



การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

Adsorption of dyestuff onto pumiceous tuff

สุชาดา สวัสดิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

2560

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและให้ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2560

ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

สุชาดา สวัสดิ์
ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อภาษาไทย

ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทไฟฟลูออไรด์ โดยทำการทดลองในระบบกะ (batch process) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่เข้าสู่สมดุล ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารละลาย และใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชอธิบายข้อมูลการทดลอง ผลการทดลองพบว่า สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 120 นาที และสามารถอธิบายการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 16.077 มิลลิกรัมต่อกรัม และจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับสมการอันดับสอง จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าหินพัมมิเซียสทไฟฟลูออไรด์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

คำสำคัญ: การดูดซับ, สีย้อม, หินพัมมิเซียสทไฟฟลูออไรด์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Abstract

In this study, the adsorption of dyestuff onto Lopburi pumiceous tuff was carried out in batch process. The effect of adsorption such as contact time, adsorbent dose and initial dye concentration were investigated. The experimental data were analysed by Langmuir and Freundlich isotherms. Experiment results showed that the dye uptake occurred at equilibrium time of 120 min. The adsorption data was fitted well with Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacity of Langmuir isotherm was 16.077 mg/g. The kinetics for the adsorption corresponded to the pseudo-second order model. Experimental results showed that the pumiceous tuff was effective adsorbent for removing of dyestuff.

Key words : adsorption isotherm, dyestuff, pumiceous tuff

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก.
บทคัดย่อภาษาไทย	ข.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	ช.
สารบัญรูป	ซ.
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
1.5 นิยามศัพท์	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ	4
2.2 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม	4
2.3 หินเพอร์ไลต์	5
2.4 การดูดซับ	6
2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ	6
2.4.2 การดูดซับทางเคมี	6
2.4.3 การดูดซับทางไฟฟ้าเคมี	7
2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	10
2.6 การกำจัดสีย้อมด้วยตัวดูดซับต่าง ๆ	11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	15
3.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม	15
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	17

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	19
4.1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ	19
4.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	21
4.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับ	22
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	23
4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพพี	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลการวิจัย	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	33
ภาคผนวก ก.	34

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี	7
2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มแลงเมียร์	10
4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	23
4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพพ์	25
4.3 จลนพลศาสตร์และการแพร่ภายในอนุภาคการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	27
ก.1 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	34
ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	34
ก.3 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในการดูดซับด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	35

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	8
4.1 โครงสร้างของหินพัมมิเซียสทัพพ์	19
4.2 พื้นผิวของหินพัมมิเซียสทัพพ์	20
4.3 หมู่ฟังก์ชันของหินพัมมิเซียสทัพพ์	20
4.4 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	21
4.5 ผลของปริมาณตัวดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	22
4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของหินพัมมิเซียสทัพพ์	24
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรุนดลิชของหินพัมมิเซียสทัพพ์	24
4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ของหินพัมมิเซียสทัพพ์	26
4.9 การแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ลพบุรีเป็นจังหวัดที่มีชื่อเสียงในด้านการทอผ้าและย้อมผ้า โดยทำการผลิตทั้งในรูปแบบอุตสาหกรรมครัวเรือนและเป็นกลุ่มแม่บ้านในหลายพื้นที่ทั้งในอำเภอเมืองและอำเภอรอบนอก ซึ่งผลิตภัณฑ์ผ้าไทยเป็นที่ต้องการเป็นจำนวนมากทำให้ประชากรมีรายได้ที่เพิ่มมากขึ้น จากความต้องการผลิตภัณฑ์มากทำให้มีน้ำเสียจากการย้อมผ้าเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก และส่วนมากจะทำการทิ้งน้ำย้อมผ้าลงพื้นดินโดยยังไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัด ทำให้น้ำเสียไหลลงสู่ใต้ดินทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณนั้นไม่ว่าจะเป็นน้ำบาดาลหรือแม่น้ำลำคลอง และที่สำคัญสีย้อมจำนวนมากจะเสถียรและยากที่จะกำจัดออกจากน้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียจากการย้อมผ้าจะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ได้แก่ซีโอดี (COD), บีโอดี (BOD) และของแข็งแขวนลอย (suspended solids) และสารประกอบเป็นพิษอื่น ๆ (Das and Charumathi, 2012) ดังนั้นน้ำเสียจากสีย้อมเมื่อปลดปล่อยทิ้งโดยไม่ผ่านการบำบัดจะเกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และจากรายงานของผู้เชี่ยวชาญพบว่าสีย้อมจะส่งผลกระทบต่อประชาชนและห่วงโซ่อาหาร (ALZaydien, 2009) รวมทั้งส่งผลกระทบต่อทางเดินของแสงด้วย

กระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกัน แต่กระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่ง่ายต่อการออกแบบการทดลอง ราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ทำให้เป็นวิธีการที่นิยมมากในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ สารอินทรีย์และโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ จังหวัดลพบุรีเป็นแหล่งที่มีแร่ดินเหนียวและหินจากธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น ดินขาว, หินเพอร์ไลต์, หินพัมมิช และเบนโทไนต์ เป็นต้น ซึ่งหินธรรมชาติแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน หินพัมมิเซียสทัฟฟ์ (Pumiceous Tuff) เป็นหินภูเขาไฟชนิดหนึ่งที่พบในอำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี ในหินชนิดนี้จะมีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ และผู้วิจัยได้นำหินพัมมิเซียสทัฟฟ์มาวิเคราะห์โครงสร้างด้วย วิธี X-ray diffraction พบว่ามีแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทำให้หินพัมมิเซียสทัฟฟ์มีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าวัสดุอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ โดยแร่มอนต์มอริลโลไนต์นั้น เป็นแร่ดินเหนียวกลุ่มดินสมคไตต์ (Smectite) และมีโครงสร้างเป็นแผ่นหรือเกล็ด ขนาดเล็กๆซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล ซึ่งทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ทั้งประจุบวกและลบ จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยจึงศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากการย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัฟฟ์ ซึ่งนอกจากจะเป็นการนำวัสดุจากธรรมชาติที่ราคาถูกและหาง่ายในท้องถิ่นแล้ว อีกทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์จากวัสดุธรรมชาติที่มีในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์

อย่างสูงสุด และเพื่อให้ได้ข้อมูลในการออกแบบถังบำบัดน้ำเสียสำหรับระบบปฏิบัติการจริงในการกำจัดสีจากน้ำเสียการย้อมผ้า ซึ่งเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนในท้องถิ่น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำเสียจากการย้อมผ้าด้วยวิธีการดูดซับ ได้แก่ เวลาที่สัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลาย
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจากการย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ โดยนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยสมการไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. สํารวจและเก็บข้อมูลจากอุตสาหกรรมครัวเรือนของชาวบ้านในอำเภอโคกเจริญ จังหวัดลพบุรี
2. ทำการทดลองการดูดซับในระบบกะ (batch process)
3. สารที่ใช้ดูดซับ ได้แก่ หินพัมมิเซียสทัพพ์ (สีส้ม) จากอำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี
4. น้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลอง ได้แก่
 - น้ำเสียสังเคราะห์ คือ น้ำเสียที่เตรียมจากสีย้อมผ้าสีเหลืองตราแมววิ่งรอบโลก
5. ศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับสีของน้ำเสียจากการย้อมผ้า เพื่อหาประสิทธิภาพและออกแบบถังบำบัดในการกำจัดสีย้อมผ้า
6. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของหินพัมมิเซียสทัพพ์ ได้แก่
 - 6.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที (Brunauer, Emmett and Teller : BET method) เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวของหินพัมมิเซียสทัพพ์
 - 6.2 วิเคราะห์โครงสร้างด้วย X-ray diffraction spectroscopy (XRD) เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของหินพัมมิเซียสทัพพ์
 - 6.3 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน
 - 6.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชันของหินพัมมิเซียสทัพพ์

1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย



1.5 นิยามศัพท์

การดูดซับ คือ การถ่ายโอนองค์ประกอบจากของเหลว (liquid phase) ไปอยู่บนผิวของของแข็ง (solid phase) โมเลกุลที่จับอยู่กับผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่ของแข็งที่จับตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

ไอโซเทอรัม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (q_e) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับกับความเข้มข้นสมดุล (C_e) และที่อุณหภูมิคงที่

หินภูเขาไฟ คือ (Volcanic rock) หรือ หินอัคนีพุ (Extrusive rock) คือหินอัคนีที่เกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหลอมเหลวที่ไหลขึ้นมาบนผิวโลก ที่เราเรียกกันว่า ลาวา (Lava) ที่ไหลขึ้นมาสู่บนผิวโลกหรือใกล้ผิวโลกจากระเบิดของภูเขาไฟ

