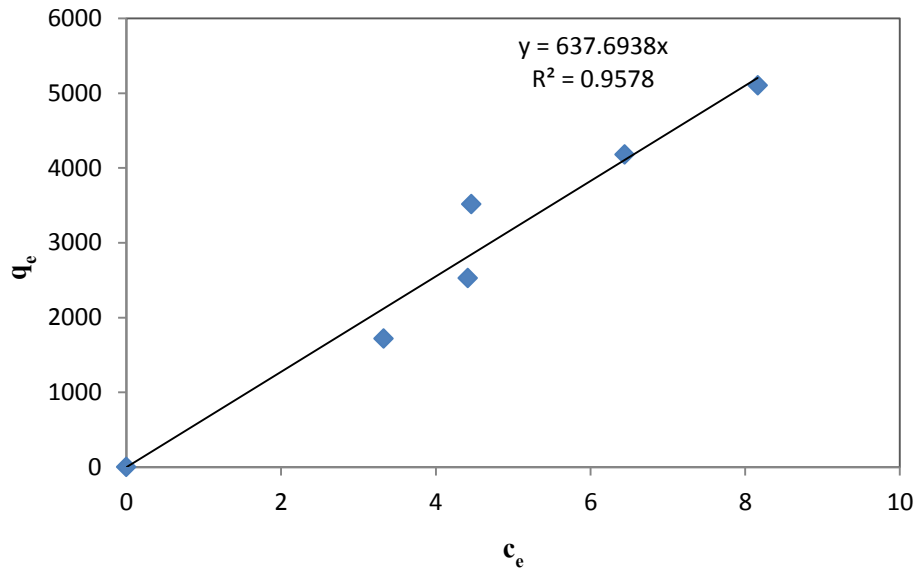
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซัลฟิดาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



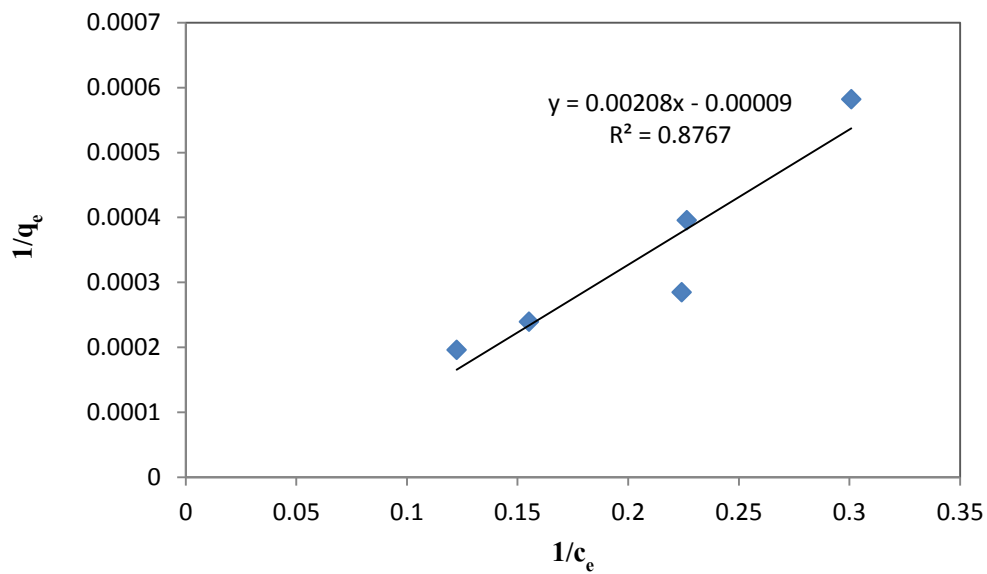
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซลิคาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