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษาการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงเวลาหรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล วิเคราะห์ผลการดูดซับด้วยสมการจลนพลศาสตร์คือ pseudo-first order pseudo-second order และ intraparticle diffusion

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (นิพนธ์และคณิตา, 2550) ได้แก่

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และซิลิกาแกมมันต์ สีนแร่ จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต วัสดุดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 –200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500–1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง
3. สารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ต่างๆ พื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อัลไคโตซาน กากกาแฟ ขานอ้อย กากถั่วเหลือง ถั่วกลบดำ เปลือกไม้ ฟางข้าว เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ แบคทีเรีย และสาหร่าย

2.2 น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ลักษณะน้ำเสียของการฟอกย้อม จะมีปริมาณสารอินทรีย์สูงซึ่งเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดแอสซิดิก เส้นใยและเส้นด้าย ซึ่งทำให้มีค่าบีโอดีปริมาณ 100–1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าซีโอดีประมาณ 500–1200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง มีของแข็งแขวนลอย มีอุณหภูมิสูงเนื่องจากการย้อมจะใช้อุณหภูมิในการย้อมสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นสูง มีโลหะเจือปนเนื่องจากโลหะจะเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า มีปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมดสูง ซึ่งลักษณะน้ำเสียในการฟอกย้อมประเภทต่างๆ มีความแตกต่างกัน

ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมต่อสิ่งแวดล้อม (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544)

1. สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen ; DO) ลดลง ซึ่งจะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (self purification)

ได้ทันเกิดกลิ่น และไม่สามารถใช้แหล่งน้ำให้เป็นประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้ และที่สำคัญสารอินทรีย์บางตัวเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เกิดการสะสมอยู่ในระบบนิเวศหากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยากเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์กรณีได้รับสารโดยตรง

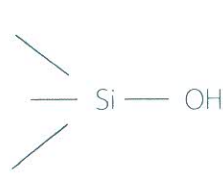
2. อุณหภูมิ น้ำเสียอุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายสูงสุดลดลง เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์
3. ของแข็งแขวนลอย ทำให้เพิ่มปริมาณอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้ รวมทั้งทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ
4. ของแข็งละลายน้ำ ซึ่งบางชนิดมีโลหะหนักเจือปนอยู่ทำให้เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำหรือจุลชีพได้
5. สี ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำและปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืช ไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ จะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในแหล่งน้ำลดลง
6. โลหะหนัก ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้ รวมทั้งโลหะหนักเป็นสารที่สะสมอยู่ในระบบนิเวศ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์

สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมมีอยู่มากมายหลายชนิด การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาใช้ในการย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substativity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าว ได้กว้างๆ ว่าแรงกระทำหรือพันธะที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้ คือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไอออน (ionic forces) พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) แรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพังการดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์ (นครินทร์, 2549)

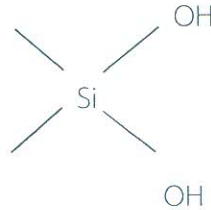
2.3 หินพัมมิเซียสเพอร์ไลต์

จังหวัดลพบุรี เป็นจังหวัดที่มีแร่ธรรมชาติหลายชนิด เช่น เพอร์ไลต์ พัมมิเซียสเพอร์ไลต์ พัมมิช เบนโทไนต์ และโรโอไลต์ เป็นต้น ซึ่งเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟจากธรรมชาติที่ เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ มีเนื้อละเอียดหรือเป็นแบบแก้ว โดยมีปริมาณเพอร์ไลต์ประมาณ 1 ล้านเมตริกตัน (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, 2556) มีองค์ประกอบทางเคมีคือซิลิกา และอลูมินา ทำให้กลไกการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่อยู่บนพื้นผิวของเพอร์ไลต์ โดยซิลิกอนบนผิวจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิด โคออร์ดิเนชันแบบเตตระฮีดรัลที่อุณหภูมิห้องและจะเกิดโค

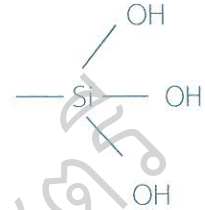
ออร์ดิเนชันที่สมบูรณ์โดยจับกับไฮดรอกซิลเกิดเป็น silanol group ในทางทฤษฎีมีความเป็นไปได้ที่อะตอมซิลิกอน 1 อะตอมอาจเกิดหมู่ไฮดรอกซิลได้ 2 หรือ 3 หมู่ เรียกว่า silanediol group และ silanetriol group ตามลำดับ (Dogan et al., 2008) ดังรูป



hydroxy หรือ silanol group



silanediol group

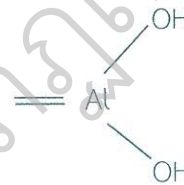


silanetriol group

ผิวของไฮดรอกไซด์ของอลูมินาจะเกิดรวมตัวกับหมู่ไฮดรอกซิล ดังรูป



หรือ



2.4 การดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซโดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน

ในปฏิกิริยาของการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้ วัสดุถูกดูดซับจะถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับด้วยกลไกการดูดซับ ซึ่งมี 2 แบบ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของวัสดุถูกดูดซับกับสารองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งแรงนี้มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ถ้าวัสดุดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของวัสดุดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของสารองค์ประกอบนั้นก็ตามปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติและคายความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากวัสดุถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากวัสดุดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคาย (Desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ สมมติฐานของการดูดซับทางกายภาพ มีดังนี้

1. การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
2. การดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์
3. พลังงานในการดูดซับต่ำ ($\Delta H < 20 \text{ kJ mol}^{-1}$)
4. การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)
5. พลังงานกระตุ้นต่ำ
6. การดูดซับเป็นแบบผันกลับได้ (reversible adsorption)

2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบของวัสดุที่ถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของวัสดุที่ถูกดูดซับลดลง และให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกมาสูงมาก สำหรับวิธีนี้ปริมาณของวัสดุที่ถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับค่อนข้างน้อย เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วถึงบนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดการคายเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเช่น องค์ประกอบบางชนิดไม่เกิดการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ สมมติฐานของการดูดซับทางเคมี มีดังนี้

1. การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง
2. การดูดซับเกิดจากพันธะทางเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าตัวดูดซับ
3. พลังงานในการดูดซับสูง ($50 \text{ kJ mol}^{-1} < \Delta H < 800 \text{ kJ mol}^{-1}$)
4. การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
5. พลังงานกระตุ้นสูง
6. การดูดซับเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible Adsorption)

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี

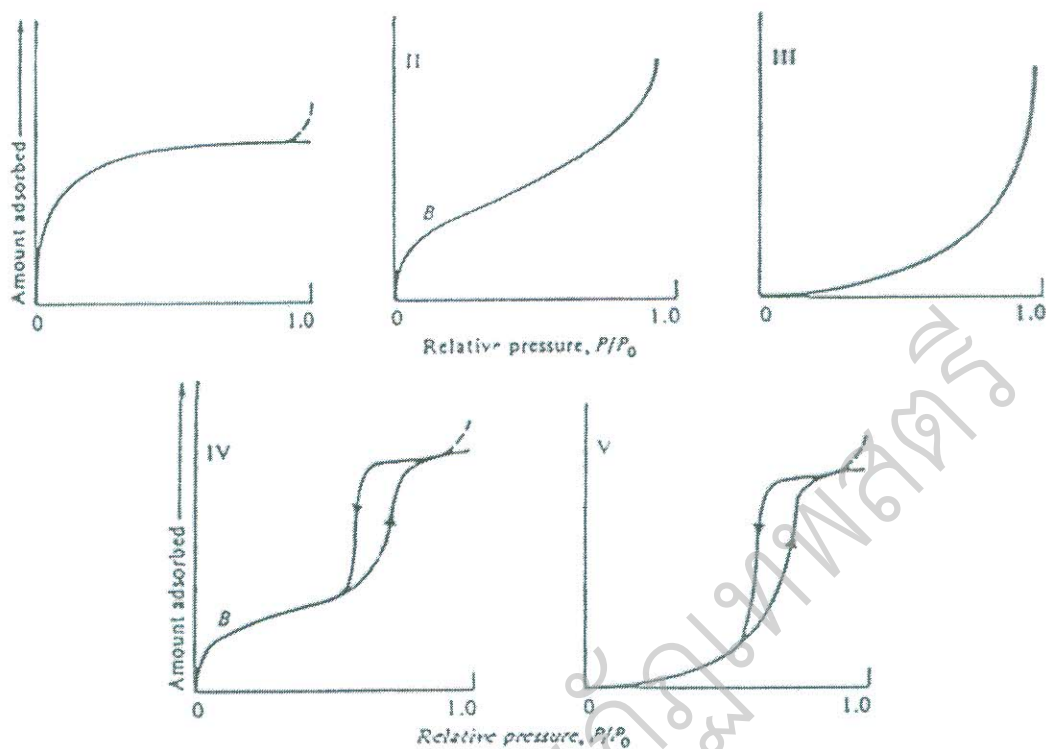
การดูดซับแบบกายภาพ	การดูดซับแบบเคมี
1. ความร้อนของการดูดซับต่ำ คายพลังงาน 100 แคลอรีต่อโมล	1. ความร้อนของการดูดซับสูง คายพลังงาน 10,000 แคลอรีต่อโมล
2. ไม่มีความจำเพาะ	2. มีความจำเพาะสูง
3. การดูดซับแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น	3. การดูดซับแบบชั้นเดียว
4. การดูดซับแบบไม่รวมตัว	4. การดูดซับแบบรวมตัว
5. เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	5. เกิดขึ้นที่อุณหภูมิกว้าง
6. เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่เกิดการกระตุ้นและ ผันกลับได้	6. เกิดการกระตุ้น เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และ ไม่สามารถผันกลับได้
7. ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน	7. มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน

ที่มา (Ruthven, 1984, p. 427)

3. การดูดซับทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical adsorption)

การดูดซับทางไฟฟ้าเคมีหรือการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic force) ระหว่างประจุบนโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับประจุบนผิวหน้าของตัวดูดซับ การดูดซับทางไฟฟ้าเคมีมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพแต่อ่อนกว่าการดูดซับทางเคมี

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมๆกัน จนกว่าอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสถานะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือน้อยที่สุดที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลือน้อยที่สุดที่สมดุลการดูดซับไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอรัมของการดูดซับรูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบใดมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอรัมการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ไอโซเทอรัมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด
ที่มา (Jankowska et al, 1991)

1. ไอโซเทอรัมชนิดที่ 1 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอรัมที่มีรูปแบบแบบแลงเมียร์ หรือแบบแอล (Langmuir or L-Shaped) เป็นการดูดซับของของแข็งที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กและการดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายนอก (External Surface Area) จะต่ำที่ความดันย่อยต่ำก็จะสามารถดูดซับได้มาก ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอรัมแบบที่ 1 คือ การดูดซับของไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 273 เคลวิน และการดูดซับบนซีโอไลต์

2. ไอโซเทอรัมชนิดที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอรัมที่มีรูปแบบแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S - Shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอรัมการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) จากไอโซเทอรัมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (Break Through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

3. ไอโซเทอมชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างวัสดุดูดซับและวัสดุถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างวัสดุถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของวัสดุถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับขั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอร์มแบบที่ 3 คือ การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านหินที่ไม่มีรูพรุน

4. ไอโซเทอมชนิดที่ 4 จะพบในวัสดุดูดซับที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 15–1000 อังสตรอม ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (capillary condensation in pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับขั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่นการดูดซับเบนซีน (benzene) บนเจลของไอออนออกไซด์ (Iron (III) Oxide Gel) ที่อุณหภูมิ 320 เคลวิน

5. ไอโซเทอมชนิดที่ 5 จะพบในการดูดซับระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของของแข็ง มีลักษณะคล้ายชนิดที่ 3 แต่ชนิดที่ 5 จะสามารถเกิดการควบแน่นของก๊าซภายในรูพรุนได้ วัสดุดูดซับมีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมชนิด 4 ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน สำหรับไอโซเทอมชนิดที่ 3 และชนิดที่ 5 นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

สมการไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (adsorption site) มีลักษณะเหมือนกัน (homogeneous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (monolayer) สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ 1

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

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_e = ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_m = ปริมาณสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

ลักษณะไอโซเทอร์มของแลงเมียร์สามารถอธิบายในเทอมปัจจัยการแยก (separation factor) หรือค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะสมดุล (equilibrium parameter): R_L ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (Won et al, 2006)

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L C_0)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร) K_L = ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มแลงเมียร์

R_L	รูปร่างของไอโซเทอร์ม
$R_L > 1$	unfavorable
$R_L = 1$	linear
$0 < R_L < 1$	favorable
$R_L = 0$	irreversible

ไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิช มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะไม่เหมือนกัน (Heterogeneous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นสามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น (Multilayer) สมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิช ดังสมการ 3

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

โดยที่ q_e = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่สมดุล C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่คงเหลืออยู่ที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) K_F = ค่าคงที่ของฟรอนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ $1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

2.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการ Pseudo—First Order Equation จะเป็นดังสมการ 4

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \text{.....(4)}$$

โดยที่ q_e = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_t = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่เวลาใดๆ k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการ Pseudo—Second Order Equation ดังสมการ 5

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{.....(5)}$$

การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle Diffusion) ใช้ศึกษากลไกการดูดซับ มีความสัมพันธ์ดังสมการ ที่ 6

$$q_t = k_{id} t^{1/2} \quad \text{.....(6)}$$

เมื่อ q_t = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ k_{id} = ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่เข้าไปในอนุภาค (มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที^{1/2})

2.6 การกำจัดสีด้วยตัวดูดซับต่าง ๆ

พรรณราย (2546) ศึกษาความสามารถของเพอร์ไลต์ (ลพบุรี) ในการกำจัดแคดเมียมในสารละลายพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเกิดได้ดีที่พีเอช 6 เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับของเพอร์ไลต์ดิบ ที่มีขนาดอนุภาค 0.2–0.6 มิลลิเมตร 0.6–1.0 มิลลิเมตร และ 1.0–1.4 มิลลิเมตร เท่ากับ 4 5 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ ส่วนเพอร์ไลต์เผาทุกขนาดจะเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 5 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่สภาวะเดียวกัน พบว่าเพอร์ไลต์ดิบมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าเพอร์ไลต์เผา

จักรกฤษณ์ (2548) ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (นครราชสีมา) โดยใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการย้อมผ้าของกลุ่มชาวบ้าน จ.นครราชสีมา และน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและศึกษาการดูดซับในหลอดซับและถังกวน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ ที่ทำการปรับสภาพผิว สามารถดูดซับได้ดีกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ปรับสภาพผิว โดยในการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการพบว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียได้

สิรินันท์ (2550) ได้ศึกษาการกำจัดซีโอติในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน พบว่าปริมาณซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอติและสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม คือ 20 กรัม พีเอชน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมเท่ากับ 7 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 120 นาที นำไปทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวสามารถอธิบายได้โดยไอโซเทอมแบบฟลูนดลิกซ์ และพบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยถ้ำลอยถ่านหินที่กระตุ้นด้วยสารละลาย spent alkaline 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดซีโอติสูงสุดเท่ากับ 24.71 มิลลิกรัม

Dogan and Alkan(2003) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลไวโอเลท (methyl violet) ด้วยเพอร์ไลต์ (ตุรกี) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง ผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 13.2 กิโลจูลต่อโมล ค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำบ่งบอกถึงปฏิกิริยาการดูดซับเกิดการแพร่ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้สมการของ Arrhenius และ Eyring และการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างเพิ่มมากขึ้น

Dogan and Alkan (2003) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลไวโอเลท (methyl violet) ด้วยเพอร์ไลต์ดิบ (ตุรกี) กับเพอร์ไลต์ที่ปรับสภาพ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 1 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิมากขึ้น และจะลดลงเมื่อเพอร์ไลต์เกิดการขยายตัวและเพิ่มขึ้นเมื่อทำการกระตุ้นด้วยกรด จากสมดุลการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช ที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการทดลองพบว่าสมการแลงเมียร์อธิบายได้ดีที่สุด ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการดูดซับเมทิลไวโอเลทเป็นการดูดซับแบบกายภาพ และเมื่อพิจารณาจากค่าปัจจัยการแยก (R_L) พบว่าเพอร์ไลต์สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีแต่เพอร์ไลต์ที่ไม่ขยายตัวสามารถดูดซับได้ดีว่าเพอร์ไลต์ที่ขยายตัว