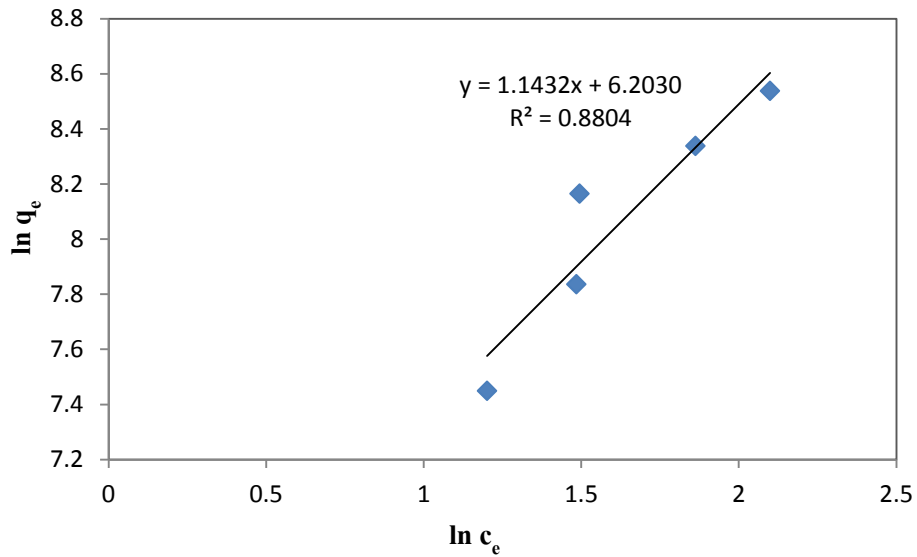
รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซลิคาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich



รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์ห้ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซลิคาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Linear



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ห้ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซลิคาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Langmuir



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดซับสีย้อม Congo red บนตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ด้วยสมการแบบจำลอง Freundlich

ตารางที่ 4.6 ไอโซเทอมของแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

ชนิดของ ตัวดูดซับ	แบบจำลองของ Linear	แบบจำลองของ Langmuir	แบบจำลองของ Freundlich
1.*	$q_e = 70.79c_e$	$q_e = \frac{2500c_e}{(9.64 \times 10^{-6}) - c_e}$	$q_e = 24.93c_e^{1.317}$
2.*	$q_e = 427.01c_e$	$q_e = \frac{5000c_e}{(1.20 \times 10^{-7}) + c_e}$	$q_e = 1,597.19c_e^{0.424}$
3.*	$q_e = 354.92c_e$	$q_e = \frac{2500c_e}{(2.84 \times 10^{-4}) - c_e}$	$q_e = 53.62c_e^{1.828}$
4.*	$q_e = 637.69c_e$	$q_e = \frac{11,111.11c_e}{23.11 - c_e}$	$q_e = 494.23c_e^{1.143}$

- หมายเหตุ *
1. คือ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C
 2. คือ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C
 3. คือ ตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C
 4. คือ ตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ ค่า R^2 และค่า χ^2 ของแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบต่างๆ

ชนิดของ ตัวดูดซับ	แบบจำลองของ Linear			แบบจำลองของ Langmuir				แบบจำลองของ Freundlich			
	K_H	R^2	χ^2	q_{max}	K_L	R^2	χ^2	K_F	n	R^2	χ^2
1.*	70.79	0.9537	175	2500	9.64×10^{-6}	0.8269	461	24.93	1.317	0.8596	189
2.*	427.01	0.6259	4,386	5000	1.20×10^{-7}	0.9959	150	1,597.19	0.424	0.9717	55
3.*	354.92	0.7158	1,479	2500	2.84×10^{-4}	0.5342	2,416	53.62	1.828	0.5217	1,549
4.*	637.69	0.9578	266	11,111.11	23.11	0.8767	449	494.23	1.143	0.8804	286

หมายเหตุ *1.คือ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C, 2.คือ ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C, 3.คือ ตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 450 °C, 4.คือ ตัวดูดซับซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับพบว่า ตัวดูดซับซัลฟิดาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุด จากการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer มีปริมาณธาตุ SiO₂ 71.01 %wt และมีปริมาณดูดซับจำเพาะได้มากที่สุด 5102 ไมโครกรัม Congo red ต่อกรัมซัลฟิดาที่เผาที่อุณหภูมิ 700 °C ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น 20 ppm และใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับเร็วที่สุดคือ 90 นาที จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโดยใช้สมการของ Linear ได้ความสัมพันธ์ คือ $q_e = 637.69c_e$ สมการ Langmuir ได้ความสัมพันธ์ คือ $q_e = \frac{11,111.11c_e}{23.11 - c_e}$ และสมการ Freundlich ได้ความสัมพันธ์ คือ $q_e = 494.23c_e^{1.143}$ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) จากสมการ Linear สมการ Langmuir และสมการ Freundlich คือ 0.9578, 0.8767 และ 0.8804 ตามลำดับ และค่าการทดสอบไคสแควร์ (χ^2) จากสมการ Linear สมการ Langmuir และสมการ Freundlich คือ 266, 449 และ 286 ตามลำดับ พบว่าข้อมูลการทดลองนี้สามารถอธิบายด้วยแบบจำลอง Linear ซึ่งมีค่า R^2 สูงกว่าและ χ^2 ต่ำกว่าแบบจำลอง Langmuir และ Freundlich