Dogan et al. (2004) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู (methylene blue) ด้วยเพอร์ไลต์ (ตุรกี) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง และผลการทดลองพบว่าสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การดูดซับจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น ความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จากข้อมูลการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง อันดับสองและการแพร่ผ่านภายในอนุภาคซึ่งบ่งบอกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง ซึ่งสัมพันธ์กับการแพร่ผ่านจะค่ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น ความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองได้คำนวณพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับได้แก่ ค่าเอนทัลปี เอนโทรปีและพลังงานอิสระกิบส์ด้วย

Akabl (2005) ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue) และคริสตัล ไวโอเลท (crystal violet) ด้วยพัมมิช (pumice) ทำการทดลองในระบบกะ (batch process) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และเวลาที่สัมผัส ผลการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับมากขึ้นเมื่อความเข้มข้น เวลาที่สัมผัสและปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น ใช้สมการพหุนดลธิอธิบายผลการทดลอง และสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับเมทิลีนบลูและคริสตัล ไวโอเลทด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

Gürses et al. (2006) ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลู (methylene blue) ด้วยดินเหนียว ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ความเร็วรอบในการเขย่า และปริมาณตัวดูดซับ รวมทั้งศึกษากลไกการดูดซับ ศักย์ซีต้าโพเทนเชียล ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก รูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยวิธี BET ผลการทดลองพบว่าสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเข้มข้นเริ่มต้นมากขึ้น ส่วนความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น (6.5) ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสอง

Govindasamy et al (2009) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเบสิกมาลาไคท์กรีน (malachite green) ด้วยเพอร์ไลต์ ทำการทดลองในระบบกะ (batch process) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น เวลาที่สัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าสมดุลการดูดซับเกิดขึ้น อย่างรวดเร็วหลังจากเวลาผ่านไป 40 นาที ศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับได้แก่ FTIR, XRD และ SEM ใช้สมการแลงเมียร์และพหุนดลธิในการทำนายผลการทดลองในช่วงความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ อุณหพลศาสตร์และการแพร่ผ่าน

ภายใน ผลการทดลองพบว่าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อนที่สามารถเกิดขึ้นได้และจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

Qiu et al. (2010) ศึกษาการดูดซับสีย้อม Amido Black 10B, Acid Red และ Safranin T ด้วยซีโอไลต์จากธรรมชาติ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้น ผลการทดลองสอดคล้องสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชและค่าความสามารถในการดูดซับ Safranin T, Acid Red และ Amido Black 10B เท่ากับ 1.1715 มิลลิกรัมต่อกรัม 1.0065 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.1069 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Vijayakumar et al. (2012) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเบสิกโรดามีนบี (Rhodamine-B) ด้วยเพอร์ไลต์ (อินเดีย) ทำการทดลองในระบบกะ (batch process) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วคือเมื่อเวลาผ่านไป 50 นาที ที่สมดุลการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในช่วงความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้จลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่ง อันดับสอง และการแพร่ผ่านในอนุภาคอธิบายผลการทดลอง รวมทั้งคำนวณอุณหภูมิศาสตร์ได้แก่ ค่าเอนทัลปี เอนโทรปี และพลังงานอิสระด้วยซึ่งพบว่าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อนบ่งบอกว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous) และได้ทำการวิเคราะห์ศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับได้แก่ หมู่ฟังก์ชันด้วย FT-IR และพื้นผิวด้วย SEM ก่อนและหลังทำการดูดซับในการศึกษาค่าปัจจัยการแยก (R_L) พบว่าเกิดการดูดซับที่ตระหว่างสีย้อมและเพอร์ไลต์

Mohammad-Reza et al. (2012) ศึกษาจลนพลศาสตร์และสมดุลการดูดซับสีย้อมแอซิดเรด 14 (Acid Red 14) ด้วยหินพัมมิช (อิหร่าน) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น เวลาที่สัมผัสและความเป็นกรด-ด่าง ผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อเวลาที่สัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นมากขึ้น แต่การดูดซับจะลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น และสมการฟรุนดลิชสามารถอธิบายผลการทดลอง ได้ดีที่สุดในข้อมูลการทดลองพบว่าการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

Derakhshan et al. (2013) ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยหินพัมมิช (อิหร่าน) ที่ปรับสภาพ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น และปริมาณตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะมากขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นมากขึ้น แต่ที่ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด และ

มีค่าความสามารถในการดูดซับของสมการแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 15.87 มิลลิกรัมต่อกรัม จากข้อมูลการทดลองพบว่าสมการพหุนดลีสสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดและการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม

สีย้อมผ้าที่ใช้ได้แก่ สีเหลือง ตราแมววิ่งรอบโลก ซึ่งเป็นสีย้อมที่ชาวบ้านใช้ในการย้อมผ้า ทำการเตรียมโดยนำสีย้อมมาชั่งปริมาณ 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (hot air oven) บริษัท Memmert GMBH
2. โถดูดความชื้น (dessicator)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (analytical balance) บริษัท Mettler-Toledo
4. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (shaker bath) บริษัท Forma Scientific
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
6. เครื่องกวนสาร (stirrer vertical)
7. เครื่องคนอัตโนมัติ (magnetic stirrer)
8. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum)
2. บีกเกอร์ (beaker)
3. ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask)
4. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
5. แท่งแก้ว (stirrer)
6. แท่งกวน (magnetic stirrer)
7. กรวยกรอง (funnel)
8. ขวดน้ำกลั่น (washing bottle)
9. ปิเปต (pipet)
10. หลอดหยด (dropper)
11. ช้อนตักสาร (spatular)

12. กระจกนาฬิกา (watch glass)

13. กระดาษกรองเบอร์ 42 (filter paper whatman No.42)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำเสียสังเคราะห์ เป็นน้ำเสียที่เตรียมจากสีย้อมผ้าสีเหลืองตราแมววิ่งรอบโลก

ตัวดูดซับ คือ หินพัมมิเซียสทัฟฟ์ ขนาดอนุภาค 50–100 เมช แช่ด้วย 0.1 M HCl 3 ชั่วโมง แล้วนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น และอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เก็บในโถดูดความชื้น

2. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์ ได้แก่

2.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยวิธีบีอีที (Brunauer, Emmett and Teller : BET method) เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

2.2 วิเคราะห์โครงสร้างด้วย X-ray diffraction spectroscopy (XRD) เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

2.3 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) เพื่อศึกษาถึงพื้นผิวและการกระจายตัวของรูพรุน

2.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เพื่อศึกษาถึงหมู่ฟังก์ชันของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

2.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

3. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

ทำการศึกษาการกำจัดสีจากน้ำย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัฟฟ์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ขั้นตอนมีดังนี้

3.1 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งหินพัมมิเซียสทัพพ์ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำเสียปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 5-240 นาที ต่าง ๆ จนถึงสมดุล ที่อุณหภูมิ 20-40°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณสีที่เหลืองด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

3.2 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

1. ชั่งหินพัมมิเซียสทัพพ์ปริมาณที่เหมาะสม (จำนวน 5 ค่า) ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำเสียตัวอย่าง ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ จนถึงสมดุล ที่อุณหภูมิ 20-40°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปวัดปริมาณสีที่เหลืองด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย

1. ชั่งหินพัมมิเซียสทัพพ์ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำเสียตัวอย่างที่ความเข้มข้นจำนวน 5 ค่า ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 1. ที่อุณหภูมิ 20-40°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปทำวัดปริมาณสีที่เหลืองด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

จากผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัดสีดังสมการ 6

$$\% \text{ การกำจัด} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(6)$$

และคำนวณความสามารถในการกำจัดสี (adsorption capacity) ดังสมการ 7

$$q = \frac{V(C_0 - C_t)}{W} \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่ q = ความสามารถในการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม) C₀ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_t = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) V = ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ (ลิตร) และ W = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ ได้แก่

1. วิเคราะห์พื้นที่ผิว
2. วิเคราะห์โครงสร้างด้วย X-ray diffraction spectroscopy (XRD)
3. วิเคราะห์พื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
4. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

ตอนที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

1. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. ปริมาณของตัวดูดซับ
3. ความเข้มข้นของสารละลาย

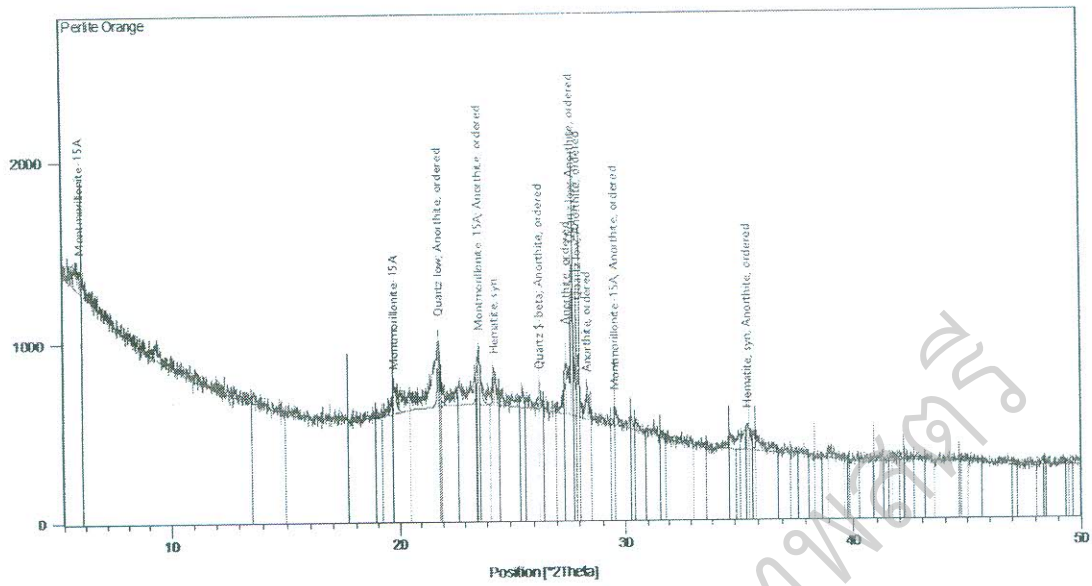
ตอนที่ 3 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับ

โดยผลการทดลองมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 ศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ

4.1.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับด้วยวิธีบีอีทีโดยการดูดซับ แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน ด้วยเครื่อง Autosorb 1 MP Quantachrome (ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) พบว่าหินพัมมิเซียสที่ฟมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 12.94 ตารางเมตรต่อกรัม

4.1.2 วิเคราะห์โครงสร้างของตัวดูดซับด้วย X-ray diffraction spectroscopy (XRD) ดังรูปที่ 4.1

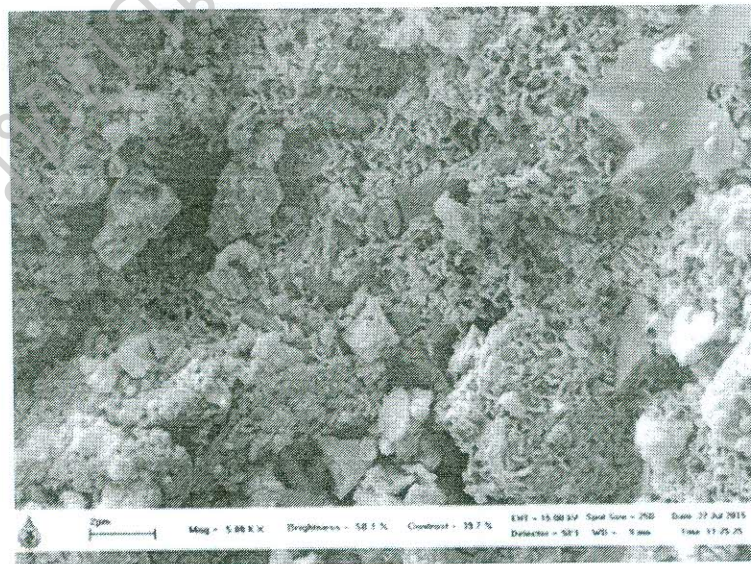


รูป 4.1 โครงสร้างของหินพมิเชียสท์พี

จากรูป 4.1 โครงสร้างพบว่ามีการพิกที่ $2\theta = 27^\circ$ (Amutha et al., 2010) และที่พิกที่ $2\theta = 22-23^\circ$ มีความเป็นอสังฐานที่เป็นซิลิกา (Jain et al., 2011)

4.1.3 วิเคราะห์พื้นผิวของตัวดูดซับด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่

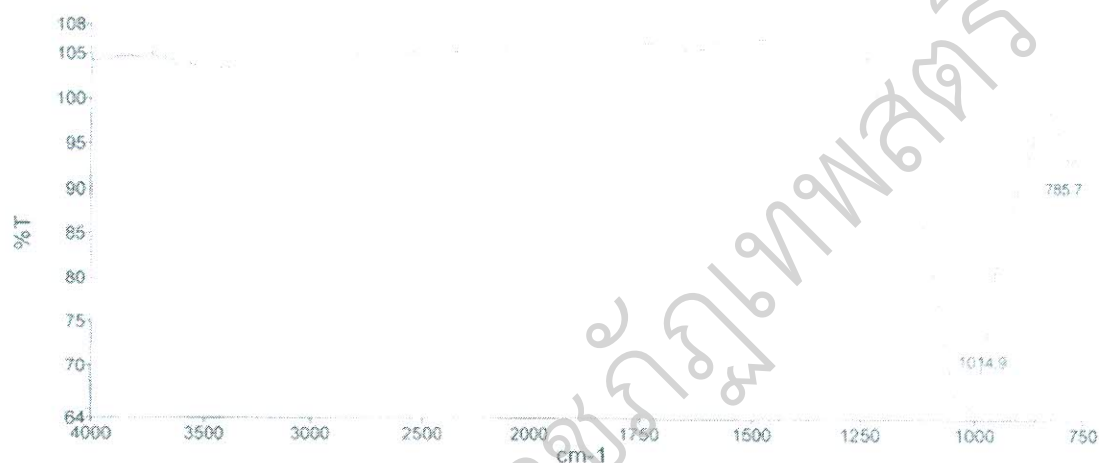
4.2



รูป 4.2 พื้นผิวของหินพมิเชียสท์พี

จากรูป 4.2 พื้นผิวของหินมิเชียสทัฟฟ์ พบว่าพื้นผิวของหินมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กและใหญ่จำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าโครงสร้างของตัวดูดซับที่มีรูพรุนและมีพื้นผิวที่ขรุขระสามารถกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ได้ดี

4.1.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ดังรูปที่ 4.3

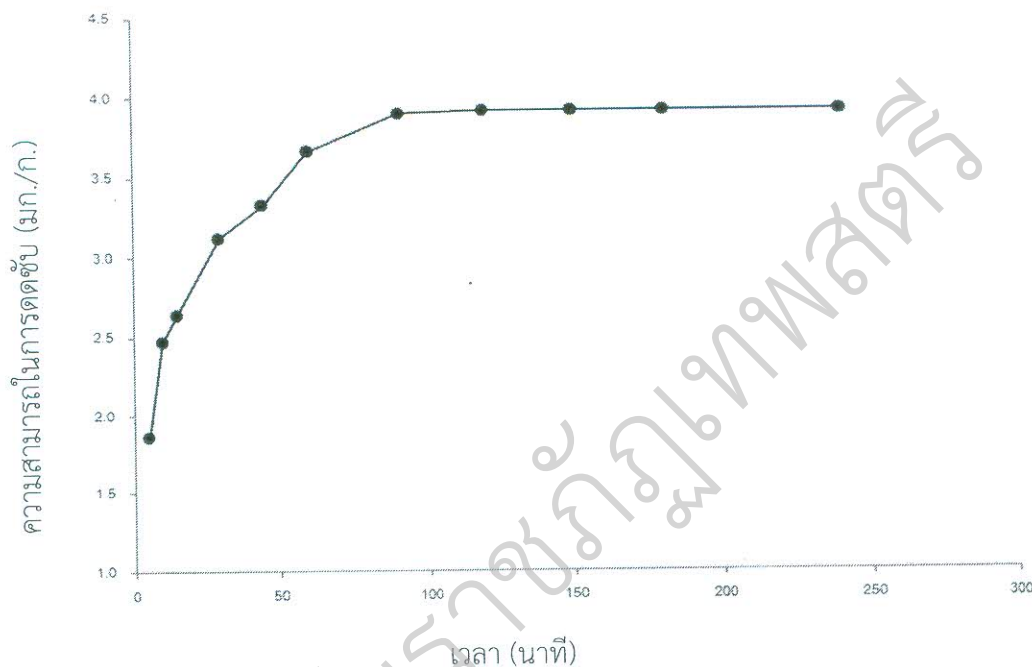


รูป 4.3 หมู่ฟังก์ชันของหินพิมมิเชียสทัฟฟ์

จากรูปที่ 4.3 เป็นสเปกตรัมที่วิเคราะห์หินพิมมิเชียสทัฟฟ์ด้วย FTIR ที่ความยาวคลื่น 4000–750 cm^{-1} พิกใน ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1014.9 cm^{-1} บ่งบอกถึงหมู่ซิลอกเซน (Si–O–Si) ของเทรฮีดรอล และที่ความยาวคลื่น 785.7 cm^{-1} บ่งบอกถึงหมู่ SiO–H (Lin et al., 2007)