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาโดยการเปลี่ยนชนิดของสีย้อมที่มีคุณสมบัติต่างกับสีย้อม Congo red เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ
2. ควรศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์และซัลฟิดาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น
3. ควรปรับปรุงคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์และซัลฟิดาที่เตรียมจากแกลบเพื่อให้อาจมีความสามารถในการดูดซับมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] นิ่ม จงเทพ , ประจวบ อินทะญาติ, พรพรรณ อินทร์ใจเอื้อ.การดูดซับสารละลายสีข้อม Cong red โดยวัสดุทางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547 .
- [2] สุภาภรณ์ ดอกไม้ศรีจันทร์, การเตรียมซลิคาเจลจากแกลบข้าวเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. 2550.
- [3] ซลิคา[Online]. Available: www.vcharkarn.com/include/vcafe/showkratoo.phpMPid .
- [4] ชาดา ศิริพัฒนานนท์, ศิริพร ร่วมจินดา, การผลิตถ่านกัมมันต์แบบเม็ดโดยเตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.2551.
- [5] กรมวิทยาศาสตร์บริการ, การศึกษาเรื่องการทำคาร์บอนกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, รายงานกิจกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ, ฉบับที่ 38, 2525
- [6] Kadirvalu, K., Palanival, M., Kalpana, R., Rajeswari, S., 2000. “Activated carbon from an agricultural by-product, for treatment od dyeing industry wastewater”. Journal of Bioresource Technology, Vol. 74
- [7] Hassler J.W. Purification with Activated Carbon. New York. Chemical Publishinh Co.Inc.n 1974.
- [8] กมลชนก ปานสง่า และคณะ.การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากกระดูกไก่.ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [9] Mckay, G., Blair, H.S. and Gardener, Adsorption of Dyes on Chitin. I. Equilibrium Studies. Journal of Applied Polymer Science, Vol.27,pp.3043-3057.
- [10] Charles, N., Satterfield, 1991, Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice.2nd ed., New York : McGraw-Hill Book Company,31-50.
- [11] Noll, K.E., Gounarios, V. and Hou, W., 1992,Adsorption Technology for Air and Water pollution Control.Michigan,Lewis,pp.199-216.
- [12] Oscik, J., Adsorption.New York,John Wiley & Soms,
- [13] J.James, M.S. Rao, Am. Ceram. Soc. Bull. 65 (1986) 1177.
- [14] F. Adam, The preparation and Adsorption Studies on Silica from Rice Husk Ash, Ms thesis, Univeriti Sains Malaysia, Penang, Malaysia, 1991.
- [15] กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorptio-process/>

- [16] Gregg, S.J. and Sing, S.K.W., (1967). Adsorption, Surface Area and Porosity. London and New York: Academic Press
- [17] McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P. (1993). Adsorption; Operation of Chemical Engineering. Mc-Graw Hill.
- [18] Gregg and Sing, 1967; Rouqurol F., Rouqurol J. and Sing, 1999
- [19] Adsorption by Powders and Porus Solids (19)” โดย Rouquero F., Rouquero J. and Sing, 1999, London: Academic Press.
- [20] Wu, F., Tseng, R. and Juang, R. (2001). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reaction dyes and metal ions on chitosan. Water Research. 35. 613-618.
- [21] วิมลโรจน์ โอสถานุเคราะห์ , สมบัติการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้แร่ดินร่วมกับสารจับก้อนเคมี, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. คณะวิทยาศาสตร์ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวะ แวดล้อม.2536
- [22] สีย้อมการบำบัดน้ำทิ้ง http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm
- [23] การจำแนกสีย้อม http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?passTo=925bb09fb493ae6349931312a4ca2ef6&pageid=6&bookID=370&read=true&count=true
- [24] ประเภทสีย้อม <http://www.scientific-web.com/en/Chemistry/Biographies/WilliamPerkin01.html>
- [25] คุณสมบัติของสีประเภทต่าง ๆ
http://www.tangti.com/page.php?module=news_detail&news_id=71
- [26] Tchobanoglous, G., Borton, F.L. and Stensel, H.D., (2003). Waste Water Engineering Treatment and Reuse. 4. New York. Mc-Graw Hill. 1146-1155.
- [27] Fernando, M., and Pereira, R., 2003. “Adsorption od dyes on activated carbon: influence of surface chemical groups”, Journal of Carbon, Vol. 41
- [28] สราวุธ ศรีคุณ, “การศึกษาการดูดซับสีย้อมและไอออนโลหะตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกทุเรียน”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2551
- [29] ณพวงศ์ เทียรหมโรจนกุล , “การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากเกลบ”. ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2551
- [30] วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh โดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนขวยคียง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