4.2 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

ทำการทดลองการดูดซับสารละลายที่เวลา 5-240 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลาย 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.4

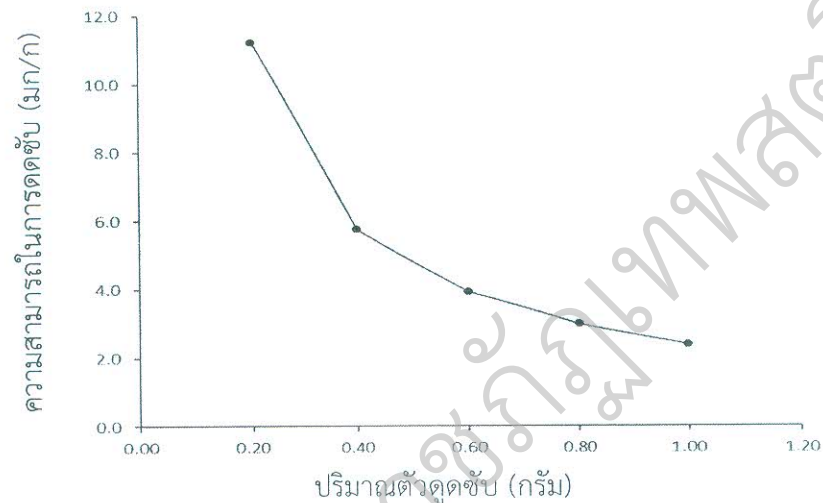


รูปที่ 4.4 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์

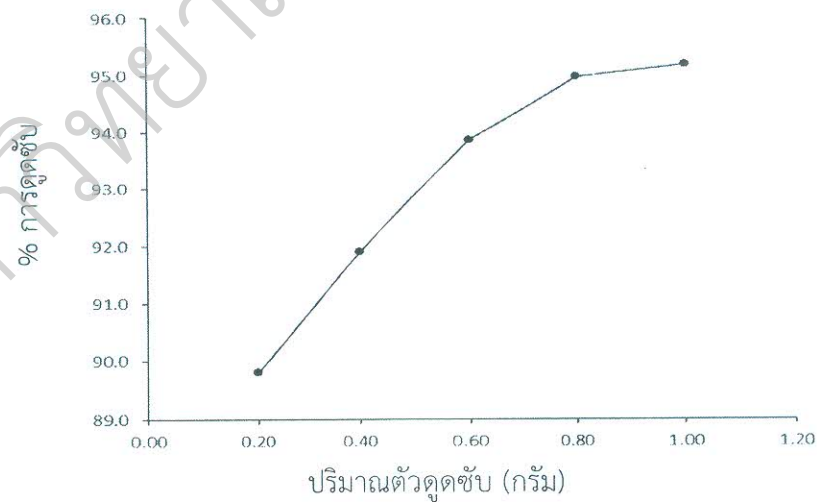
ในการศึกษาผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม โดยทำการศึกษาที่เวลาต่าง ๆ คือ 5 10 15 30 45 60 90 120 150 180 210 และ 240 นาที ที่ความเข้มข้นสีย้อม 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่า การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 10 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_t) เท่ากับ 2.465 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นเนื่องจากที่เริ่มต้นนั้นมีบริเวณตำแหน่งดูดซับ (binding site) ของตัวดูดซับยังว่างอยู่ และการที่เกิดการดูดซับขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเกิดจากการดูดซับทางกายภาพหรือเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Gupta and Rastogi, 2009) การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการดูดซับเริ่มช้าลงและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 3.911 มิลลิกรัมต่อกรัม

4.3 ผลของปริมาณตัวดูดซับ

ทำการทดลองการดูดซับสารละลายสี้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ โดยใช้ปริมาณหินพัมมิเซียสทัพพ์ 0.02-1.00 กรัม กับสารละลายสี้อมผ้าเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เวลาที่เข้าสู่สมดุล 120 นาที (จากข้อ 4.2) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.5



ก. ผลของปริมาณตัวดูดซับกับความสามารถในการดูดซับ



ข. ผลของปริมาณตัวดูดซับกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณตัวดูดซับสี้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์

ผลการดูดซับด้วยปริมาณหินพัมมิเซียสทัพพี 0.2–1.0 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลาย 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากรูปที่ 4.5 (ก) พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 11.226 5.744 3.911 2.968 และ 2.380 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.20 0.04 0.06 0.08 และ 1.00 กรัม ตามลำดับ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับ(มิลลิกรัมต่อกรัม)จะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นทำให้พื้นที่ผิว (surface area) มากขึ้น แต่ขณะเดียวกันจะมีบริเวณดูดซับที่ว่างอยู่มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

รูปที่ 4.5 (ข) ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 89.808 91.900 93.872 94.983 และ 95.184 ที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.20 0.04 0.06 0.08 และ 1.00 กรัม ตามลำดับ การที่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นทำให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มมากขึ้นนั้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของตัวดูดซับ (Özer et al., 2007).

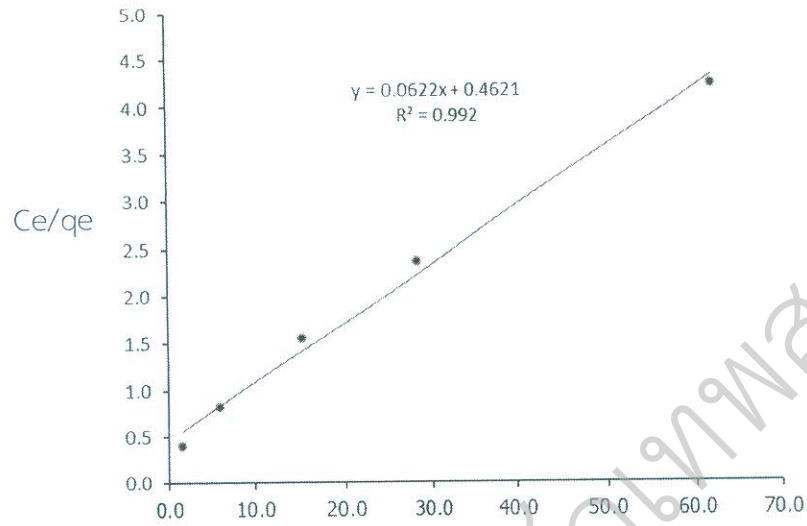
4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับนิยมใช้สมการไอโซเทอร์มช่วยในการทำนายและออกแบบการทดลอง และในการทดลองการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพีได้ใช้แบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช อธิบายผลการทดลอง โดยในการทดลองนี้ทดลองที่ความเข้มข้นสารละลาย 25-150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.6 กรัม เวลาในการเขย่า 120 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง และค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.1

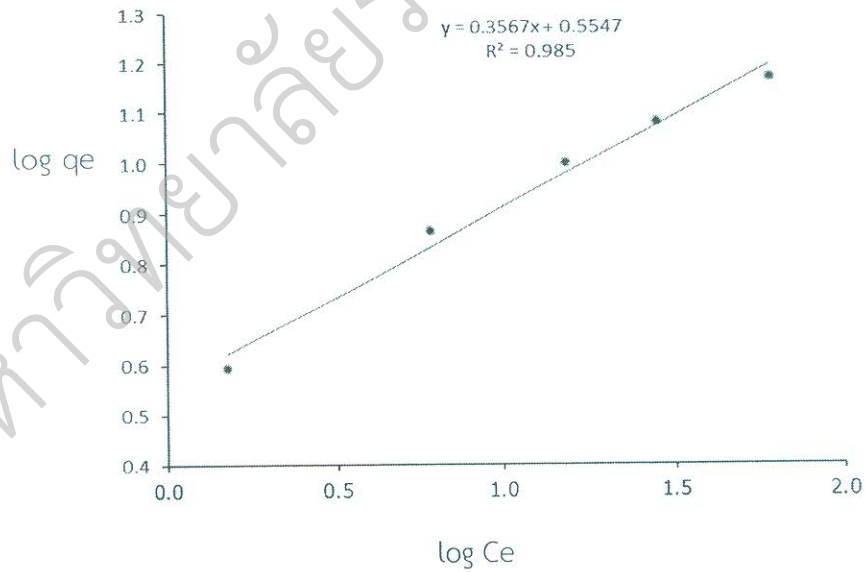
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพี

ความเข้มข้น สารละลาย (มก/ล)	Ce (mg/L)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
25	1.532	3.911	0.392	0.185	0.592
50	6.025	7.329	0.822	0.780	0.865
75	15.384	9.936	1.548	1.187	0.997
100	28.265	11.955	2.364	1.451	1.078
150	62.004	14.666	4.228	1.792	1.166

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 เมื่อนำมาเขียนกราฟ จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ และฟรอนตลิชของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์ ดังรูป 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์ของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิชของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิช จะได้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพฟ์

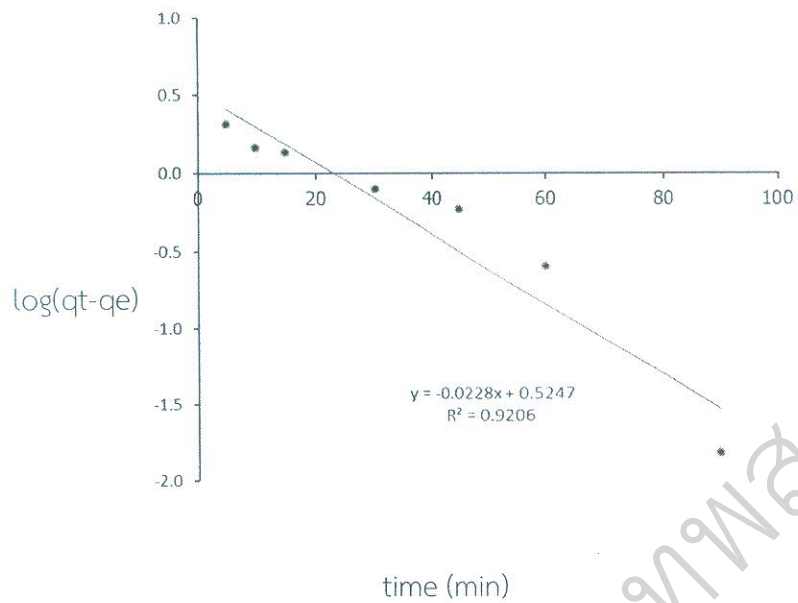
ไอโซเทอร์มแลงเมียร์	พารามิเตอร์
q_{\max} (mg/g)	16.077
K_L (L/mg)	0.135
R_L	0.229-0.047
R^2	0.992
ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช	
$1/n$	0.357
K_F (mg/g)	3.584
R^2	0.985

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient: R^2) พบว่าการดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพฟ์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (0.992) และฟรุนดลิช (0.985) โดยสอดคล้องกับกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์มากกว่า และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity: q_{\max}) เท่ากับ 16.077 มิลลิกรัมต่อกรัม

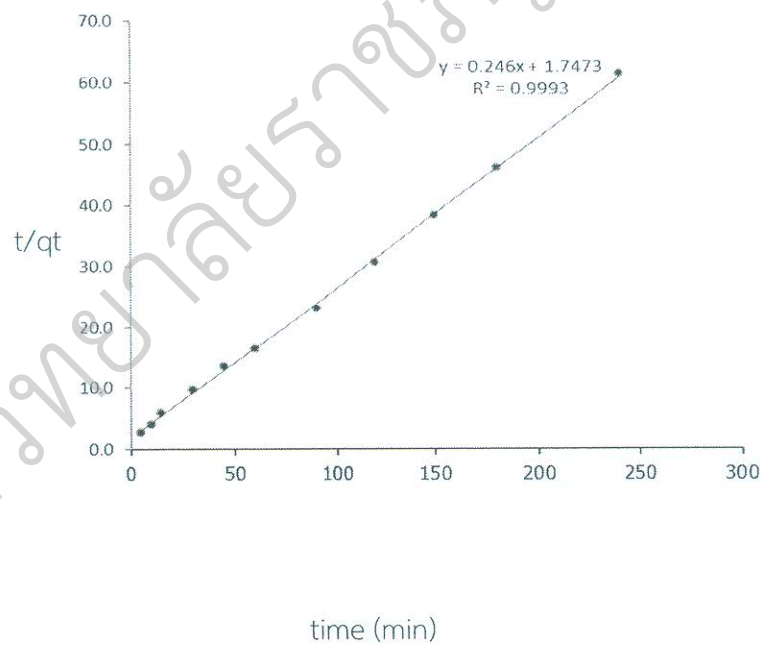
จากผลการทดลองการดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพฟ์ บ่งบอกว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Meroufel et al (2013) ที่ศึกษาการดูดซับสีย้อมประจุลบด้วยคาโอลิน (kaolin) ซึ่งพบว่าการดูดซับอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 5.94 มิลลิกรัมต่อกรัม

4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพฟ์

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพฟ์เป็นผลของการดูดซับที่เวลาต่างๆ และวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการ pseudo—first order และ pseudo—second order และ intraparticle diffusion ผลการทดลองเมื่อนำไปเขียนกราฟตามสมการ pseudo—first order และ pseudo—second order ของการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพฟ์ ดังรูปที่ 4.7 (ก และ ข) และนำผลที่ได้จากสมการทั้งสองไปหาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับจะเป็นดังตารางที่ 4.3



ก. pseudo first order



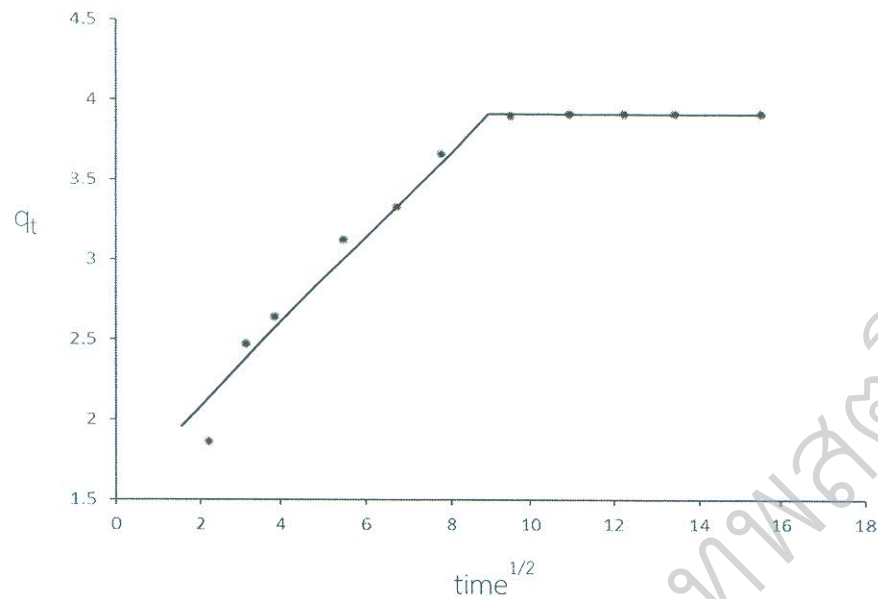
ข. pseudo second order

รูปที่ 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมแบบ pseudo first และ second order ของหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมของหินพัมมิเซียสทัพพี ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่า correlation coefficient (R^2) ดังตารางที่ 4.3 พบว่าข้อมูลการทดลองการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง นอกจากนี้ค่า q_e ที่ได้จากการคำนวณ (4.065 มิลลิกรัมต่อกรัม) ตามสมการการดูดซับอันดับสองจะใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลอง (3.911 มิลลิกรัมต่อกรัม)

ตารางที่ 4.3 จลนพลศาสตร์และการแพร่ภายในอนุภาคการดูดซับสีย้อมด้วยหินพัมมิเซียสทัพพี

จลนพลศาสตร์การดูดซับ	พารามิเตอร์
q_e (exp) (mg/g)	3.911
Pseudo—first order	
q_e (cal) (mg/g)	3.352
k_1 (min^{-1})	0.053
R^2	0.9206
Pseudo—second order	
q_e (cal) (mg/g)	4.065
k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.034
R^2	0.9993
Intraparticle diffusion	
q_0 (mg/g)	7.866
K	0.2676
C	1.5144
R^2	0.9569



รูปที่ 4.9 การแพร่ภายในอนุภาคของการดูดซับสี่เหลี่ยมด้วยหินพัมมิเซียสัทพ์

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ผลการดูดซับกับเวลาด้วยสมการการแพร่ภายในอนุภาค (intraparticle diffusion) ดังรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าได้กราฟเส้นตรงเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกนั้นเกิดที่เวลาน้อยกว่า 120 นาที จะเป็นการดูดซับที่ผิววนอกแล้วตามด้วยการแพร่ภายในอนุภาค ส่วนช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่เวลามากกว่า 120 นาที เป็นช่วงเข้าสู่สมดุล จะเห็นว่าเส้นตรงของการแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้ผ่านจุดกำเนิด อธิบายว่าการแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้เป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate-controlling step) (Mohanty et al., 2005)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1.1 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ คือ 5-240 นาที ความเข้มข้นสีย้อม 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 10 นาทีแรก โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ (q_t) เท่ากับ 2.465 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการดูดซับเริ่มช้าลงและเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที โดยมีความสามารถในการดูดซับที่สมดุลเท่ากับ 3.911 มิลลิกรัมต่อกรัม