- [31] D.W. Green, R.H. Perry, Perry's Chemical Engineers' Handbook. Chapter 16, McGraw Hill, 8th edition, 2008.

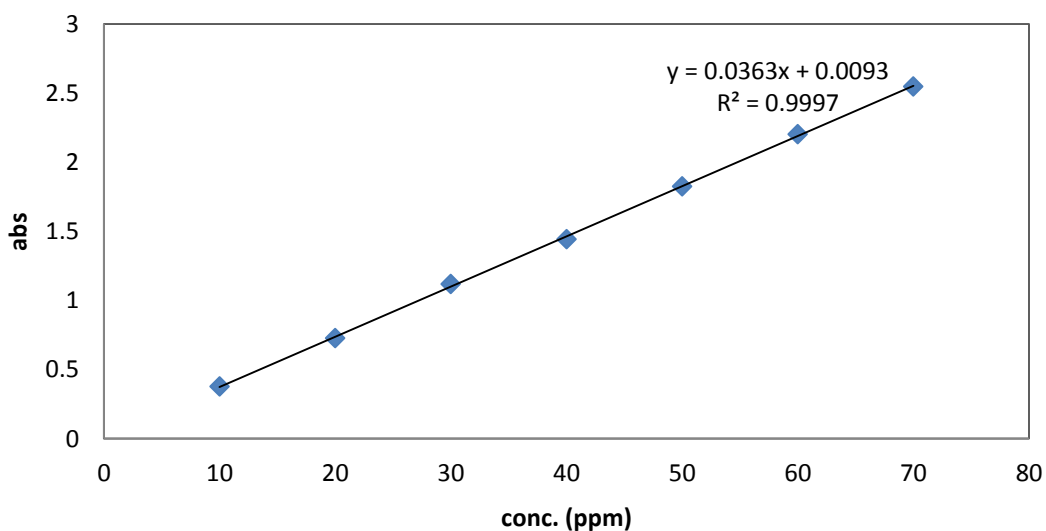
ภาคผนวก ก

ข้อมูลกราฟมาตรฐาน

จากการเตรียมสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 10 , 20 , 30 , 40 , 50 , 60 และ 70 ppm โดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐาน Congo red เข้มข้น 500 ppm วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย Congo red กับค่าการดูดกลืนแสงดังรูปที่ ก.1 ได้สมการเส้นตรง คือ $y = 0.036x + 0.009$, $R^2 = 0.999$

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลมาตรฐานความเข้มข้นของสารละลาย Congo red (ppm) และค่าการดูดกลืนแสง

conc. (ppm)	abs
10	0.376
20	0.726
30	1.117
40	1.443
50	1.825
60	2.202
70	2.546



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานสารละลาย Congo red

ภาคผนวก ข
ข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 20 ppm ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	0.788	0.1996	58.19
30	0.797	0.1996	377.78
45	0.819	0.1999	526.85
75	0.565	0.2002	592.89
90	0.518	0.2003	528.31
120	0.578	0.2004	541.55
150	0.555	0.2005	616.05
180	0.539	0.2005	736.10
210	0.606	0.2006	731.36
240	0.511	0.2007	760.99
270	0.605	0.2008	700.02

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 30 ppm ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	0.920	0.2008	767.30
45	0.710	0.2005	1349.40
60	0.723	0.2005	1315.23
75	0.624	0.2004	1588.49
90	0.682	0.2001	1431.69
120	0.683	0.1999	1429.42
150	0.741	0.1998	1482.96
180	0.664	0.1997	1484.63
210	0.601	0.1995	1660.63
240	0.748	0.1994	1563.95
270	0.675	0.1990	1458.22

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 40 ppm ตัวดูดซับ
คาร์บอนกัมมันต์ 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.115	0.2006	991.47
30	1.063	0.2004	1136.62
45	0.888	0.2003	1623.49
75	0.885	0.2000	1634.26
90	0.937	0.1999	1490.56
120	0.857	0.1999	1711.97
180	0.882	0.1997	1644.13
210	0.843	0.1997	1754.48
240	0.974	0.1996	1389.82

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 50 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.456	0.2008	1023.68
30	1.348	0.2007	1323.15
45	1.245	0.2004	1611.59
75	1.063	0.2002	2118.25
120	1.036	0.2000	2193.52
150	1.074	0.1997	2092.95
180	1.071	0.1997	2100.37
210	1.071	0.1996	2101.43
240	1.036	0.1996	2197.91
270	1.065	0.1992	2123.77

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 60 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	1.728	0.2007	1118.31
30	1.640	0.2003	1359.80
45	1.470	0.2003	1840.76
60	1.418	0.2001	1983.27
75	1.447	0.1999	1902.80
90	1.425	0.1998	1967.25
120	1.295	0.1998	2326.40
150	1.274	0.1997	2388.30
180	1.208	0.1994	2574.39
210	1.363	0.1994	2584.606
240	1.329	0.1993	2479.047
270	1.272	0.1992	2398.48

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 20 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 700 ° C

เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.087	0.1999	1741.61
120	0.135	0.2001	1606.60
180	0.026	0.2004	1905.45
240	0.031	0.1992	1904.84

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 30 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 700 ° C

เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.122	0.2008	2524.16
120	0.113	0.2008	2549.06
180	0.089	0.2007	2613.99
240	0.119	0.2007	2531.88

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 40 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 700 ° C

เวลา (นาท)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.442	0.2007	2995.07
120	0.280	0.2007	3441.66
180	0.152	0.2006	3800.64
240	0.190	0.2006	3694.47

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 50 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 700 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.604	0.2004	3437.57
120	0.458	0.2000	3849.07
180	0.356	0.1998	4136.54
240	0.341	0.1994	4186.63

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 60 ppm
ตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ 700 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	0.861	0.2009	3441.92
30	0.751	0.2009	3747.95
45	0.698	0.2006	3898.49
60	0.599	0.2005	4175.67
75	0.563	0.2004	4278.48
90	0.492	0.2003	4476.62
150	0.498	0.2001	4464.43
180	0.493	0.2001	4478.32
210	0.606	0.1998	4169.91
240	0.543	0.1997	4348.19
270	0.318	0.1992	4986.61

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 20 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.169	0.2009	1636.16
120	0.252	0.1999	1412.74
180	0.233	0.1997	1467.94
240	0.326	0.1993	1210.72

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 30 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.262	0.2008	2298.22
120	0.272	0.2008	2271.47
180	0.295	0.2001	2214.63
240	0.323	0.1999	2139.03

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 40 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.323	0.2008	3196.47
120	0.304	0.2002	3260.63
180	0.288	0.1997	3313.30
240	0.275	0.1997	3349.47

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 50 ppm ตัวดูดซับซิติ
 กา 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.500	0.1996	3561.75
120	0.471	0.1992	3649.78
180	0.381	0.1991	3903.68
240	0.460	0.1991	3683.24

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 60 ppm ตัวดูดซับซิติ
 กา 450 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	0.694	0.2009	4021.72
30	0.676	0.2001	4086.85
45	0.414	0.2000	4815.74
60	0.520	0.1998	4525.82
75	0.435	0.1997	4766.41
90	0.471	0.1996	4668.60
120	0.450	0.1995	4728.49
150	0.246	0.1995	5295.65
180	0.208	0.1990	5415.97
210	0.436	0.1994	4770.79
240	0.319	0.1994	5093.99
270	0.454	0.1990	4730.13

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 20 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 700 ° C

เวลา (นาทึ)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.133	0.2002	1705.70
120	0.152	0.1999	1654.53
180	0.119	0.1994	1749.69
240	0.119	0.1992	1751.45

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 30 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 700 ° C

เวลา (นาทึ)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.245	0.2003	2310.42
120	0.193	0.2001	2457.11
180	0.152	0.2000	2573.15
240	0.161	0.1994	2553.96

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 40 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 700 ° C

เวลา (นาทึ)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.268	0.2006	3230.12
120	0.176	0.2005	3488.50
180	0.158	0.2000	3547.22
240	0.174	0.1997	3507.11

ตารางที่ ข.19 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 50 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 700 ° C

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
60	0.388	0.2008	3754.43
120	0.303	0.2000	4005.56
180	0.203	0.1998	4287.62
240	0.223	0.1994	4240.50

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลจากผลการทดลอง ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red 60 ppm ตัวดูดซับซิติ
กา 700 °

เวลา (นาที)	ค่าการดูดกลืนแสง	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/ลิตร)
15	0.647	0.2008	4129.78
30	0.559	0.2008	4371.40
45	0.517	0.2006	4493.00
60	0.369	0.2005	4904.41
75	0.433	0.2002	4734.16
90	0.320	0.2001	5052.10
120	0.369	0.2001	4914.21
150	0.364	0.1999	4933.95
180	0.294	0.1997	5134.55
210	0.264	0.1995	5222.32
240	0.245	0.1995	5275.23
270	0.281	0.1992	5183.69

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ค.1 การคำนวณค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ (q)

ตารางที่ ค.1 ค่าปริมาณการดูดกลืนแสงของสารละลาย Congo red 20 ppm บนตัวดูดซับคาร์บอนกัมมันต์ ที่ 700 °C เพื่อใช้เป็นตัวอย่งการคำนวณค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ

ขวดที่	time(min)	ปริมาณการดูดกลืนแสง				Weight(g)
		I.	II.	III.	เฉลี่ย	
1	15	0.787	0.794	0.783	0.788	0.1996
2	15	0.790	0.798	0.803	0.797	0.1996
3	15	0.834	0.815	0.807	0.819	0.1999
4	15	0.691	0.717	0.720	0.709	0.1999
5	15	0.510	0.593	0.592	0.565	0.2002
6	15	0.514	0.521	0.520	0.518	0.2003
7	30	0.573	0.580	0.580	0.578	0.2004
8	30	0.551	0.557	0.557	0.555	0.2005
9	30	0.536	0.539	0.541	0.539	0.2005
10	30	0.603	0.603	0.611	0.606	0.2006
11	30	0.506	0.515	0.512	0.511	0.2007
12	30	0.597	0.608	0.610	0.605	0.2008
Reference					0.708	

จากตารางที่ ค. 1 จะทราบค่าปริมาณการดูดกลืนแสงที่เวลาต่างๆ นำมาหาค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับรูปที่ ค.1 กราฟสารละลายมาตรฐาน Congo red

ตัวอย่างเช่น สารละลาย Congo red ที่ความเข้มข้น 20 ppm ขวดที่ 6 : นำค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย = 0.709 มาหาค่า ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ จากรูปที่ ค.1 ได้ความเข้มข้นของสารละลาย 14.148 ppm แล้วนำมาแทนในสมการปริมาณการดูดซับจำเพาะ (q)

$$\text{ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ}(q) = \left[\frac{C_o - C_e}{m} \right] \times V$$

เมื่อ q = น้ำหนักของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล ($\mu\text{g/g}$)

C_o = ความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ($\mu\text{g/ml}$)

m = น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

V = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการดูดซับ (ml)

หาค่าความเข้มข้นของสารละลาย Congo red เริ่มต้น (จุด Reference) จากกราฟมาตรฐาน ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ 0.708 ได้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 19.417 ppm ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ}(q) &= \left[\frac{19.417 \text{ ppm} - 14.148 \text{ ppm}}{0.2003 \text{ g}} \right] \times 20 \text{ ml} \\ &= 526.063 \text{ } \mu\text{g} / \text{g} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง
การทดสอบไคสแควร์ (Chi-Square Test)

การทดสอบไคสแควร์

Chi-Square Test

การทดสอบไคสแควร์ (Chi-Square Test) เป็นวิธีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่อยู่ในรูปของความถี่หรือในรูปของสัดส่วน ตัวอย่างเช่น การศึกษาเจตคติ ความคิดเห็น ความสนใจ หรือการยอมรับ เป็นต้นซึ่งไม่สามารถวัดค่า ออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอน แต่สามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้ เช่น มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด หรือ ดี - ไม่ดี เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากการเก็บรวบรวมจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องแล้วจำแนกออกมาเป็นความถี่หรือสัดส่วน ถ้าหากต้องการศึกษาว่าการแจกแจงความถี่ของข้อมูลที่ได้จากตัวแปรหนึ่งเป็นไปลักษณะใด หรือถ้าหากต้องการเปรียบเทียบตัวแปร 2 กลุ่มหรือมากกว่า 2 กลุ่มว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ การทดสอบไคสแควร์จะเหมาะสมกว่าการทดสอบด้วย z เนื่องจากการทดสอบด้วย z เหมาะสำหรับการทดสอบสัดส่วนของประชากรเพียงกลุ่มเดียว หรือการทดสอบความแตกต่างระหว่างสัดส่วนของสิ่งที่สนใจจากประชากร 2 กลุ่มเท่านั้น การทดสอบไคสแควร์จึงเป็นวิธีการทางสถิติ ที่นิยมใช้มากในการเปรียบเทียบหรือทดสอบข้อมูลที่เป็นความถี่หรือข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัดส่วน โดยเฉพาะการใช้วิเคราะห์ข้อมูลจากการแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า

หลักการทดสอบไคสแควร์

สมมติมีประชากรที่มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย (μ) และความแปรปรวน (σ^2) ถ้าหากสุ่มประชากรออกมา 1 คน แล้วนำมาแทนค่าในสูตร

$$Z^2 = \frac{(X - \mu)^2}{\sigma^2}$$

หลังจากนั้นจึง นำค่า ของ Z^2 ตั้งแต่ 0 จนถึง ∞ ไปเขียนกราฟแสดงการแจกแจงของ Z^2 จะพบว่าการแจกแจงของกราฟ Z^2 ที่ได้ จะมีลักษณะเหมือนกับการแจกแจงของไคสแควร์ (χ^2) ที่มีระดับองศาอิสระเป็น 1 แต่ถ้าหากสุ่มประชากรออกมา N คน จำนวน 1 ครั้งและนำมาแทนค่าในสูตรเดียวกัน เพื่อหาค่า Z^2 และผลรวมของ $\sum Z^2$ กระทำลักษณะเช่นเดียวกันนี้เป็นจำนวน ∞ ครั้ง แล้วนำไปเขียนกราฟเพื่อแสดงการแจกแจงของ $\sum Z^2$ จะพบว่าได้เส้นกราฟที่ได้ จะมีลักษณะเหมือนกับการแจกแจงของไคสแควร์ (χ^2) ที่มีระดับองศาอิสระเป็น N นั่นคือ

$$\chi^2(N) = \sum_{i=1}^N Z_i^2$$

$$\chi^2_{(N)} = \sum \frac{(X_i - \mu)^2}{\sigma^2} = \frac{(X_i - \mu)^2}{\sigma^2}$$

ในกรณีของการแจกแจงความแปรปรวน สมมติมีประชากรที่มีการแจกแจงปกติและทราบค่าของความแปรปรวน (σ^2) ของประชากรกลุ่มนี้สมมติต่อไปว่ามีการสุ่มประชากรออกมา N ค่าจำนวน ∞ ครั้ง พร้อมทั้งหาค่า ความแปรปรวน (S^2) ในแต่ละครั้ง หลังจากนั้นจึงนำค่ามาแจกแจงเป็นความแปรปรวนของประชากร จะได้ว่า

$$\chi^2_{(N-1)} = \frac{(N-1)S^2}{\sigma^2}$$

$$S^2 = \frac{\chi^2 \sigma^2}{N-1}$$

จะพบว่า $\sigma^2/N-1$ ก็คือค่าคงที่สำหรับความแปรปรวนของประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ดังนั้นการแจกแจงของ S^2 จึงขึ้นอยู่กับ χ^2 ไคสแควร์จะมีความสัมพันธ์กับ z และความแปรปรวนตามความสัมพันธ์ของสูตรต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว สำหรับการทดสอบไคสแควร์ จำแนกออกเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. การทดสอบความกลมกลืน (The goodness of fit test)
2. การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Test of Association)
3. การทดสอบความเป็นเอกภาพ (Test of Homogeneity)

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล ดร. พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517 อายุ 38 ปี

สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต	วิศวกรรมเคมี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2545
วิทยาศาสตรบัณฑิต	เคมีวิศวกรรม	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2539

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา).....

.....Catalysis , Environmental Catalysis and Catalytic Reaction Engineering.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
-	-	-

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2546	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบความเสถียรทางผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2548	เครื่องสังเคราะห์สารซีโอไลต์	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2549	เครื่องจำลองการไหลแบบอุดมคติ	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2550	เครื่องเผาอุณหภูมิสูงสำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2551	การเพอร์เวปเพอเรชันสารละลายเอธานอลเข้มข้นด้วยเมมเบรน	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2552	การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตที่เตรียมได้จากถ้ำกลบ	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2553	การเตรียมตัวดูดซับซิลิกาจากถ้ำกลบเพื่อใช้ในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2554	การดูดซับแอลฟาโทโคเฟอรอลด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำกลบ	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2555	การดูดซับสีย้อมด้วยผลิตภัณฑ์จากถ้ำกลบ	ทุนวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์
2555	การผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ล้างน้ำ	งบประมาณแผ่นดิน

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- 1 ประมินทร์ ขวัญนอน, **พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์**, ดวงกมล ณ ระนอง “การเตรียมซีโอไลต์ชนิด เอบนตัวรองรับอะลูมินาเมมเบรนเพื่อแยกเอทานอล-น้ำ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 25 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2551
- 2 พิณเทพ เศรษฐโกศล, พุทธิชาติ จันทน์เมือง, **พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์**, สุภาสินี เนรมิตตพงศ์ “การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับซิลิกาที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยชาน อ้อย” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 เดือน มีนาคม 2553
- 3 ณพงค์ เทียรฆโรจนกุล, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, **พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์** “ การดูดซับ กรดไขมันอิสระในน้ำมัน ปาล์มดิบด้วยผลิตภัณฑ์จากแกลบ ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 2 เดือน มิถุนายน 2553
- 4 **พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์**, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ “การดูดซับสีข้อมด้วยตัวดูดซับจาก ธรรมชาติ” วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 27 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2553
- 5 Weerawat Clowutimon, Prakob Kitchaiya, **Pornsawan Assawasaengrat** “ADSORPTION OF FREE FATTY ACID FROM CRUDE PALM OIL ON MAGNESIUM SILICATE DERIVED FROM RICE HUSK” Engineering Journal, Vol 15, No 3, July 2011

การเสนอผลงานวิชาการ

- 1 วรช แพทย์รังษี, **พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์** “ การดูดซับกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบ โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์จากแกลบ” การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์

แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 20-21 ตุลาคม 2551

- 2 สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์, **พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์**, นิพนธ์ สิงห์ศักดิ์ดา, สุกัญญา การวิไลโรจนกุล, สุนทร จันทร์ราษฎร์, นุรักษ์ กฤษดาณรงค์, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (อะลูมิเนียม, นิกเกิล, เซอร์โคเนียม) ฟอสเฟต” การประชุมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 20-21 ตุลาคม 2551
- 3 ศศิธร อินทรชิต, สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์, **พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์** “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ปีต้าที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขาน้อย” การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 8, 25-27 มีนาคม 2552
- 4 สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์, ศศิธร อินทรชิต, ปฏิพัทธ์ เคนนาดี, จักริ ไสธัฎา, **พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์**, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ “การสังเคราะห์ไดเมทิลอีเทอร์จากเมทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ปีต้าและซีโอไลต์วายที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยขาน้อย” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 26 -27 ตุลาคม 2552
- 5 พงษ์เสริฐ ศรีพรหม, **พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์**, อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์, สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์ “การกำจัดแอนิลินในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 26 -27 ตุลาคม 2552
- 6 ขวัญปวีณ์ สิทธิเขตรกรณ์, ช่อทิพย์ ทองอ่อน, นราทิพย์ เจตติลกวารากร, นันทน์ อังกรชกร, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, **พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์** “การศึกษา การดูดซับและการคายซับ

แคโรทีนอยด์จากน้ำมันปาล์มดิบ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 22-23 พฤศจิกายน 2554

7 Weerawat Clowutimon, Sutasinee Neramittagapong, Piyasan Praserthdam, **Pornsawan**

Assawasaengrat “Synthesis of Beta Zeolite from bagasse fly ash ” The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

8 Pongsert Sriprom, Sutasinee Neramittagapong, Arthit Neramittagapong, **Pornsawan**

Assawasaengrat “Removal of Aniline from Synthetic Wastewater using Catalytic Wet Oxidation” The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

9 Weerawat Clowutimon, **Pornsawan Assawasaengrat**, Deacha Chatsiriwech “Adsorption of

Congo red on modify rice husk silica” The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

อื่นๆ