1.2 ผลการดูดซับด้วยปริมาณหินพัมมิเซียสทัพพ์ 0.2–1.0 กรัม ที่ความเข้มข้นสารละลาย 25 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 11.226 - 2.380 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 89.808-95.184

2. ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ สารละลายเข้มข้น 25 – 150 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้น และจากกราฟวิเคราะห์ด้วยสมการไอโซเทอร์ม พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity: q_{max}) เท่ากับ 16.08 มิลลิกรัมต่อกรัม

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพ์ พบว่าผลการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสอง

4. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าหินพัมมิเซียสทัพพ์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจากสีย้อมผ้าได้ดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำในระบบคอลัมน์เพื่อศึกษาถึงอายุการใช้งานของตัวดูดซับ
2. เป็นแนวทางในการออกแบบระบบบำบัดจริง

เอกสารอ้างอิง

- กลุ่มเทคโนโลยีสิ่งทอ. (2544). คัลเลอร์เวย์. 7(34) : 14-16.
- จักรกฤษณ์ อัมพูช. (2548). ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- นครินทร์ แพรชาย. (2549). การกำจัดสีย้อมผ้าจากน้ำล้างสีย้อมผ้าโดยการใช้เกลือที่ปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- พรรณราย รุญเจริญ. (2546). การกำจัดแคดเมียมในสารละลายโดยใช้เพอร์ไลต์เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิท ปิยะมังคลา. (2551). จลนศาสตร์การดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 28-29 มกราคม 2551.
- รัตนภรณ์ ไชยาพงศ์พิพัฒน์ (2549). การบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียโรงพิมพ์ออฟเซตโดยใช้ถ่านซีเลื่อย. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วัชรพันธ์ ศิริพันธุ์. (2550). การศึกษาประสิทธิภาพการติดสีธรรมชาติของผ้าไหมและการกำจัดสีจากน้ำเสียโดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. (2544). การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน้า 29-31.
- สุดสายชล หอมทอง, นเรศ เชื้อสุวรรณและสุภัณฑิลา นิมรัตน์. (2011). การกำจัดสีเมทิลเรดด้วยการดูดซับ/วิธีทางชีวภาพ. Burapha Sci. J, 16 (2) : 63-74.
- สิรินันท์ กันศิริ. การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- Aber, S and Sheydaei, M. (2011). Removal of COD from Industrial Effluent Containing Indigo Dye Using Adsorption Method by Activated Carbon Cloth: Optimization, Kinetic, and Isotherm Studies. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 40(1) : 87–94.
- Acemioglu, B. (2005). Batch kinetic study of sorption of methylene blue by perlite. *Chem. Eng. J*, 106 : 73–81.
- Akbal, F. (2005). Adsorption of basic dyes from aqueous solution onto pumice powder. *J Colloid Interface Sci*, 15 ; 286(2) : 455–8.
- Aksu, Z. (2005). Adsorption of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process Biochemistry*, 40 : 997–1026.
- Crini, G. (2005). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9) : 1061–1085
- Derakhshan, Z., Baghapour, M. A., Ranjbar, M and Faramarzian, M. (2013). Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solutions by Modified Pumice Stone: Kinetics and Equilibrium Studies. *Health Scope*. 2(3):136–44.
- Dogan, M., Alkan, M. and Onager, Y. (2000). Adsorption of methylene blue from aqueous solution onto perlite. *Water Air Soil Pollut*, 120 : 229–248.
- Dogan, M. and Alkan, M. (2003). Adsorption kinetics of methyl violet onto perlite. *Chemosphere*, 50 : 517–528.
- Dogan, M. and Alkan, M. (2003). Removal of methyl violet from aqueous solution by perlite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 267 : 32–41.
- Dogan, M., Abak, H. and Alkan, M. (2008). Biosorption of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Hazelnut Shells: Equilibrium, Parameters and Isotherms. *Water Air Soil Pollut*, 192 : 141–153.
- Garg, K. K., Rawat, P and Prasad, B. (2015). Removal of Cr (VI) and COD from Electroplating Wastewater by Corncob Based Activated Carbon. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*. Open Access. Vol.1.1. : doi <http://dx.doi.org/10.16966/ijwwwt.102>
<https://www.sciforschenonline.org/journals/water-and-waste/article-data/IJWWWWT-1-102/IJWWWWT-1-102.pdf>.

- Govindasamy, V., Sahadevan, R., Subramanian, S and Mahendradas, D.M. (2009).
Removal of Malachite Green from Aqueous Solutions by Perlite.
International Journal of Chemical Reactor Engineering, 7(1) : page –, ISSN
(Online) 1542–6580, DOI: [10.2202/1542–6580.1889](https://doi.org/10.2202/1542-6580.1889), October 2009.
- Gürses, A., Dogar, C., Yalcin, M., Acikyildiz, M., Bayrak, R. and Karaca, S. (2006). The
adsorption kinetics of the cationic dye, methylene blue, onto clay.
Journal of Hazardous Materials, B131 : 217–228.
- Hasan, S., Ghosh, T. K., Viswanath, D. S. and Boddu, V. M. (2008). Dispersion of
chitosan on perlite for enhancement of copper(II) adsorption capacity.
Journal of Hazardous Materials, 152 : 826–837.
- Levine, W.G. (1991). Metabolism of azo dyes: implication for detoxification and
activation. Drug Metabolism Review, 23 : 253–309.
- Lakdawala, M. M. and Lakdawala, J. M. (2012). Study of Effect of PAC and GAC on
Removal of COD Contributing Component of Sugar Industry waste water.
Research Journal of Recent Sciences, 2 : 90–97.
- Mohammad Reza, S., Mansur, Z., Mohammad, Noori Sepehr., Reza, P. and Maryam, F.
(2005). Removal of Acid Red 14 by Pumice Stone as a Low Cost
Adsorbent: Kinetic and Equilibrium Study. Iran. J. Chem. Chem. Eng, 31 (3) :
19–27.
- Mathialagan, T. and Viraraghavan, T. (2002). Adsorption of cadmium from aqueous
solutions by perlite. J. Hazard. Mater, B94 : 291–303.
- Meesuk, M. and Seammai, S. (2010). The use of perlite to remove dark colour
from repeatedly used palm oil. ScienceAsia, 36 : 33–39.
- Nopkhuntod, S., Dararat, S. and Yimrattanabovorn, J. (2012). Removal of reactive
dyes from wastewater by shale. Songklanakarin, J. Sci. Technol, 34 (1) : 117–
123.
- Qiu, M., Yang, X. and Jiang, Q. (2010). Adsorption of Dye by the Natural Zeolite.
Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International
Conference on 18–20 June 2010.

- Vijayakumar, G., Tamilarasan, R. and Dharmendirakumar, M. (2012). Adsorption, Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic studies on the removal of basic dye Rhodamine-B from aqueous solution by the use of natural adsorbent perlite. *J. Mater Environ Sci*, 3 (1) : 157–170.
- Xiao-Jing Xiong, Xue-Jiao Meng, and Tian-Ling, Zhenga. (2010). Biosorption of C.I. Direct Blue 199 from aqueous solution by nonviable *Aspergillus niger*. *Journal of Hazardous Materials*, 175 : 241–246.

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพี

ตารางที่ ก.1 ผลของเวลาในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพี

เวลา (นาทีก)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
5	1.857
10	2.465
15	2.635
30	3.12
45	3.324
60	3.658
90	3.896
120	3.911
150	3.911
180	3.911
240	3.911

ตารางที่ ก.2 ผลของปริมาณตัวดูดซับสีย้อมผ้าด้วยหินพัมมิเซียสทัพพี

ปริมาณหินพัมมิเซียสทัพพี (กรัม)	ร้อยละการกำจัด (%)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.2	89.808	11.226
0.4	91.900	5.744
0.6	93.872	3.911
0.8	94.972	2.968
1.0	95.184	2.380

ตารางที่ ก.3 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมผ้าในการดูดซับด้วยหินพัมมิเซียสทัฟฟ์

ความเข้มข้นของสีย้อมผ้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
25	3.911
50	7.329
75	9.936
100	11.956
150	14.666

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี