สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซท์

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF DYE ADSORPTION ON HYDROTALCITE-LIKE COMPOUND

ศานิต ไชยยะ

SANIT CHAIYA

วพ.
ก344ค
2547

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 49420
วัน, เดือน, ปี 20 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547

ISBN 974-324-959-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF DYE ADSORPTION ON HYDROTALCITE-LIKE COMPOUND

SANIT CHAIYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

ISBN 974-324-959-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	**อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซท์**
นักศึกษา	นายศานิต ไชยยะ
รหัสประจำตัว	43065102
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์ (เคมีสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟบลู 5 จากสารละลายบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซท์ด้วยวิธีการทดลองแบบแบทช์ ทำการตรวจสอบอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับสีย้อม ผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับความสามารถในการดูดซับจะลดลง ไอโซเทอมที่ใช้ในการพิจารณาสมดุลของการดูดซับคือไอโซเทอมของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟลอยลิช จากข้อมูลของไอโซเทอมพบว่าเป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์ ในการศึกษาทางจลนศาสตร์สมการการดูดซับอันดับหนึ่งและสมการการดูดซับอันดับสองถูกนำมาพิจารณา พบว่าการดูดซับสีย้อมเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จากสมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถนำไปใช้หาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับโดยปัจจัยที่มีผลคือ ความเข้มข้น เริ่มต้นและปริมาณตัวดูดซับ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงขึ้น ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลงและเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานกระตุ้นในการดูดซับสีย้อมบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซท์มีค่าเท่ากับ 15.85 กิโลจูล/โมลแสดงว่ากลไกการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออน ทำการคำนวณค่า ΔH^0, ΔG^0 และ ΔS^0 เพื่อศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ พบว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0) มีค่าเท่ากับ -16.34 กิโลจูล/โมล ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) มีค่าเท่ากับ - 2.54 กิโลจูล/โมลและค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS^0) มีค่าเท่ากับ -4.64×10^{-2} กิโลจูล/โมล. เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Thermodynamics and Kinetics of Dye Adsorption on Hydrotalcite-Like Compound
Student	Mr. Sanit Chaiya
Student ID.	43065102
Degree	Master of Science
Programme	Applied Chemistry (Environmental Chemistry)
Year	2004
Thesis Advisor	Dr. Chompoonut Chaiyasaksa

ABSTRACT

The adsorption of Reactive Blue 5 from aqueous solutions on hydrotalcite-like compound was studied in a batch system. The effect of dye adsorption which were initial dye concentration and adsorbent doses was determined. An increase in initial dye concentration results in the increase of equilibrium sorption capacity, which also decrease with increase adsorbent doses. Langmuir and Freundlich adsorption models were used to investigate the equilibrium isotherms. Equilibrium data fitted very well to the Langmuir model. Two simplified kinetic models, pseudo first- and second-order equation, were tested. It was shown that the adsorption of dyes could be well described by the pseudo second-order equation. The pseudo second-order equation was used to predict the rate constant of sorption. The initial dye concentration and the adsorbent doses both significantly affect the rate constant of sorption. An increase in initial dye concentration results in the decrease of rate constant of sorption, which also increase with increase adsorbent doses. The activation energy was 15.85 kJ/mol for the adsorption of the dye on hydrotalcite-like compound. The value exhibit the anion exchange mechanism. Various thermodynamic parameters such as ΔH^0, ΔG^0 and ΔS^0, have been calculated. The enthalpy change (ΔH^0) is calculated to be -16.34 kJ/mol. The Gibbs free energy change (ΔG^0) is calculated to be -2.51 kJ/mol. The entropy change (ΔS^0) is calculated to be -4.64×10^{-2} kJ/mol.K.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ดังนี้

ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้รายงานทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดร. ชลอ จารุสุทธิรักษ์และดร. อุสารัตน์ ภักดีสู่สุข อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของรายงาน รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ดร. เสาวภาค สุขตระกูลเวศ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของรายงาน รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

นายสุวัฒน์ ศิวาคม เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ในการทดลอง

นางฉัตรพร คล้ายแก้วและนายดำรงศักดิ์ เจษฎาภัทรกุล นักศึกษาปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

นอกจากผู้มีรายนามข้างต้น ผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นายศานิต ไชยยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	X
สารบัญตาราง	XVI
สัญลักษณ์และคำย่อ	XXIV
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประเภทของการดูดซับ	4
2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ	4
2.1.2 การดูดซับทางเคมี	4
2.2 กลไกการดูดซับ	5
2.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ	6
2.3.1 แรงแวนเดอวาลล์	6
2.3.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์	6
2.3.3 แรงทางเคมี	8
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	8
2.4.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ	8
2.4.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ	9
2.4.3 ผลของอุณหภูมิ	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 อัตราเร็วของการกวน.....	10
2.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	10
2.5.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	11
2.5.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม.....	13
2.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ.....	17
2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง.....	17
2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง.....	17
2.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ.....	18
2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี.....	19
2.8.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี.....	19
2.8.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนฮอฟด์.....	21
2.8.3 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี.....	22
2.9 สีย้อม.....	24
2.9.1 องค์ประกอบของสีย้อม.....	24
2.9.2 แหล่งกำเนิดของสีย้อม.....	25
2.9.3 การจำแนกประเภทของสีย้อม.....	25
2.10 ดินเหนียวประจุลบไฮโดรทัลไซท์.....	30
2.11 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปน.....	31
2.12 สมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม.....	32
2.13 ปัญหาเฉพาะตัวสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	33
2.14 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	34
2.15 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า.....	35
2.15.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี.....	35
2.15.2 การดูดติดผิว.....	36
2.15.3 คลอริเนชัน.....	36
2.15.4 โอโซนเนชัน.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.15.5 เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรน..... 37

2.15.6 ไฟฟ้าเคมี..... 38

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 39

บทที่ 3. วิธีดำเนินงานวิจัย..... 44

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี..... 44

3.2 การเตรียมดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 45

3.3 คุณสมบัติดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 46

3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วย
ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 46

3.5 การศึกษาหาค่าความสัมพันธ์ในการดูดซับที่สภาวะสมดุล
โดยใช้ไอโซเทอมของแลงเมียร์..... 47

3.6 การทดลองหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส..... 48

3.7 การศึกษาหาค่าเอนทัลปีจากสมการของแวนฮอฟด์
ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ และค่าเอนโทรปี..... 48

บทที่ 4. ผลการทดลอง..... 50

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์... 50

4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์... 51

4.2.1 C_0 = 100 ppm และ w/v = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 kg/m^3..... 52

4.2.2 C_0 = 200 ppm และ w/v = 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 kg/m^3..... 53

4.2.3 C_0 = 300 ppm และ w/v = 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 kg/m^3..... 54

4.2.4 C_0 = 400 ppm และ w/v = 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 kg/m^3..... 55

4.2.5 C_0 = 500 ppm และ w/v = 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 kg/m^3..... 56

4.2.6 C_0 = 600 ppm และ w/v = 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 kg/m^3..... 57

4.2.7 C_0 = 700 ppm และ w/v = 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 kg/m^3..... 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.8 C_0 = 800 ppm และ w/v = 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 kg/m^3 59

4.2.9 C_0 = 900 ppm และ w/v = 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 kg/m^3 60

4.2.10 C_0 = 200, 300, 400, 500, 600 ppm และ w/v = 4.4 kg/m^3 61

4.2.11 C_0 = 300, 400, 500, 600, 700 ppm และ w/v = 5.2 kg/m^3 62

4.2.12 C_0 = 400, 500, 600, 700, 800 ppm และ w/v = 6.0 kg/m^3 63

4.2.13 C_0 = 500, 600, 700, 800, 900 ppm และ w/v = 6.8 kg/m^3 64

4.3 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 65

4.4 แบบจำลองในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 68

4.4.1 C_0 = 100 ppm และ w/v = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 kg/m^3 68

4.4.2 C_0 = 200 ppm และ w/v = 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 kg/m^3 70

4.4.3 C_0 = 300 ppm และ w/v = 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 kg/m^3 71

4.4.4 C_0 = 400 ppm และ w/v = 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 kg/m^3 72

4.4.5 C_0 = 500 ppm และ w/v = 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 kg/m^3 73

4.4.6 C_0 = 600 ppm และ w/v = 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 kg/m^3 74

4.4.7 C_0 = 700 ppm และ w/v = 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 kg/m^3 75

4.4.8 C_0 = 800 ppm และ w/v = 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 kg/m^3 76

4.4.9 C_0 = 900 ppm และ w/v = 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 kg/m^3 77

4.2.10 C_0 = 200, 300, 400, 500, 600 ppm และ w/v = 4.4 kg/m^3 81

4.2.11 C_0 = 300, 400, 500, 600, 700 ppm และ w/v = 5.2 kg/m^3 82

4.2.12 C_0 = 400, 500, 600, 700, 800 ppm และ w/v = 6.0 kg/m^3 83

4.2.13 C_0 = 500, 600, 700, 800, 900 ppm และ w/v = 6.8 kg/m^3 84

4.5 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 86

4.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์..... 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6.1 ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์..... 89

4.6.2 ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์..... 91

4.6.3 ค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS^0) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์..... 91

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 92

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 92

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 93

เอกสารอ้างอิง..... 94

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5..... 97

ภาคผนวก ข. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับและแบบจำลองในการดูดซับ..... 99

ภาคผนวก ค. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมที่ใช้ในการดูดซับ..... 144

ภาคผนวก ง. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (Ea)..... 146

ภาคผนวก จ. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0)..... 150

ภาคผนวก ฉ. การหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anionic Exchange Capacity)..... 151

ภาคผนวก ช. ข้อมูลและสภาวะในการหาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์..... 153

ภาคผนวก ซ. ข้อมูลและสภาวะในการหาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องออโตซอร์บ..... 154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฌ. ข้อมูลและสภาวะในการหาขนาดของรูพรุนโดยใช้เครื่องออโตซอร์บ..... 155

ภาคผนวก ญ. รูปและสภาวะในการหาขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่องสแกนนิง
อิเล็กตรอนไมโครสโคป..... 156

ประวัติผู้เขียน..... 157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับ (adsorption) ในขบวนการดูดซับ.....	6
2.2	การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์.....	7
2.3	กราฟการกระจายตัวของพลังงานของระบบที่มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน.....	10
2.4	ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ.....	11
2.5	ลักษณะของไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	15
2.6	ลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟลอยลิช.....	16
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ.....	19
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน.....	20
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง lnK และ 1/T.....	21
2.10	รูปของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์.....	31
2.11	องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี.....	38
3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
4.1	ลักษณะของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ได้.....	51
4.2	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร...	52
4.3	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตร...	53
4.4	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตร...	54
4.5	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตร....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	56
4.7	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	57
4.8	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	58
4.9	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	59
4.10	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	60
4.11	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 200, 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	61
4.12	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 300, 400 , 500 , 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 400, 500, 600, 700 และ 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	63
4.14	ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 500, 600, 700, 800 และ 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	64
4.15	สมการการดูดซับของแลงเมียร์เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	65
4.16	สมการการดูดซับของฟลอยลิชเมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	66
4.17	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4-2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	68
4.18	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4-2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	69
4.19	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2-4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	70
4.20	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2-4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0-5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	71
4.22	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0-5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	71
4.23	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8-6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	72
4.24	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8-6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	72
4.25	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์(w/v) เท่ากับ 3.6-6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	73
4.26	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์(w/v) เท่ากับ 3.6-6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	73
4.27	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4-7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	74
4.28	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4-7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.29	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2-8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	75
4.30	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2-8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	75
4.31	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0-9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	76
4.32	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0-9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	76
4.33	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8-10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	77
4.34	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อม สังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8-10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	77
4.35	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200-600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อ ปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	81
4.36	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200-600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อ ปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.37	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300-700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	82
4.38	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300-700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	82
4.39	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400-800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	83
4.40	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400-800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	83
4.41	แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	84
4.42	แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร.....	84
4.43	กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองการดูดซับอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ.....	86
4.44	กราฟความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 25, 35, 45, 55 องศาเซลเซียส.....	87
4.45	โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5.....	88
4.46	กราฟความสัมพันธ์ของสมการแวนท์ฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	90
ก.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ ΔG ในทั้ง 4 กรณี.....	23
2.2	สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์.....	33
3.1	เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเหนียว.....	46
3.2	ความเข้มข้นของสีย้อมและน้ำหนักดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ใช้ในการทดลอง....	47
4.1	องค์ประกอบทางกายภาพของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์.....	50
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์.....	50
4.3	ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง.....	78
4.4	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ.....	86
4.5	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ.....	89
ก.1	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5....	98
ข.1	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	99
ข.2	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	100
ข.3	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.20 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	101
ข.4	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.60 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.5	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.00 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	103
ข.6	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	104
ข.7	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	105
ข.8	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	106
ข.9	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	107
ข.10	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	108
ข.11	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	109
ข.12	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.13	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	111
ข.14	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	112
ข.15	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	113
ข.16	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	114
ข.17	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	115
ข.18	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	116
ข.19	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	117
ข.20	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.21	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	119
ข.22	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	120
ข.23	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	121
ข.24	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	122
ข.25	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	123
ข.26	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	124
ข.27	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	125
ข.28	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.29	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	127
ข.30	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	128
ข.31	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	129
ข.32	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	130
ข.33	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	131
ข.34	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	132
ข.35	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	133
ข.36	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.37	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	135
ข.38	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	136
ข.39	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	137
ข.40	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	138
ข.41	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	139
ข.42	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	140
ข.43	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	141
ข.44	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	142

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.45	ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	143
ค.1	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาไอโซเทอมของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	144
ค.2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอมของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส.....	145
ง.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	146
ง.2	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 35 องศาเซลเซียส.....	147
ง.3	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 45 องศาเซลเซียส.....	148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ง.4	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 55 องศาเซลเซียส.....	149
จ.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียว ไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส..	150
ฉ.1	ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลาย NaCl เข้มข้น 0.01 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร.....	152
ฉ.2	ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของ Cl^- ที่ 5 มิลลิลิตร.....	152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	ความหมาย
q	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัม/กิโลกรัม)
q_m	ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)
θ	สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด
r_a	อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
r_d	อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด
k_a	ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/นาที)
C	ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัม/เมตร^3)
C_t	ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่างๆ (กรัม/เมตร^3)
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้น (กรัม/เมตร^3)
k_d	ค่าคงที่ของการคายซับ (กรัม/เมตร^3.นาที)
K_A	ค่าคงที่สมการแลงเมียร์
K_F	ค่าคงที่ของสมการฟลอยลิค
n	ค่าคงที่
q_e	ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวของการดูดซับอันดับหนึ่ง (กรัม/กิโลกรัม)
q_t	ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)
k_1	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)
t	เวลา (นาที)
q_{e2}	ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวของการดูดซับอันดับสอง (กรัม/กิโลกรัม)
k_2	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (กิโลกรัม/กรัม.นาที)
A	แฟกเตอร์ความถี่ของการชน
E_a	พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
R	ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 (จูล/โมล.เคลวิน)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
ΔH	การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (จูล/โมล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
ΔS	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (จูล/โมล.เคลวิน)
K	ค่าคงที่สมดุล
ΔG	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (จูล/โมล)
Q	เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา
V	ปริมาตรของสารละลาย (เมตร^3)
W	น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ (กิโลกรัม)
R^2	สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
ΔH^0	การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีมาตรฐานที่ 25 ^{0}C (จูล/โมล)
ΔG^0	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ที่ 25 ^{0}C (จูล/โมล)
ΔS^0	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีที่ 25 ^{0}C (จูล/โมล.เคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้สีย้อมและรงควัตถุในกระบวนการฟอกย้อมเสื้อผ้าสำเร็จรูป ขณะเดียวกันก็เป็นกระบวนการที่มีการใช้น้ำมาก และน้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยกลับออกมาในรูปน้ำทิ้ง น้ำเสียที่มาจากโรงงานสิ่งทอมีลักษณะไม่น่านำมาใช้งาน และถ้ามีการปล่อยสู่แหล่งน้ำทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางเคมีและทางชีวภาพ [1,2] แต่วิธีเหล่านี้เป็นวิธีที่ยุ่งยาก ดังนั้นในการกำจัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม จึงนิยมใช้วิธีการดูดซับซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายกว่าวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ ถ่านกัมมันต์ เพราะมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้สูง แต่มีข้อเสีย คือ ถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง และการนำกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้พลังงานและทำได้ยาก [3] จึงได้มีการพยายามหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่ามาทดแทน ในปี 2000 Jason Orthman [4] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่เป็นดินเหนียวสังเคราะห์ คือ ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ ซึ่งใช้สารเคมีที่มีราคาถูกในการสังเคราะห์ ในการใช้ดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟ พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอ็คทีฟได้ถึง 90% สีย้อมรีแอ็คทีฟ [5] เป็นสีย้อมที่นิยมใช้กันมาก โดยมีอัตราในการใช้ในท้องตลาดเพิ่มขึ้นประมาณ 20-30% ต่อปี เพราะสีย้อมรีแอ็คทีฟเป็นสีย้อมที่ใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย ซึ่งเป็นเส้นใยที่นิยมใช้กันถึงครึ่งหนึ่งในโลก และในการใช้สีย้อมรีแอ็คทีฟ พบว่าเกิดเป็นน้ำเสียถึง 30% ต่อน้ำสีที่ใช้ย้อมทั้งหมด เพราะเป็นสีย้อมที่เกิดการไฮโดรไลท์ได้ง่ายทำให้ละลายในน้ำได้ดี โดยพบว่าน้ำเสียสุดท้ายที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการย้อมมีความเข้มข้นถึง 0.6-0.8 กรัม/ลิตร ในงานนี้เป็นการศึกษาจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟ (Reactive Blue 5) ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ด้วยวิธีแบบแบทช์ (Batch Reactor) โดยใช้แบบจำลองในการพิจารณา 2 แบบ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เพื่อนำค่าคงที่อัตราเร็วจากแบบจำลองการดูดซับที่เหมาะสมไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ และทางอุณหพลศาสตร์มีการพิจารณาค่าของเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0) พลังงานอิสระมาตรฐานของกิบส์ (ΔG^0) และค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS^0) ที่มีผลต่อการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้นและอัตราส่วน w/v ที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์
4. เพื่อศึกษาแบบจำลองในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์
5. เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส
6. เพื่อศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เตรียมดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่เป็นตัวดูดซับ ได้จากการนำสารละลายเจือจางผสมของแมกนีเซียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตในสภาวะที่เป็นเบส
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ คือ ขนาดของอนุภาค ขนาดของรูพรุน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ และพื้นที่ผิว คุณสมบัติทางเคมีคือ Na_2O MgO Al_2O_3 และ Cl
3. ศึกษาการดูดซับของสารละลายสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้น และอัตราส่วนของ w/v ต่างๆ กัน ดังนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (g/m^3)	อัตราส่วน w/v ที่ใช้ (kg/m^3)
100	0.4 0.8 1.2 1.6 และ 2.0
200	1.2 2.0 2.8 3.6 และ 4.4
300	2.0 2.8 3.6 4.4 และ 5.2
400	2.8 3.6 4.4 5.2 และ 6.0
500	3.6 4.4 5.2 6.0 และ 6.8
600	4.4 5.2 6.0 6.8 และ 7.6
700	5.2 6.0 6.8 7.6 และ 8.4
800	6.0 6.8 7.6 8.4 และ 9.2
900	6.8 7.6 8.4 9.2 และ 10.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการหาความสัมพันธ์ของการดูดซับที่สภาวะสมดุลจากไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟลอยลิช โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมดังนี้ คือ 100 200 300 400 500 600 700 800 และ 900 g/m^3 โดยใช้ค่าอัตราส่วน w/v คงที่ในแต่ละความเข้มข้นเท่ากับ 2 kg/m^3 ควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทดลอง 3 วัน
5. ทำการพิจารณาแบบจำลองในการดูดซับ 2 แบบ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จากข้อมูลระหว่างค่าการดูดซับที่เวลาต่างๆ และค่าการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว
6. ทำการหาค่าพลังงานกระตุ้น โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อม คือ 100 g/m^3 และใช้อัตราส่วน w/v คงที่เท่ากับ 2 kg/m^3 ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส
7. ทำการหาค่าทางอุณหพลศาสตร์ คือ เอนทัลปี (ΔH^0) จากสมการของแวนฮอฟ โดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อม คือ 100 g/m^3 และใช้อัตราส่วน w/v คงที่เท่ากับ 2 kg/m^3 ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทดลอง 3 วัน นำค่าเอนทัลปีที่ได้ไปหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) เพื่อนำไปหาค่าเอนโทรปี (ΔS^0) ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมสีย้อม
2. ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอ็คทีฟ
3. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอ็คทีฟและนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดน้ำเสียสีย้อมชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดูดซับ คือ กระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารหนึ่งยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกสารหนึ่ง สารที่ไปยึดเกาะที่ผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พื้นผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์

2.1 ประเภทของการดูดซับ[6]

การดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเป็นแรงค่อนข้างอ่อน เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) แรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole forces) เป็นต้น โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม

2.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

จะเกี่ยวข้องกับแรงหรือพันธะทางเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยา การเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเหมือนแรงที่ใช้ยึดเหนี่ยวกันระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล การดูดซับทางเคมีบางครั้งต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน สามารถผันกลับได้ในสภาวะอุณหภูมิเดียวกัน แต่การดูดซับทางเคมีจะผันกลับไม่ได้

2. การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดได้ทั่วๆ ไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น และโดยทั่วไปการดูดซับทางเคมีจะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น

3. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับทางกายภาพจะน้อยกว่าการดูดซับทางเคมี

2.2 กลไกการดูดซับ[7]

กลไกการดูดซับเป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนย่อย 4 ขั้นตอนติดต่อกัน ดังรูปที่ 2.1

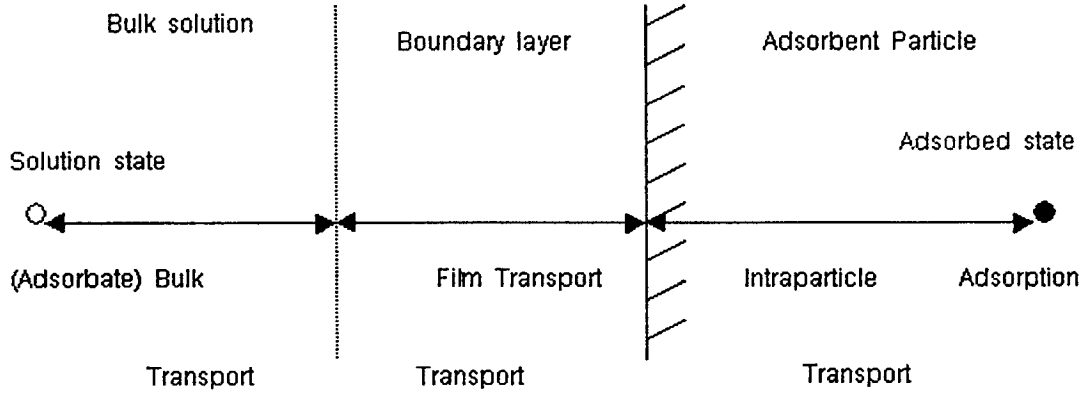
ขั้นตอนที่ 1 (Bulk transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) จากสารละลาย (bulk solution) ไปยังผิวฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 (Film transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) ข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 (Intraparticle transport หรือ Pore transport) เป็นการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับ (Mass transfer) เข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนตัวของตัวถูกดูดซับในขบวนการดูดซับ [7]

2.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ[8]

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย จะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical force) และแรงทางเคมี (Chemical force) โดยแรงทางกายภาพได้แก่ แรงแวนเดอวาลล์ และแรงไฟฟ้าสถิตย์ เกิดที่บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น Ion exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดแรงกระทำ (interaction) เกิดเป็นสารประกอบติดผิวตัวดูดซับด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

2.3.1 แรงแวนเดอวาลล์ (Van der Waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

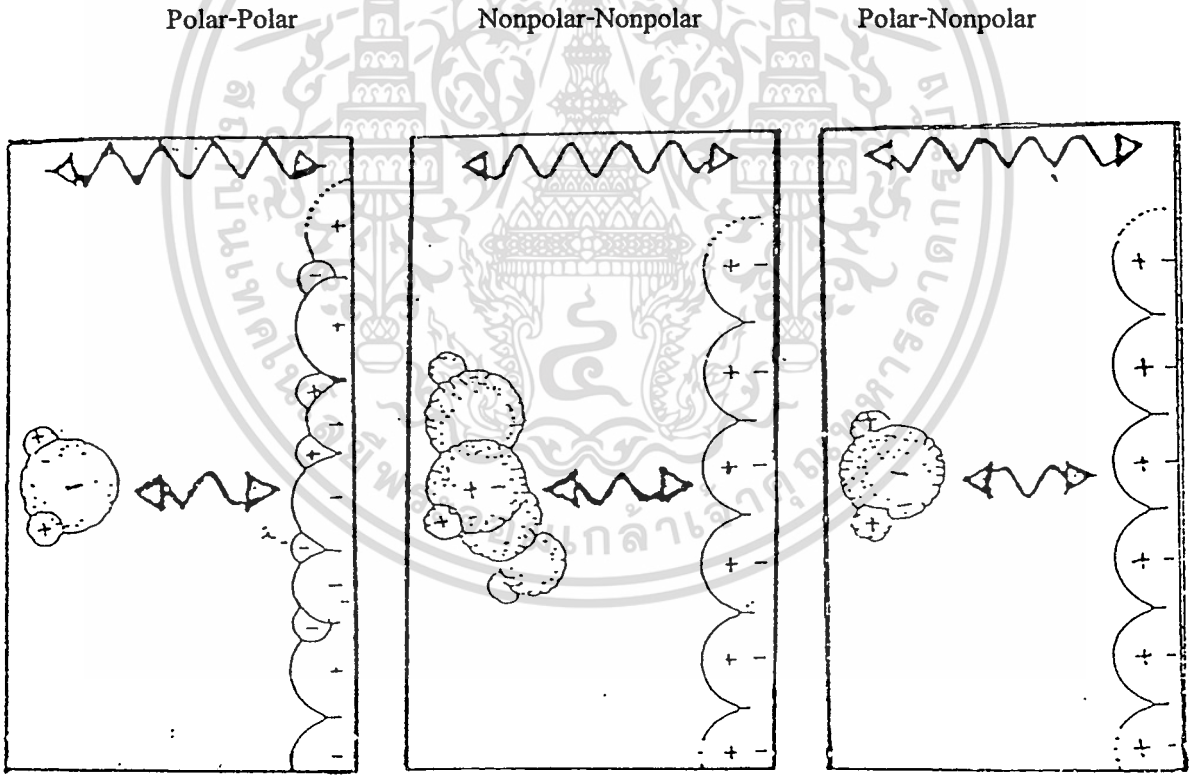
2.3.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดจากผล 3 อย่าง แสดงดังรูปที่ 2.2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.1 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ที่มีขั้ว 2 โมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้าม

2..3.2.2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ขั้ว (Non-polar molecule) เกิดจากผลของการกระจายตัว (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น สารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

2.3.2.3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน



รูปที่ 2.2 การดูดซับของสารดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัว ดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ดินนั้นเนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมี มีลักษณะดังนี้

2.3.3.1 เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์

2.3.3.2 ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Factors affecting adsorption)[9, 10]

2.4.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorbent)

2.4.1.1 พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface area and Pore structure)

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2.4.1.2 ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent size)

ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)

2.4.2.1 ความสามารถในการละลาย

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นการยากต่อการดูดซับ ตัวถูกดูดซับที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย มักสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี อย่างไรก็ตามคำกล่าวข้างต้นไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีตัวถูกดูดซับที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

2.4.2.2 น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล

เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.4.2.3 ความมีขั้วของโมเลกุล

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายดีขึ้น

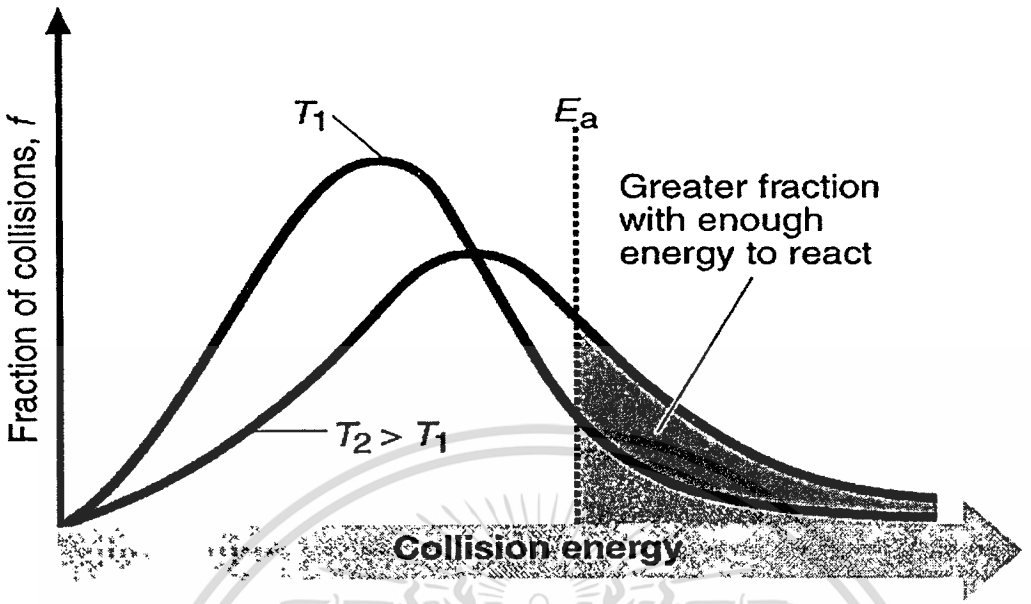
2.4.2.4 ความเข้มข้นของสารละลายหรือตัวดูดซับ

โดยทั่วไปแล้วอัตราเร็วของการดูดซับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ คือ อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น และอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่อความเข้มข้นลดลง

2.4.3 ผลของอุณหภูมิ (Effect of temperature)

อัตราเร็วของการดูดซับจะเกิดช้าหรือเร็วนั้น ขึ้นกับอุณหภูมิของสารละลาย กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของสารที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานต่ำสุดที่ทำให้เกิดการดูดซับ (พลังงานกระตุ้น, E_a) ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าระบบที่มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน 2 ระบบนั้น จำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น (ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้กราฟ) ของระบบที่มีอุณหภูมิสูงจะมีมากกว่าจำนวนโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลเหล่านี้จะมีผลให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟการกระจายตัวของพลังงานของระบบที่มีความเข้มข้นของสารเท่ากัน [10]

2.4.4 อัตราเร็วของการกวน

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับข้ามผ่านชั้นฟิล์มนั้น (film diffusion) ขึ้นกับความหนาของชั้นฟิล์ม ซึ่งหากฟิล์มยิ่งหนามากเท่าใดจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านมากขึ้น และส่งผลให้กระบวนการดูดซับเกิดช้าลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากไม่มีการกวนสารละลายเลย จะยิ่งทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มระหว่างของแข็งกับของเหลวมีมาก ในระบบที่มีการกวนและไม่กวนสารละลาย พบว่าการกวนจะช่วยให้อัตราเร็วของการดูดซับเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า

2.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium and Adsorption Isotherm)[11, 12]

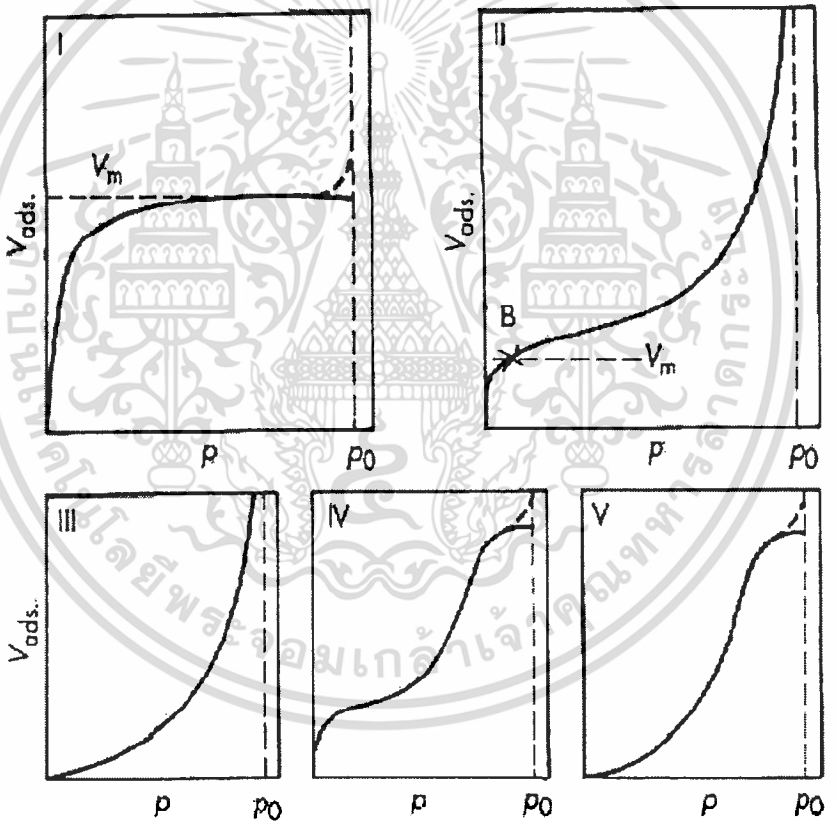
การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะมีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายตัวจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นคุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเราใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

2.5.1 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล (C) ณ อุณหภูมิคงที่ โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทอมใน 5 ลักษณะดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจำแนกจากลักษณะความโค้งของความชันของเส้นไอโซเทอมในช่วงแรก



รูปที่ 2.4 ลักษณะเส้นไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type I พบมากที่สุดเป็นการดูดซับโดยที่มีชั้นของตัวที่ถูกดูดซับคลุมที่ผิวของตัวดูดซับได้หนาหนึ่งโมเลกุล (Single layer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นปรากฏการณ์ดูดซับของ microporous powers ซึ่งปริมาณของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้หนึ่ง จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้ามีการดูดซับแบบนี้แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีรูพรุนเป็น microporous และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวภายนอกของผลิตภัณฑ์

Type II พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ (ปริมาณที่ถูกดูดซับเข้าสู่ค่าอนันต์) โดยจะเกิดบน nonporous power ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนกว้างกว่า microporous (1.5 นาโนเมตร) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflestion point or knee of isotherm) เกิดขึ้น เมื่อการดูดซับบนพื้นผิวชั้นแรกเกิดเกือบสมบูรณ์แล้ว (เป็น monolayer เกือบสมบูรณ์) และถ้าเพิ่ม relative pressure จะทำการดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น ดังนั้นการดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบ multilayer

Type III การดูดซับคล้าย type II แต่การดูดซับของชั้นแรกนั้นให้ความร้อนออกมาน้อยกว่าความร้อนของการควบแน่น เป็นลักษณะเฉพาะของการเกิดความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) มีน้อยกว่าความร้อนของการจับตัวกันของตัวถูกดูดซับที่เป็นของเหลว (the adsorbate heat of liquefaction) ดังนั้นการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เกิดเพราะตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากับชั้นของตัวถูกดูดซับมากกว่าเกิดปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับ

Type IV เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีรัศมีรูพรุนประมาณ 15-1,000 อัมสตรอง การดูดซับคล้าย Type II สำหรับความหนาของชั้นโมเลกุลชั้นแรกๆ แต่การดูดซับจะถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากรูพรุนแคปิลารีภายในตัวดูดซับเต็มหมดแล้ว ความชันที่เพิ่มขึ้นเมื่อ relative pressure เพิ่มขึ้นชี้ให้เห็นว่าตัวดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากขึ้น ปรากฏการณ์ที่มีจุดเปลี่ยนของเส้นกราฟนี้เกิดเช่นเดียวกับใน Type II คือเกือบเป็น monolayer สมบูรณ์

Type V การดูดซับคล้าย Type III ในช่วงความเข้มข้นต่ำแต่การดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เข้าสู่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับ Type IV เป็นปรากฏการณ์การดูดซับที่เป็นผลจากแรงดึงดูดซับและตัวดูดซับมีค่าน้อยๆ โดยขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 15-1,000 อัมสตรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอม

โดยทั่วไปสมการที่อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น นิยมเปลี่ยนเส้นโค้งให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วคำนวณหาค่าต่างๆ ด้วยสมการเพื่อใช้อธิบายการดูดซับ แต่ที่นิยมใช้มากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับด้วยดินคือ Langmuir adsorption isotherm และ Freudlich adsorption isotherm

2.5.2.1 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) [12]

แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแนวความคิดที่ว่า เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น จำนวนตัวถูกดูดซับ ที่ถูกจับตำแหน่ง binding sites บนตัวดูดซับก็เพิ่มขึ้น ขัดขวางการจับของโมเลกุลอื่น ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงเป็นสัดส่วนระหว่างตำแหน่ง binding sites ที่ว่างบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวดูดซับ และที่สภาวะสมดุลอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายการดูดซับ ลักษณะการดูดซับจึงเป็นลักษณะ monomolecular layer โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monomolecular layer คือ มีจำนวนตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ แน่นอน และเมื่อเกิดการดูดซับแล้ว อิออนหรือโมเลกุลจะไม่ซ้อนทับซึ่งกันและกัน หรือชั้นของตัวดูดซับมีความหนาเท่ากันหมด
2. เมื่อดูดซับแล้ว ตัวถูกดูดซับจะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันในพื้นที่ผิวสัมผัส และตัวถูกดูดซับจะไม่มีผลกระทบต่อกัน
3. พื้นที่ผิวในการดูดซับ มีตำแหน่งและกลไกการดูดซับเหมือนกัน ทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเหมือนกันเป็น homogeneous surface
4. พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้

$$\theta = q/q_m \qquad (2.1)$$

โดยที่ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (กรัม/กิโลกรัม)

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

θ คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_a = k_a C (1 - \theta) \qquad (2.2)$$

โดยที่ k_a คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/นาที)

C คือ ค่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (กรัม/เมตร^3)

อัตราการคายซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด

$$r_d = k_d \theta \qquad (2.3)$$

โดยที่ k_d คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (กรัม/เมตร^3•นาที)

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_a C (1 - \theta) = k_d \theta \qquad (2.4)$$

$$\theta / (1 - \theta) = k_a C / k_d \qquad (2.5)$$

$$\theta = k_a C (1 - \theta) / k_d \qquad (2.6)$$

$$\theta = (k_a / k_d) C - (k_a / k_d) C \theta \qquad (2.7)$$

$$\theta + (k_a / k_d) C \theta = (k_a / k_d) C \qquad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta [1 + (k_a / k_d) C] = (k_a / k_d) C \quad (2.9)$$

ถ้ากำหนดให้

$$K_A = k_a / k_d \quad (2.10)$$

$$\theta = (K_A C) / (1 + K_A C) \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.1 กำหนดให้

$$\theta = q / q_m$$

จะได้สมการ

$$q = (q_m K_A C) / (1 + K_A C) \quad (2.12)$$

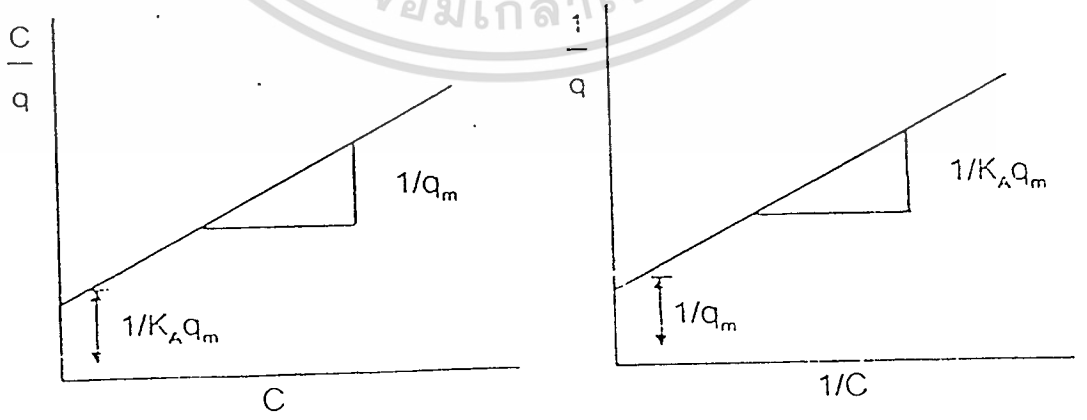
จัดรูปให้อยู่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$$C / q = (1 / K_A q_m) + C / q_m \quad (2.13)$$

หรือ

$$1 / q = 1 / q_m + [1 / K_A q_m] (1 / C) \quad (2.14)$$

ค่า q_m และค่า K_A สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 สมการการดูดซับของฟลอยลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของ Freundlich ตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่า

1. การดูดซับมีลักษณะเป็น monolayer
2. ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว
3. ใช้ได้ดีกับตัวถูกดูดซับที่มีแนวโน้มถูกดูดได้ง่ายและมีความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง

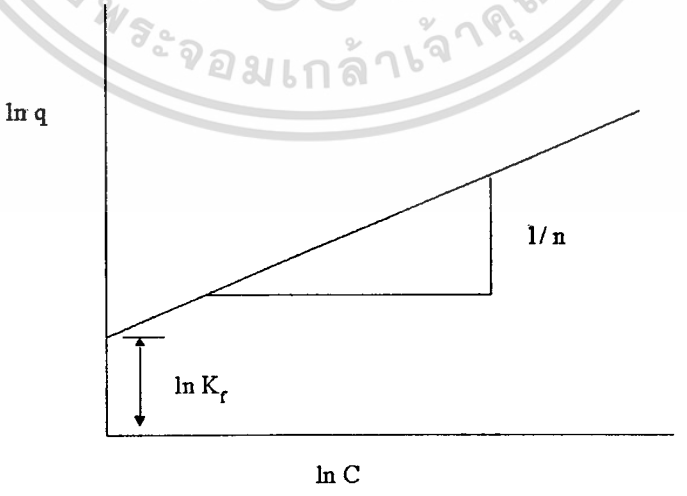
สามารถเขียนสมการการดูดซับของฟลอยลิช ได้ดังนี้

$$q = K_F C^{1/n} \quad (2.15)$$

หรือ

$$\ln q = \ln K_F + 1/n \ln C \quad (2.16)$$

เมื่อนำค่า ln q กับ ln C มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ ln q เป็นแกน y และ ln C เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ ln K_F ได้ดังรูปที่ 2.6 เมื่อค่า n มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เมื่อ 1/n << 1 หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดกับแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะของ Freundlich isotherm จะสังเกตุเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ตราบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการของฟลอยลิคที่สำคัญข้อหนึ่ง คือทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.6 ลักษณะของไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟลอยลิช [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.6 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ (Models for Adsorption Rate) [13, 14]

2.6.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$dq_t / dt = k_1 (q_e - q_t) \quad (2.17)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$

$q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 / 2.303)t \quad (2.18)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน

2.6.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

สมการแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถเขียนได้เป็น

$$dq_t / dt = k_2 (q_{e2} - q_t)^2 \quad (2.19)$$

ทำการอินทิเกรตจาก $t = 0 \longrightarrow t = t$

$q_t = 0 \longrightarrow q_t = q_t$

$$1 / (q_{e2} - q_t) = 1 / q_{e2} + k_2 t \quad (2.20)$$

$$t / q_t = \{1 / (k_2 q_{e2}^2)\} + (1 / q_{e2}) t \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49420

โดยที่ q_{e2} คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)

q_t คือ ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่างๆ (กรัม/กิโลกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (กิโลกรัม/กรัม.นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y

2.7 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ[15]

จากค่าคงที่อัตราเร็ว k ในสมการอัตราเร็วของการดูดซับ ขึ้นโดยตรงกับอุณหภูมิ และค่าของ Ea เช่น ถ้า Ea มาก หรือที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ค่าคงที่อัตราเร็ว k น้อย ความสัมพันธ์ระหว่าง k กับ Ea และอุณหภูมิอยู่ในรูปสมการที่เรียกว่า สมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$k = Ae^{-Ea/RT} \qquad (2.22)$$

โดยที่ A คือ แฟกเตอร์ความถี่ของการชน

Ea คือ พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 (จูล/โมล.เคลวิน)

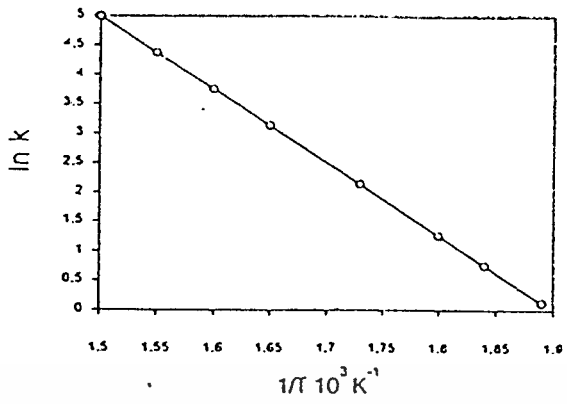
T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

ใส่ค่า ln เข้าทั้งสองข้างของสมการได้เป็น

$$\ln k = \ln A - Ea/RT \qquad (2.23)$$

เมื่อนำสมการ (2.24) มาเขียนกราฟระหว่าง ln k กับ 1/T จะได้กราฟเส้นตรงตามรูปที่ 2.7 สามารถหาค่า Ea ได้จากความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ [15]

2.8 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี [16,17]

2.8.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี

ความร้อนของปฏิกิริยาหรือเอนทัลปี (heat or enthalpy of reaction) **เป็นเทอม**ที่ใช้บอกถึงปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือถูกคายออกมาต่อโมลของสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ความดันคงที่และงานที่เกี่ยวข้องเป็นแบบขยายตัวหรือหดตัวเท่านั้น

ให้เอนทัลปี คือ H

การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี คือ $\Delta H = H_2 - H_1$

Δ อ่านว่า เดลต้า (delta) 2 และ 1 เป็นสภาวะสุดท้าย (final state) และสภาวะเริ่มต้น (initial state) ตามลำดับ

เครื่องหมายบวกลบของเอนทัลปี ควรทำความเข้าใจเรื่องเครื่องหมายบวกลบของเอนทัลปี เพื่อป้องกันปัญหาความสับสนไว้ก่อนดังนี้ เมื่อสารเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี

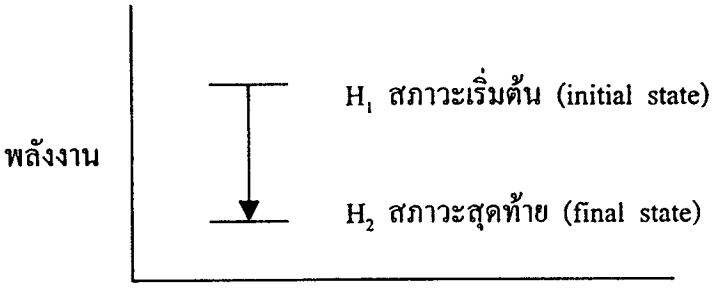
$$\Delta H = H_2 - H_1 \qquad (2.24)$$

H_2 คือ สภาวะสุดท้าย (final state)

H_1 คือ สภาวะเริ่มต้น (initial state)

ในกรณีที่ H_2 มีค่าน้อยกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพมากกว่า H_1 (ระบบที่มีเสถียรภาพมากกว่าจะมีพลังงานน้อยกว่า) การเปลี่ยนสถานะนี้ (รูปที่ 2.8) ความร้อนคายออกมาจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน [16]

ΔH = ลบ = ความร้อนคายออกมาจากระบบ (exothermic)

ตรงกันข้ามถ้า H_2 มีพลังงานมากกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพน้อยกว่า H_1 ความร้อนจะต้องถูกดูดเข้าไปในระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเราจะต้องให้ความร้อนแก่ระบบ

ΔH = บวก = ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (endothermic)

เอนโทรปี (entropy, S) คือ ปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเอนโทรปีบอกให้ทราบว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนกระจายตัวอยู่ในระบบอย่างไม่เป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็ยิ่งมีค่ามาก ในทางตรงกันข้าม ยิ่งระบบมีความเป็นระเบียบมากเพียงใด เอนโทรปีก็จะลดลงเพียงนั้น

ให้ S_1 = เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น

S_2 = เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย

และ $\Delta S = S_2 - S_1$

ซึ่ง ΔS = การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

ΔS เป็นปริมาณที่วัดได้โดยให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความเป็นระเบียบเริ่มลดลงหรือไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น เอนโทรปี S_2 มีค่าสูงขึ้น ($\Delta S > 0$) และถ้าเพิ่มความร้อนขึ้นไปอีก ความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ S_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นเห็นได้ว่า ΔS แปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เพิ่มให้กับระบบ

ถ้า ΔS = บวก ระบบมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

ถ้า ΔS = ลบ ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหรือความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนฮอฟต์

จากสมการของกิบส์และเฮลโมลทซ์ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล (K) ตามสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) ได้ดังนี้คือ

$$d(\Delta G^0 / T) = (-\Delta H^0 / T^2) / dT \qquad (2.25)$$

ณ ที่สภาวะสมดุล $\Delta G^0 = -RT \ln K$

ดังนั้น $d(-R \ln K) = (-\Delta H^0 / T^2) / dT$

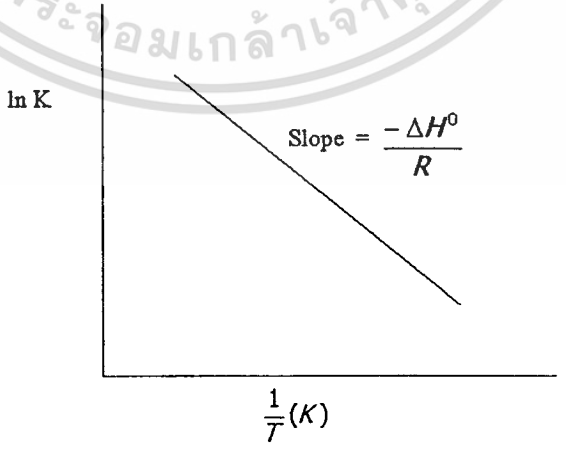
$$d(\ln K) = (\Delta H^0 / RT^2) dT \qquad (2.26)$$

หรือ $$d(\ln K) = (-\Delta H^0 / R) d[1/T] \qquad (2.27)$$

เรียกสมการที่ (2.27) ว่า สมการของแวนท์ฮอฟฟ์ (van't Hoff equation) เมื่ออินทิเกรต สมการ (2.27) และสมมติว่า ΔH^0 ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น

$$\ln K = (-\Delta H^0 / R)(1/T) + \text{ค่าคงที่} \qquad (2.28)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง ln K และ 1/T จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และจากค่าความชันของกราฟ สามารถนำไปคำนวณหา ΔH^0 ได้



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnK และ 1/T [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี (Thermodynamic and Equilibrium)

กิบส์ (Josiah W. Gibbs) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้นำฟังก์ชันทางเทอร์โมไดนามิกส์อีกฟังก์ชันหนึ่งมาใช้ คือ G เรียกว่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy) หรือเรียกสั้นลงว่าพลังงานอิสระ มีนิยามดังนี้

$$G = H - TS \qquad (2.29)$$

สังเกตว่าปริมาณทั้งหมดในสมการ (2.30) เป็นสมบัติของระบบ รวมทั้งอุณหภูมิ T ด้วยและจะเห็นว่า G มีหน่วยเป็นพลังงาน (ทั้ง H และ TS ก็มีหน่วยเป็นพลังงาน) และเป็นฟังก์ชันสภาวะเช่นเดียวกับ H และ S

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (ΔG) ของระบบในกระบวนการที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad (2.30)$$

สรุปสภาวะการเกิดปฏิกิริยาและสภาวะที่ระบบจะอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิและความดันคงที่โดยอาศัยค่าของ ΔG ได้ดังนี้

$\Delta G < 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า

$\Delta G > 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ

$\Delta G = 0$ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในสมการ (2.31) ทำนายเครื่องหมายของ ΔG นั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าของ ΔH และ ΔS ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) และ ΔS มีค่าเป็นบวก (ปฏิกิริยาทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น) ΔG มีแนวโน้มที่จะเป็นลบ แต่อุณหภูมิก็อาจมีผลต่อทิศทางของปฏิกิริยาด้วยว่าจะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางใด ความสัมพันธ์ที่เป็นได้ 4 แบบ คือ

- ถ้าทั้ง ΔH และ ΔS มีค่าเป็นบวก ΔG จะเป็นลบก็ต่อเมื่อ $T\Delta S$ มีค่ามากกว่า ΔH นั่นคือเมื่อ T มีค่าสูง
- ถ้า ΔH เป็นบวกและ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นบวกเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- ถ้า ΔH เป็นลบและ ΔS เป็นบวก ΔG จะเป็นลบเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะมีค่าเท่าใด
- ถ้า ΔH เป็นลบและ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นลบเฉพาะเมื่อ $T\Delta S$ มีค่าน้อยกว่า ΔH นั่นคือ T มีค่าต่ำ

ในกรณีแรกและกรณีสุดท้าย อุณหภูมิที่จะทำให้ ΔG มีค่าเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ ΔH และ ΔS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ ΔG ในทั้ง 4 กรณี

ΔH	ΔS	ΔG
+	+	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางตรงกันข้าม
+	-	ΔG มีค่าเป็นบวกเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางตรงกันข้ามที่ทุกอุณหภูมิ
-	+	ΔG มีค่าเป็นลบเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่ทุกอุณหภูมิ
-	-	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นได้เอง

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาคือ

$$\Delta G^0 = G^0(\text{สำหรับผลิตภัณฑ์}) - G^0(\text{สารตั้งต้น})$$

ΔG^0 ในสมการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นในสภาวะมาตรฐานกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ในสภาวะมาตรฐานเช่นกัน สมมติว่าเราเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายโดยให้สารตั้งต้นทุกชนิดอยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือความเข้มข้นเท่ากับ 1 M) ทันทีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ก็จะไม่อยู่ในสภาวะมาตรฐานอีกต่อไป เพราะต่างก็จะไม่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 M ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช่มาตรฐาน เราจะต้องทำนายทิศทางของปฏิกิริยาจาก ΔG ไม่ใช่จาก ΔG^0 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG และ ΔG^0 คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \qquad (2.31)$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol) T เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ของปฏิกิริยา และ Q เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา จากสมการนี้จะเห็นว่า ΔG มีค่าขึ้นอยู่กับ ΔG^0 และ $RT \ln Q$ สำหรับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T ใดๆ ΔG^0 จะมีค่าที่แน่นอนแต่ค่าของ $RT \ln Q$ มีค่าที่ไม่ แน่นอนเพราะ Q อาจเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของสารในปฏิกิริยา เราพิจารณากรณีพิเศษ 2 กรณีดังนี้คือ

กรณีที่ 1 : ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นลบมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นบวกมากพอที่จะหักล้างกับพจน์ ΔG^0 ได้จนกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมากพอ

กรณีที่ 2 : ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นบวกมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นลบมากกว่าความเป็นบวกของ ΔG^0 เฉพาะเมื่อมีสารผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อยและสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยนิยามแล้วที่สมดุล $\Delta G = 0$ และ $Q = K$ เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลดังนั้นจะได้

$$0 = \Delta G^0 + RT \ln K$$

หรือ
$$\Delta G^0 = -RT \ln K \qquad (2.32)$$

สมการที่ (2.32) เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งเพราะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ดังนั้น ถ้าทราบค่าของ K เราก็จะคำนวณค่า ΔG^0 ได้ หรือถ้าทราบค่าของ ΔG^0 ก็จะคำนวณหา K ได้เช่นกัน

2.9 สีย้อม (Dyestuff)[18, 19]

สีย้อม (Dyestuff) หมายถึง สารเคมีที่มีสี (Dyes) ที่สามารถเกาะติดเส้นใยได้ไม่หลุดออกง่าย ทำให้วัตถุนั้นมีสีเหมือนสีย้อม

2.9.1 องค์ประกอบของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ โครงสร้างทางเคมี มี 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีได้โดยสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลต UV และ ช่วงที่มองเห็นได้ (Visible range) VS ตั้งแต่ 200-800 nm

ตัวอย่าง		
	C = C	ethylenic chromophores
	C = O	carbonyl chromophores
	- N = O	nitroso chromophores
	- N = O	nitro chromophores
	- N = N -	azo chromophores

2. กลุ่มออกโซโครม (Auxochrom group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใย ปกติแล้วหมายถึง saturated group ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 nm แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิด resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นมากขึ้น

ตัวอย่าง	ออกโซโครม	ได้แก่
	- OH	hydroxyl
	$- NH_2$	amino
	- COOH	carboxylic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

1. สีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyes) เป็นสีย้อมที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น สีดำจากผลมะเกลือ สีครามได้มาจากต้นคราม หรือสีม่วงแดงได้จากครั่ง นอกจากนี้ยังมีเปลือกไม้หลายชนิดที่นำมาใช้ย้อมเสื้อได้

2. สีสังเคราะห์ (Synthetic Dyes) William Henry perkin เป็นคนแรกที่สังเคราะห์สีม่วงอ่อน (Mauve) ขึ้นได้โดยบังเอิญจาก alinine ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หลังจากนั้นจึงเกิดสีสังเคราะห์นานาชนิดขึ้น เช่น สีแดง (Fuchsin) สีส้มและเหลือง (Azo dyes) และสีชมพู (Phenolphthalein) ปัจจุบันนิยมใช้สีสังเคราะห์มากขึ้น เพราะราคาถูกกว่า สวยกว่า ทนทานกว่า มีสีให้เลือกมากมาย การย้อมให้สีสม่ำเสมอไม่เป็นด่างเป็นดอกดวง

2.9.3 การจำแนกประเภทของสีย้อม (Classification of Dyes)

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ๆ ได้ดังนี้ คือ

2.9.3.1 จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

1) สีย้อมแอซิด (Acid dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายในสารละลายกรดและใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ไนลอน หนังแท้ และกระดาษ โดยทั่วๆ ไปสีย้อมแอซิดจะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบเอโซไตรเอริลมีเทนหรือแอนทราควิโนน

2) สีย้อมอะโซอิก (Azoic dyes)

เป็นสีย้อมที่ทำให้เกิดสีขึ้นบนเส้นใยโดยการเตรียมเป็นเกลือไดอะโซเดียมก่อน และเมื่อนำไปสัมผัสกับเส้นใยแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสีย้อมบนเส้นใยที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยทำให้เกลือไดอะโซเดียมไม่สลายตัวจนกระทั่งทำปฏิกิริยาควบคู่กับเส้นใยเป็นสีย้อมอะโซอิกเป็นสีย้อมที่ให้สีสดใสสว่างเจิดจ้า และมีสมบัติติดทนนาน ดังนั้นจึงทนทานต่ออายุการใช้งาน และใช้สำหรับงานพิมพ์บนผ้าฝ้าย

3) สีย้อมเบสิก (Basic dyes)

เป็นสีย้อมที่มีหมู่อะมิโนหรืออนุพันธ์ของหมู่อะมิโน สีย้อมเบสิกจะละลายในสารละลายกรด และไม่ละลายในสารละลายเบส โครงสร้างส่วนใหญ่ของสีย้อมเบสิกจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกกลุ่มของสารประกอบไตรเอริลมีเทน (triarylmethane) หรือแซนทีนส์ (xanthenes) สีย้อมเบสิกสามารถใช้ย้อมขนสัตว์หรือใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ (mordant) เพื่อย้อมฝ้าย สีย้อมเบสิกสามารถนำไปใช้เป็น หมึกพิมพ์กระดาษคาร์บอนสำหรับทำกระดาษสำเนา และใช้สำหรับผลิตเป็นแถบหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ดีด สีย้อมเบสิกสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นหมึกเขียน และหมึกพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สีย้อมไดเร็ก (Direct dyes)

เป็นสีย้อมที่สามารถนำไปใช้สำหรับย้อมฝ้ายได้โดยตรง และไม่ต้องใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ สีย้อมไดเร็กสามารถใช้สำหรับย้อมผลิตภัณฑ์ฝ้ายผสม และใช้ย้อมขนสัตว์หรือใช้ย้อมไหม โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเร็กเป็นสีย้อมกลุ่มเอโซ สมบัติการละลายโดยทั่วๆ ไปแล้วสามารถทำให้ลดลงโดยการเติมเกลือลงไปในอ่างย้อมสี สีย้อมไดเร็กบางตัวสามารถใช้ย้อมบนเส้นใยโดยทำปฏิกิริยาการเติมเกลือไดอะโซเดียมบนวัสดุก่อน จากนั้นจึงจะทำปฏิกิริยาการควบคู่ (coupling) เพื่อทำให้เกิดเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายบนเนื้อผ้าหรือเส้นใย สารประกอบที่ใช้กันโดยทั่วๆ ไปสำหรับการทำปฏิกิริยาควบคู่ก็คือเบต้าแนฟทอล

5) สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse dyes)

เส้นใยสังเคราะห์จำนวนมาก เช่น เส้นใยเซลลูโลสแอซิเตต เส้นใยพลาสติก และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ จะมีความยากลำบากในการย้อมติดสีดิสเพอร์สมีความสามารถในการย้อมได้ดีกับวัสดุดังกล่าว และสามารถย้อมสีได้เนื้อเนียนผิวดี โดยสีจะกระจายตัวดูดซับและแทรกตัวลงบนเส้นใยสีย้อมกลุ่มเอโซสามารถใช้เป็นสีย้อมดิสเพอร์สได้ แต่สีย้อมกลุ่มแอนทราควิโนนจะใช้ประโยชน์เป็นสีย้อมดิสเพอร์สที่ดีกว่า เนื่องจากสมบัติที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามสีย้อมกลุ่มเอโซและสีย้อมกลุ่มแอนทราควิโนนสามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในเส้นใยได้ดี โดยหมู่เอทาโนลามีน (- NH $-CH_2CH_2$-OH) ซึ่งเป็นหมู่ที่พบในสีย้อมดิสเพอร์ส จะช่วยในการกระจายตัวและเกิดการดูดซับเข้าไปในเส้นใยได้ดี

6) สีย้อมรีแอ็กทีฟ (Reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่เกิดจากปฏิกิริยาสร้างพันธะโควาเลนท์เชื่อมระหว่าง สีย้อมและเส้นใยเซลลูโลส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย้อมโดยสีชนิดนี้จะทนทานต่อการซักล้างได้ดีเยี่ยม สีย้อมรีแอ็กทีฟเป็นสีย้อมชนิดใหม่ที่สุดซึ่งได้พัฒนาในปี ค.ศ. 1956 สามารถใช้ในการย้อมฝ้าย เรยอน และไนลอนบางชนิด

7) สารฟลูออเรสเซนต์ไวเทนนิง

สารฟลูออเรสเซนต์ไวเทนนิงจะช่วยทำให้เสื้อผ้าที่เหลืองกลับขาวพิเศษกว่า และมีความสว่างสดใส ดังนั้นจึงไปใช้ในอุตสาหกรรมสบู่ อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสีทา และอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีชื่อว่าสารเพิ่มความสดใส (optical brightener)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) สีอาหาร ยา และเครื่องสำอางค์

ในปัจจุบันจะมีประมาณ 52 สีเท่านั้น เนื่องจากมีการควบคุมอย่างเข้มงวดในการใช้งาน โดยคณะกรรมการอาหารและยาแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ความบริสุทธิ์และความปลอดภัยจะมีการควบคุมอย่างดีเป็นพิเศษเพื่อที่จะรับรองความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค ในปัจจุบันมีการค้นคว้ากันอย่างมากในสีตระกูลนี้ เพื่อที่จะพัฒนาให้สียึดเกาะกับสารพอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อบริโภคผ่านเข้าไปในระบบการย่อยอาหารแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพหรือตกค้างภายในร่างกาย สีตระกูลนี้มีหลายตัวที่ได้ผ่านการทดสอบความเป็นพิษ เรื้อรัง และทดสอบผลตกค้างต่อผู้บริโภค และได้ผ่านการยอมรับแล้ว ซึ่งมีทั้งสีที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นแอนทราควิโนน เอโซ และอินดิกอยด์

9) สีย้อมมอร์แดนต์ (Mordant dyes)

สีย้อมมอร์แดนต์บางตัวเมื่อรวมกับเกลือของโลหะจะให้ผลิตภัณฑ์สีย้อมที่ไม่ละลาย ซึ่งเรียกว่า เลคส์ (lakes) และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นรงควัตถุ (pigments) ถ้าหากต้องการย้อม สิ่งทอที่ผลิตจากฝ้าย ขนสัตว์ หรือเส้นใยโปรตีน ก็จะนำสิ่งทอเหล่านี้ใส่เกลือของอะลูมิเนียม เกลือโครเมียม หรือเกลือเหล็ก และเมื่อสิ่งทอดังกล่าวสัมผัสกับสีย้อมจะทำให้เกิดสีย้อมที่ไม่ละลายโดยเกลือของโลหะจะตกตะกอนบนเส้นใย ซึ่งทำให้สีย้อมมีความทนทานต่อแสง และทนทานต่อการซักล้างได้ดี หมู่ -OH และหมู่ -COOH ที่เกาะอยู่บนสีย้อมเอโซหรือแอนทราควิโนนจะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะเกิดเป็นสีมอร์แดนต์ได้

10) สีย้อมโซเว็นท์ (Solvent dyes)

เป็นสีย้อมที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ สารละลายไฮโดรคาร์บอนคลอริเนต หรือสารละลายแอมโมเนีย สีย้อมโซเว็นท์เป็นสีย้อมที่สามารถช่วยในการย้อมสีสำหรับพวกเส้นใยสังเคราะห์ที่มีความยากลำบากในการย้อมสี เช่น เส้นใยพอลิเอสเทอร์ เส้นใยพอลิอะคริเลต และเส้นใยเซลลูโลสไตรแอซิเตต ตัวทำละลายที่ใช้ได้ดีในปัจจุบัน คือเปอร์คลอโรเอทิลีน เทคโนโลยีการย้อมสีชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาของสีย้อมตกค้างในการย้อมได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการย้อมสี สีย้อมโซเว็นท์ สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสีที่ใส่ในน้ำมัน ขี้ผึ้ง วานิช ครีมขัดรองเท้า ลิปสติก และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11) สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur dyes)

เป็นสีย้อมที่มีราคาถูกและใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายให้มี dull shades สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่มีความทนทานต่อการซีดจางสีเนื่องจากแสงทนทานต่อการซักล้าง และทนกรดแต่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนสีกับคลอรีน และน้ำยาฟอกสีไฮโปรคลอไรท์ หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์มีความยุ่งยากซับซ้อน และยังไม่เป็นที่รู้จักกันแน่นอน สีย้อมซัลเฟอร์ทำการผลิตโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารซัลไฟด์หรือพอลิซัลไฟด์กับสารประกอบอะโรมาติกส์ที่มีหมู่คลอรีน สีย้อมซัลเฟอร์โดยทั่วๆ ไปจะไม่ค่อยมีสีเมื่ออยู่ในรูปรีดิวซ์ในสารละลายของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ แต่มีสีเข้มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะออกซิเดชัน สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่รู้จักกันอย่างดี และใช้กันมาเป็นเวลานาน

12) สีย้อมแวต (Vat dyes)

สีย้อมกลุ่มนี้จะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่ยุ่งยาก ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนนหรืออินแดนทรีน (indanthrene) ในสารละลายที่สภาวะรีดักชันสีย้อมกลุ่มนี้จะละลายในสารละลายอัลคาไลน์ และไม่มีสีซึ่งเรียกว่า leuco vats สารละลายดังกล่าวจะใช้ใส่ลงไปในเส้นใยฝ้ายซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสัมผัสกับอากาศจะเกิดเป็นสีขึ้นมา สีย้อมแวตเป็นสีที่มีราคาแพงสามารถใช้กับสิ่งทอที่ใช้ประจำวันที่มีการซักล้างบ่อยๆ เช่น เสื้อเชิ้ตสุภาพบุรุษ สีย้อมแวตสามารถนำไปใช้เป็นสีพิมพ์ผ้า สีพิมพ์ผ้าจะมีส่วนผสมของโซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ และสารประกอบอัลดีไฮด์ที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถนำไปทำการพิมพ์สีบนผ้าก่อน ต่อจากนั้นนำไปทำให้เกิดเป็นสีโดยผ่านผ้าเข้าไปในอ่างที่บรรจุสารออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไดโครเมต หรือโซเดียมเปอร์โบเรต

2.9.3.2 จำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

1) สีไนโตรโซ (Nitroso dyes) โครงสร้างทางเคมีเป็นสารอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตรโซ (-N=O) และหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ในตำแหน่งที่ติดกันในวงเบนซีน ซึ่งในการย้อมจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก โครเมียม โคบอลต์ และนิกเกิล

2) สีไนโตร (Nitro dyes) โครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตร ($-NO_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรือหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ในตำแหน่งที่ติดกันหรือตรงกันข้ามในวงแหวนวงเบนซีน โครงสร้างของสารประกอบอะโรมาติกเป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ แบ่งออกเป็นสีซัลโฟเนตเตดไนโตร (Sulfonated nitro dyes) ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และสีอันซัลโฟเนตเตดไนโตร (Unsulfonated nitro dyes) เป็นสี pigment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สีแอโซ (Azo dyes) เป็นสีที่มีหมู่แอโซ (-N=N-) เป็นโครโมฟอร์และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรืออะมิโน ($-NH_2$) เป็นออกโซโครม เป็นกลุ่ม สีย้อมที่สำคัญมาก ส่วนใหญ่สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมักเป็นสีแอโซ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้ใช้ย้อมได้กับเส้นใยทุกชนิด

4) สีแอโซอิก (Azoic dyes) เป็นสีแอโซที่ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายต่างๆ ต้องเตรียมขึ้นบนเส้นใย มีโครโมฟอร์ ออกโซโครมเหมือนสีแอโซ

5) สีสติลบีน (Stilbene dyes) โครงสร้างมีสติลบีน (C_6H_5-CH=CH-C_6H_5) และหมู่แอโซเป็นโครโมฟอร์

6) สีคาโรทีนอยด์ (Carotenoid dyes) โครงสร้างมีหมู่โซ่พอลิอีนของคาร์บอนอย่างน้อย 18 อะตอม เป็นโครโมฟอร์ สีชนิดนี้เป็นสีทั่วไปที่พบในธรรมชาติ สำหรับสีคาโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบทา-คาโรทีน เป็นต้น

7) สีไดฟีนิลมีเทน (Diphenylmethane dyes) โครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลมีเทน มีหมู่ -C=NH เป็นโครโมฟอร์และหมู่อะมิโน เป็นออกโซโครม ส่วนใหญ่ใช้ย้อมกระดาษ นอกจากนี้อาจใช้ย้อมขนสัตว์ ไหม หนัง ฝ้าย หรือเส้นใยอะคริลิก

8) สีแซนทีน (Xanthrene dyes) โครงสร้างหลักเป็นแซนทีน (Dibenzo-1,4-pyran) และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ นิยมเรียกสีชนิดนี้ว่า สีอะมิโนแซนทีน หรือสีไฮดรอกซิลแซนทีน สีย้อมกลุ่มนี้ให้สีสดใส สารละลายให้ฟลูออเรสเซนต์ใช้ย้อมขนสัตว์และไหมได้ ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แทนนินเป็นมอร์แดนท์

9) สีอะคริดิน (Acridine dyes) โครงสร้างหลักเป็นอะคริดินและมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม มีโครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ สีชนิดนี้นิยมใช้ย้อมหนัง และใช้เป็นสีเบสิคสำหรับย้อมไหมและเซลลูโลส

10) สีควิโนลิน (Quinoline dyes) โครงสร้างหลักเป็นควิโนลิน สีกลุ่มนี้มีโครโมฟอร์คือ 2(2-Quinolyl)-1,3-indandiene สีพวกนี้นิยมใช้เป็นตัวทำละลายและสีเบสิคสำหรับย้อมกระดาษ

11) สีแอนทราควิโนน (Anthraquinone dyes) โครงสร้างหลักคือแอนทราควิโนน เป็นโครโมฟอร์และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม นิยมใช้เป็นสีวัต สีแอซิด สีมอร์แดนท์

12) สีอินดิกอยด์ (Indigoid dyes) โครโมฟอร์คือ -CO-$\overset{|}{C}$=$\overset{|}{C}$-CO- และมีหมู่อะมิโนหรือซัลเฟอร์เป็นออกโซโครม ใช้เป็นสีวัตในการย้อมฝ้าย

13) สีไทอะโซล (Thiazole dyes) โครงสร้างหลักคือ วงแหวน ไทอะโซล เป็นโครโมฟอร์ มีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม สีชนิดนี้ใช้ย้อมฝ้ายได้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14) สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes) เป็นสีที่โครงสร้างทางเคมี มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบทางโครงสร้างทางเคมี สีซัลเฟอร์นี้ไม่ละลายน้ำและสีไม่ติดเส้นใย ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบลิวโค (Leuco compound) โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ก่อน ทำให้สีเกาะติดเส้นใย นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ผ้าไหม และขนสัตว์

15) สีพธาโลไซยานิน (Phthalocyanin dyes) สีกลุ่มนี้มี tetrabenzoporphyrazine เป็นโครโมฟอร์และโครงสร้างโมเลกุลจับโลหะ มีสมบัติคงทนต่อแสง ความร้อน กรดและเบส ใช้สำหรับสีเคลือบผิว หมึกพิมพ์ พลาสติก เส้นใย ยาง เป็นต้น

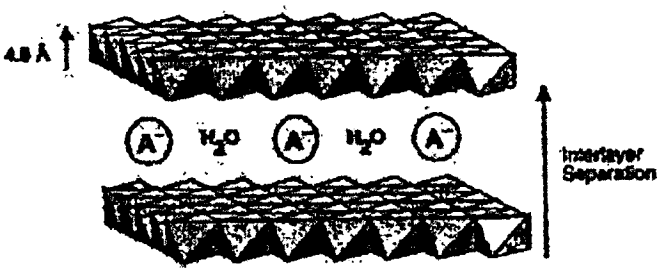
2.10 ดินเหนียวประจุลบไฮโดรทัลไซท์ (Hydrotalcite Anionic Clay)[4, 20]

ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ (Hydrotalcite clay) เป็นแร่ธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์ที่อุณหภูมิและความดันปกติกับสารละลายผสมเจือจางของแมกนีเซียมคลอไรด์และอลูมิเนียมคลอไรด์กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ไฮโดรทัลไซท์เป็นตัวดูดซับที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุลบกับสารที่มีประจุลบเช่น พวกน้ำเสียที่มีประจุลบและส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่เป็นพิษ คือ สารฮิวมัส น้ำเสียสุดท้ายของขบวนการฟอกย้อม และสารชีวภาพจากขบวนการผลิตอาหาร โดยจะดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์หรือโดยการเข้าไปอยู่ชั้นในของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ (Interlayer region) โดยประจุลบที่ใช้แลกเปลี่ยนของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ คือ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}- hydrotalcite) ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ เป็นแบบ ชั้นคู่ (layered doubled hydroxide {LDH}) มีสูตรทั่วไปเป็น

$$[Mg_{1-x}Al_x(OH)_2]^{x+}[A^{n-}_{x/n}.2H_2O]$$

ซึ่งมีประจุบวกและชั้นในมีประจุลบทำให้ประจุรวมเป็นกลาง เกิดการสลายตัวเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ ออกมาเมื่อนำสารละลายออกไซด์ที่ได้ไปใส่ในสารละลาย ทำให้สามารถกลับมาเป็นโครงสร้างดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เริ่มต้นได้ ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สามารถสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยขบวนการง่ายๆ คือ นำมาให้ความร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อระเหยสารอินทรีย์ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 รูปของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ [4]

กลไกการดูดซับของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) โมเลกุลของสีย้อมจะดูดซับบนประจุที่พื้นผิวของดินเหนียว กลไกแบบนี้เห็นได้มากมาย เช่น คาร์บอนกัมมันต์ Porous silica อะลูมินากัมมันต์ และเรซิน โดยมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลัก

2) กลไกเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นประจุลบ โมเลกุลของสีย้อมแสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบสามารถแลกเปลี่ยนกับชั้นในของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เป็นประจุลบของคาร์บอเนต

2.11 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย [21]

น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งปกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้คือ

1) สีย้อม ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2) สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จ แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- สารช่วยย้อม (Auxiliaries chemicals) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring agent) สารช่วยเปียก (Wetting agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ (Levelling agent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารเคมีพื้นฐาน (Basic chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

- สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ กันยับ เป็นต้น สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

3) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อมและจะหลุดติดออกมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

4) เศษเส้นใย ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้ยใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

5) สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆ ที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่นๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปรอะเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบจำพวก Chlorinated Benzene พวกสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องเหล่านี้ เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียภายหลัง

2.12 สมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม[21]

จากการสำรวจจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS) และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	สี (Pt Co)	จำนวนข้อมูล
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าหรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : จากการประเมินผลการสำรวจของบริษัท ช. รุ่งเลิศ แอสโซซิเอท จำกัด

2.13 ปัญหาเฉพาะตัวสำหรับน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อม[23]

1. ความหลากหลายของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำทิ้ง

การฟอกย้อมสิ่งทอเป็นกระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดต่างๆ มากมาย รวมแล้วหลายร้อยชนิด สารเคมีและสีย้อมเหล่านี้บางส่วนจะถูกดูดซึมไว้ในวัสดุสิ่งทอ แต่จะมีบางส่วนเหลือปะปนมาในน้ำทิ้ง สารเคมีและสีย้อมแต่ละชนิดจะมีสมบัติด้านความเป็นพิษ ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และด้านความยากง่ายในการกำจัดที่แตกต่างกันไป

2. ความหลากหลายของน้ำทิ้งในด้านคุณภาพและปริมาณ

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมจะมีความหลากหลายมาก ทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ย้อม กระบวนการ และชนิดของสีย้อมที่ใช้ ตลอดจนประเภทของเครื่องจักรที่ใช้

3. สีของน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมจะมีสี ทำให้เป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นและการกำจัดสีจากน้ำทิ้งก็เป็นเรื่องที่ทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมากด้วย

4. ปริมาณของน้ำทิ้งที่ค่อนข้างมาก

โรงงานฟอกย้อมมีปริมาณน้ำทิ้งที่ค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมอื่นๆ ทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการบำบัดน้ำทิ้งมาก ต้นทุนการจัดตั้งระบบบำบัดน้ำทิ้งจึงสูงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม[23]

1. การเลือกสีย้อมและสารเคมีที่ใช้อย่างเหมาะสม

การเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมจะเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลดของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษที่แตกต่างกันและการใช้ปริมาณสารเคมีหรือสีย้อมในปริมาณที่เหมาะสมเป็นการลดปริมาณสารเคมีส่วนเกิน ซึ่งปริมาณสารเคมีส่วนเกินนั้นจะกลายเป็นมลพิษทางน้ำต่อไป จากการศึกษากระบวนฟอกย้อมพบว่า หากสามารถลดปริมาณสารเคมีได้ 20-50% จะสามารถลดปริมาณของเสียในน้ำทิ้งในรูปของ BOD ได้ถึงปริมาณ 30-50% ผลอีกประการหนึ่งที่เห็นได้ชัดเจนก็คือค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีจะลดลงด้วย

2. การนำเทคโนโลยีที่สะอาดมาใช้ในโรงงาน

เทคโนโลยีที่สะอาดหมายถึง เทคโนโลยีที่เป็นการผลิตที่ปราศจากของเสียหรือมีของเสียน้อยที่สุดแม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ ส่วนใหญ่ยังคงมีราคาแพง และอาจต้องใช้เวลาในการปรับปรุงโรงงานเพื่อให้ใช้เทคโนโลยีให้นี้ค่อนข้างนานแต่ระยะยาว การเลือกใช้เทคโนโลยีนี้จะเป็นทางออกที่ดีที่สุด

3. การลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้ง

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งแปรผันตามปริมาณและความสกปรกของน้ำ ดังนั้นการลดปริมาณและความสกปรกของน้ำย่อมสามารถช่วยลดภาระในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานลงได้ วิธีลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งอาจทำได้มากมายหลายทาง เช่น การใช้น้ำด้วยความประหยัด การเลือกใช้สีที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดติดในเส้นใยสูง เป็นต้น

4. การใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง

เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีความหลากหลายมากทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ จึงควรที่โรงงานจะได้เลือกใช้กรรมวิธีในการบำบัดน้ำทิ้ง ที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของโรงงาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

5. การนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการลดปริมาณสีสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการนำกลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำอีกเท่าที่จะทำได้ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมควรจะเลือกใช้ให้เหมาะสมคือ เลือกชนิดที่สามารถใช้ซ้ำได้อีก โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาขึ้น เช่นเกิดเป็นจุดบนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า[21]

สีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้าสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี หรือ ชีวภาพ ความพยายามที่จะกำจัดสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไปหรือให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุดได้ถูกคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีการบำบัดอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจจะใช้ร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสม จำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน ดังรายระเอียดการศึกษาดังนี้

2.15.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีพวกสารสร้างตะกอน (Coagulant) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารโพลีอิเล็กโทรไลท์ เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็กๆ ขั้นตอนที่สองคือ การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (Flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็กๆ กับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้าๆ เพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็กๆ เหล่านั้น การหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้จำเป็นต้องทำการทดลอง ซึ่งนิยมเรียกว่า จาร์เทส (Jar test) โดยการทดลองจะ มีทั้งการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ประมาณ 1 นาที ตามด้วยการกวนช้า 20-70 รอบต่อนาที ประมาณ 20 นาที ในกระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยโคแอกกูเลชันนั้นมีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกหลายชนิด การนำสารสร้างตะกอนชนิดใดไปใช้นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัตถุประสงค์ และอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.2 การดูดติดผิว

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือ คอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือติดบนผิว โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูด (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดติด (Adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่มีโมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นที่ของอีกสารหนึ่งว่า สารดูดติดผิว (Adsorption) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล (Van der waals) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดติดผิวมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) แอกติเวทเต็ดซิลิกา เป็นต้น สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิว 50-200 m^2/g

2) ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอนินทรีย์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ คือ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม จึงจัดแยกไว้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ

3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ มีพื้นที่ผิว 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

โดยทั่วไปกระบวนการดูดติดผิวในกระบวนการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียจะนิยมใช้แอกติเวตเต็ดคาร์บอนซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวสูงตามไปด้วย

2.15.3 คลอรีเนชัน

คลอรีเนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซิงสูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.4 โอโซนเนชัน

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซิงสูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า การผลิตโอโซนกระทำได้โดยผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลท์ อะตอมของออกซิเจนจะถูกบังคับให้จับตัวกันใหม่กลายเป็นโอโซน (O_3) อากาศแห้ง 1 ลบ.ม. สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือเท่ากับ 1.4% โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโวนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลบ.ม. โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ แต่นิยมใช้ในรูปก๊าซมากกว่า โอโซนเป็นก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 ppm โดยปริมาตรโดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าให้คนดมโอโซนเข้มข้นประมาณ 1% (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที

2.15.5 เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรน

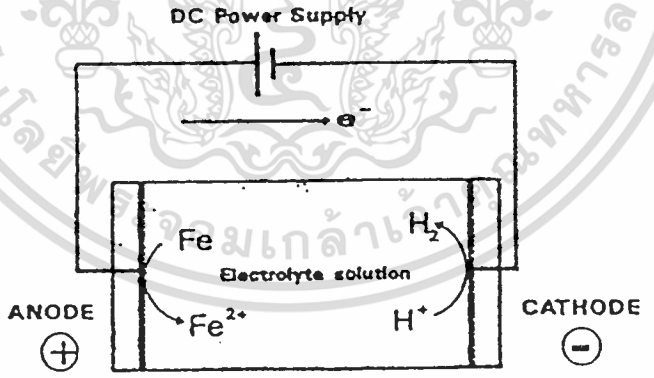
เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรนประกอบด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน และรีเวอร์ออสโมซิส วิธีอัลตราฟิลเตรชันมีหลักการทำงานของระบบคือ ใช้แผ่นเยื่อกระดาษ (membrane) แบบ Porous พวกเซลลูโลส-อะซิเตต หรือโพลีเมอร์สังเคราะห์ต่างๆ และอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1,034 กิโลนิวตัน/ตร.ม. เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500-500,000 และขนาดตั้งแต่ $2x10^{-6}$ ถึง $1x10^{-2}$ มม. ได้ สำหรับวิธีรีเวอร์สออสโมซิส สามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ $4x10^{-7}$ ถึง $6x10^{-5}$ มม. ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอัลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (Semipermeable membrane) ณ ความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตัน/ตร.ม. ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลส-อะซิเตต และไนล่อน

ในปัจจุบันนี้วิธีที่นำมาใช้อย่าง จริงจัง ได้แก่ วิธีอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งพบว่าสามารถนำ PVC โซดาไฟ สีย้อมอินดิโก และน้ำกลับมาใช้ได้อย่างประสบผลสำเร็จ แม้ว่ากระบวนการนี้จะปรากฏให้เห็นว่ากำจัดสีย้อม และสารที่เติมได้ทุกประเภท แต่ก็ยังไม่มีการนำมาใช้ในทางปฏิบัติเนื่องจากความยุ่งยากในการแยกสีผสม (สีผสมโดยส่วนใหญ่เป็นกรณีของน้ำจากขั้นตอนการย้อมและการตกแต่งสำเร็จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.15.6 ไฟฟ้าเคมี

วิธีไฟฟ้าเคมีหรืออิเล็คโตรเคมิคัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เดิมทีการบำบัดด้วยวิธีนี้ถูกใช้เพื่อกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และสีในน้ำทิ้ง ลักษณะการทำงานมีองค์ประกอบหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power source) ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว (Electrode) และสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte solution) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าสู่เซลไฟฟ้าเคมีที่ผ่านแผ่นเหล็ก (Fe) เป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าที่ขั้วบวก (Anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก ซึ่งทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสึกกร่อนและละลายออกมาในรูปของเฟอรัสอิออน (Fe^{2+}) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ Fe^{2+} จะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (Cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์อิออน (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดตกตะกอนของเฟอรัสอิออนและเฟอริกอิออนซึ่งจะดูดติดและช่วยตกตะกอนของโลหะหนักสีย้อมหรือสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสีย



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ [23] ได้ทำการทดลองเรื่องการใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้ายโดยการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีจากการใช้ถังกรอง ซึ่งมีคาร์บอนกัมมันต์และขี้เลื่อยเป็นสารดูดซับ และศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี ผลการทดลองกับการใช้สีสังเคราะห์ 4 ประเภทได้แก่ สีแอสิด สีเบสิค สีรีแอ็คทีฟ และสีไดเร็คท์ พบว่า สีที่ถูกดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ดีที่สุด คือ สีเบสิค รองลงมาคือ สีไดเร็คท์ สีรีแอ็คทีฟ และสีแอซิด ตามลำดับ ส่วนสีที่ถูกดูดซับด้วยขี้เลื่อยได้ดีที่สุด คือ สีเบสิค รองลงมาคือ สีแอสิด สีไดเร็คท์ และสีรีแอ็คทีฟ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภทรีแอ็คทีฟ และไดเร็คท์ระหว่างคาร์บอนกัมมันต์และขี้เลื่อย พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีของคาร์บอนกัมมันต์จะดีกว่า ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับสีประเภทเบสิคระหว่างคาร์บอนกัมมันต์และขี้เลื่อยมีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพของขี้เลื่อยในการดูดซับสีแอสิดดีกว่าคาร์บอนกัมมันต์

อภิชาต หิรัญจิตต์ [24] ได้ทำการกำจัดสีย้อมรีแอ็คทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของกระบวนการดูดติดผิว และโคแอกกูเลชัน โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์แบบผง และเถ้าลอยจากปล่องควันของโรงผลิตไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์เป็นสารดูดซับ ใช้สารส้มเป็นแอกกูแลนท์ และใช้โพลิเมอร์เป็นโคแอกกูแลนท์ร่วม โดยสีย้อมที่นำมาทดลองเป็นสีแดง และสีน้ำเงิน ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้คาร์บอนกัมมันต์ผงนั้นขึ้นอยู่กับโทนสีของน้ำเสีย และปริมาณคาร์บอนกัมมันต์ผงโดยน้ำเสียโทนสีแดงต้องการคาร์บอนกัมมันต์ผง 800 มก./ล. และน้ำเสียโทนสีน้ำเงินต้องการ 600 มก./ล. ในการกำจัดให้ได้ประสิทธิภาพ กำจัดสี 95% เท่ากัน ขณะที่เถ้าลอยนั้นให้ประสิทธิภาพกำจัดไม่แน่นอนขึ้นกับตัวอย่างของเถ้าลอย เนื่องจากลักษณะของเถ้าลอยแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างสูง ภายหลังกระบวนการดูดติดผิวด้วยเถ้าลอย น้ำใสส่วนบนไม่จำเป็นต้องใช้สารส้ม หรือโพลิเมอร์ช่วยในการตกตะกอน ส่วนการดูดติดด้วยคาร์บอนกัมมันต์ น้ำส่วนบนต้องการสารส้ม 30 มก./ล. ในการกำจัดสารแขวนลอยโดยไม่ต้องใช้โพลิเมอร์ช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัชรี คำธิดา และคณะ [25] ใช้ดินฟอกสีที่ใช้แล้วจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันถั่วเหลืองมาผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออกด้วยสารละลายเฮกเซนแล้วนำมาใช้ดูดซับสีอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ Basic Blue, Basic Yellow, Acid Blue และ Acid Red โดยพบว่าดินฟอกสี HSBE มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ได้ดีกว่า Acid dyes โดยสภาวะที่เป็นกลางและเบสเหมาะสมกับการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes ในขณะที่สภาวะที่เป็นกรดเหมาะต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Acid dyes สำหรับปริมาณดินฟอกสี HSBE ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีอินทรีย์ประเภท Basic dyes คือ 5 กรัม และสำหรับ Acid dyes คือ 50 กรัม

Shigeo Miyata [20] ได้ศึกษาหาไอโซเทอมของการแลกเปลี่ยนไอออนของสารประกอบดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ขึ้น (HT) โดยพิจารณาที่มีประจุลบแตกต่างกันคือ NO_3^- Cl^- F^- Br^- I^- OH^- SO_4^{2-} CO_3^{2-} และ Naphthol Yellow S (NYS^{2-}) พบว่า ค่าคงที่การแลกเปลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุลของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เป็นประจุลบแบบโมโนเวเลนท์ (monovalent) เรียงตามลำดับได้ดังนี้ $OH^- > F^- > Cl^- > Br^- > NO_3^- > I^-$ ส่วนที่เป็นประจุลบแบบไดเวเลนท์สามารถเรียงลำดับค่าคงที่ของการแลกเลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุลได้เป็น $CO_3^{2-} > NYS^{2-} > SO_4^{2-}$ โดยค่าคงที่การแลกเปลี่ยนไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางของประจุลบลดลง

F-C WU, R-L. Tseng และ R-S. Juang[26] ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์และกลไกของการดูดซับของสีย้อมแบบการค้า คือ สีย้อมเบสิค (BB69) และ สีย้อมไดแร็คท์ (DR227) โดยใช้ดินเหนียวกัมมันต์ ดินเหนียวที่ใช้ถูกกระตุ้นโดยกรดซัลฟูริก โมเดลง่ายๆ ทางจลนศาสตร์ที่ใช้พิจารณาการดูดซับ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง และแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง หลังจากทดสอบพบว่าการดูดซับของสีย้อมทั้งสองเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จากแบบจำลองการดูดซับที่เหมาะสมสามารถนำค่าคงที่อัตราเร็วไปหาค่าพลังงานกระตุ้นที่อุณหภูมิในช่วง 15-75 องศาเซลเซียส พบว่าพลังงานกระต้นของสีย้อมเบสิค (BB69) คือ 8.03 kJ/mol และสีย้อมไดแร็คท์ (DR227) คือ 17.5 kJ/mol จากค่าทางเทอร์โมไดนามิกพบว่า ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG) มีค่า เป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R.S. Juang, F.C. Wu และ R.L. Tseng [27] ได้ทำการศึกษาดินเหนียวเบนโทไนท์ที่เป็นสารอนินทรีย์ราคาถูกมากระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกมาใช้เป็นตัวดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม 6 ชนิด คือ สีย้อมเบสิค 2 ชนิด สีย้อมเอสิด 1 ชนิด สีย้อมดิสเพิร์ส 2 ชนิด และสีย้อมไดแร็คท์ 1 ชนิด ในการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) พบว่าสีย้อมเบสิคถูกดูดซับด้วยดินเหนียวกัมมันต์ได้ต่ำซึ่งหาได้จากสมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation) ทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสีย้อมในช่วง 50-500 มก/ล. จากการทดลองมีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิต่างๆ กัน เพื่อหาค่า K_L ไปใช้ในการหาค่าทางเทอร์โมไดนามิกต่างๆ คือ เอนทัลปี พลังงานอิสระของกิบส์ และเอนโทรปี

G. Mckay, G. Ramprasad และ P. Pratapa Mowli [28] ได้ศึกษาวัสดุที่มีราคาถูก คือ เปลือกไม้สัก เปลือกข้าว ถ่านหิน ดินเหนียวเบนโทไนท์ เส้นผม และฝ้าย ใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับดูดซับสารละลายสีย้อมที่ประกอบด้วยโทนสีแดง 4 ชนิด และโทนสีฟ้า 4 ชนิด โดยประกอบด้วยกลุ่มสีย้อมแอสิด สีย้อมเบสิค สีย้อมดิสเพิร์ส และสีย้อมไดแร็คท์ จากไอโซเทอมของการดูดซับระหว่างสีย้อมและตัวดูดซับพบว่าความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ได้ค่าตั้งแต่ 0 ถึง 200 มก./กรัม ที่ตัวดูดซับต่างๆ กัน โดยที่ที่ตัวดูดซับต่างๆ พบว่าสีย้อมเบสิคมีค่าการดูดซับสูงกว่าสีย้อมชนิดอื่นๆ

Janson Orthman [4] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟในสารละลายด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ประเภทที่มีประจุลบเป็นหมู่คาร์บอเนต จากข้อมูลทางไอโซเทอมพบว่าดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สามารถดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟได้ 90% และเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ (reuse) ด้วยการนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยสารอินทรีย์ออกไปพบว่าสามารถดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟได้ 88% โดยกลไกของการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออน

Y.S. Ho และ G. Mckay [29] ได้ศึกษาการดูดซับของตะกั่ว(II)ในสารละลายโดยใช้ถ่านไม้ ในการศึกษาจลนศาสตร์มีการดูผลของการกวนที่ความเร็วต่างๆ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว(II) ผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และผลของอนุภาคถ่านไม้ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปทดสอบด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่งจากสมการ Lageragren และข้อมูลที่ได้พบว่ากลไกของปฏิกิริยาเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (two-step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chnoong-Kheng Lee, Kun-She Low และ Lai-Ching Chung [30] ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมประเภทสารอินทรีย์ในรูปสารละลายโดยใช้ดินฟอกขาว (bleaching earth) ที่ถูกสกัดด้วยเฮกเซน โดยที่ดินฟอกขาวนี้เป็นของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ซึ่งดินฟอกขาวนี้มีประสิทธิภาพดีในการดูดซับสีเบสิคได้ดีกว่าสีแอสิด โดยจะมีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อขบวนการดูดซับ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอช การกวน อุณหภูมิและปริมาณของตัวดูดซับ

Mohammad S. EL-Geundi [31] ได้ทำการศึกษาการดูดซับของสีย้อม 2 ชนิดที่เป็นประเภทสีย้อมเบสิค คือ Atrazon Blue และ Maxilon Red และสีย้อมแอสิด 2 ชนิด คือ Telon Blue และ Erionyl Red ด้วยซังข้าวโพด พบว่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสีย้อมเบสิคต่อน้ำหนักซังข้าวโพดหนึ่งกรัม เป็นดังนี้ Atrazon Blue 160 มก./ก. และ Maxilon Red 94.5 มก./ก. แต่ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสีย้อมแอสิดต่อน้ำหนักซังข้าวโพดหนึ่งกรัมมีค่าต่ำกว่า คือ Erionyl Red 47.7 มก./ก. และ Telon Blue 41.4 มก./ก. ในที่นี้จะศึกษาเวลาในการทดลองแบบแบทโดยดูผลของปัจจัยต่างๆ คือ อัตราเร็วในการกวน ขนาดของอนุภาคซังข้าวโพด และน้ำหนักของซังข้าวโพด

Mamdouh M. Nassar และ Yehia H. Magdy [32] ได้ทำการศึกษาการดูดซับของ สีย้อมเบสิค 3 ชนิด คือ Basic Yellow Basic Red และ Basic Blue ในสารละลายโดยใช้พวงปาล์ม (palm-fruit bunch) เป็นตัวดูดซับ สมดุลของไอโซเทอมระหว่างสีย้อมและตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง คือ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ ไอโซเทอมของฟลอยริช และไอโซเทอมของเรดิช-ปีเตอร์สัน ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของพวงปาล์มและสีย้อมต่างๆ เป็นดังนี้ Basic Yellow 327 มก./ก. Basic Red 180 มก./ก. และ Basic Blue 92 มก./ก. มีการเปรียบเทียบปริมาณน้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม 1 กิโลกรัม พบว่า Basic Yellow มีการใช้น้ำหนักพวงปาล์มคิดเป็น 1:9 เท่าของน้ำหนักคาร์บอน กัมมันต์ที่ใช้ Basic Red ใช้น้ำหนักพวงปาล์มเป็น 4.4 เท่าของน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ Basic Blue ใช้น้ำหนักของพวงปาล์มเป็น 7.1 เท่าของน้ำหนักคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

G.S. Gupta, G. Prasad และ V.N. Singh [33] ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อม Omega Chrome Red ME โดยการดูดซับด้วยของผสมระหว่างขี้เถ้าลอยและ ถ่านหินในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ในการทดลองกำหนดให้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมีค่า 20 มก./ล. 10 มก./ล. และ 5 มก./ล. ขนาดของอนุภาคตัวดูดซับ คือ 125 μm 75 μm และ 53 μm อุณหภูมิที่ใช้ คือ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเป็นกรดซึ่งสามารถกำจัดสีย้อมโครมได้ดี สีย้อมโครมสามารถกำจัดได้ดีถึง 100 % ที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอช 2.0 และขนาดอนุภาค 53 μm ในอัตราส่วนขี้เถ้าลอยและถ่านหิน 1:1 จลนศาสตร์และการเคลื่อนที่ของตัวถูกซับ (mass transfer) ใช้โมเดลของ Lagergren และ McKay ตามลำดับ โมเดลของการดูดซับที่สภาวะสมดุลใช้สมการของแลงเมียร์ซึ่งแสดงการดูดซับของโมเลกุลสีย้อมที่พื้นผิวตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ผลของอุณหภูมิอธิบายการละลายของสีย้อมที่มีต่อการดูดซับ โดยที่ถ้าการละลายของสีย้อมเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ยี่ห้อ JENWAY รุ่น 6405
2. เครื่องเอ็กซเรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์ (X-ray Fluorescence) ยี่ห้อ Bruker AG รุ่น SRS 3400
3. เครื่องออโตซอร์บ (Autosorb) ยี่ห้อ QUANTA CHROME
4. เครื่องสแกนนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scaning Electron Microscopy) ยี่ห้อ Leo รุ่น 1455VP
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ยี่ห้อ JULABO
6. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ SANYO
7. เครื่องกวนมอเตอร์ (Motor stirrer) ยี่ห้อ YAMATO
8. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MEMMERT
9. กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
10. ขวดซักชั่น (Suction flask)
11. กระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42
12. เครื่องกรองสูญญากาศ (Suction pump)
13. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance)
14. ปีเปต (Pipet) ขนาด 10 50 และ 100 มิลลิลิตร
15. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10 100 และ 500 มิลลิลิตร
16. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)
17. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
18. กระบอกตวง (Graduated cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
19. ช้อนตักสาร (Spatula)
20. เทอร์โมมิเตอร์ขนาด 100 ^{0}C (Thermometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี

1. ผงสีรีแอ็คทีฟ (Reactive Blue 5) เกรดวิเคราะห์ บริษัท SIGMA
2. แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2.6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLOERBA
3. อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3.6H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท UNIVAR
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดการค้า บริษัท CARLOERBA
5. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดการค้า บริษัท CARLOERBA

3.2 การเตรียมดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ [4]

1. เตรียมสารละลายผสมโดย ชั่งแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2.6H_2O$) ประมาณ 34 กรัม และอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3.6H_2O$) ประมาณ 36.2 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร ละลายในน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
2. ชั่งน้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ประมาณ 32 กรัม และชั่งโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ประมาณ 28.6 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 5 ลิตร เติมน้ำปราศจากไอออน 4 ลิตร กวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนมอเตอร์
3. นำสารละลายผสมในข้อ 1. ค่อยๆ เติมในสารละลายข้อที่ 2. ภายใต้การกวนด้วยเครื่องกวนมอเตอร์ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที
4. ทำการปั่นเหวี่ยงของผสมที่ได้จากข้อ 3. ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 2,800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
5. นำของแข็งสีขาวที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง
6. นำของแข็งที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
7. นำของแข็งที่ได้มาบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 20-35 mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเหนียว

พารามิเตอร์	เครื่องมือในการวิเคราะห์
องค์ประกอบต่างๆของดินเหนียว	X-ray Fluorescence Spectrometer
ขนาดของอนุภาค	Scaning Electron Microscopy
รูพรุน	Autosorb
พื้นที่ผิว	Autosorb
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (AEC)	Standard Method [41]

3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

1. นำสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟเข้มข้น 100 g/m^3 เทลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ที่แช่อยู่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
2. ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนมอเตอร์ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที
3. นำดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ประมาณ 0.2 กรัม (w/v = 0.4 kg/m^3) ใส่ลงในบีกเกอร์ปั่นกวน
4. เก็บสารละลายสีย้อม 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 30 นาทีแรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้นให้เก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 10 นาที จนครบ 120 นาที
5. นำสารละลายสีย้อมมากรองผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42 และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 แต่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม และน้ำหนักดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของสีย้อมและน้ำหนักดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นของสีย้อม (g/m^3)	น้ำหนักดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ (กรัม) และ อัตราส่วน w/v (kg/m^3)
100	0.4(w/v = 0.8),0.6(w/v = 1.2),0.8(w/v = 1.6),1.0(w/v = 2.0)
200	0.6(w/v = 1.2),1.0(w/v = 2.0),1.4(w/v = 2.8),1.8(w/v = 3.6),2.2(w/v = 4.4)
300	1.0(w/v = 2.0),1.4(w/v = 2.8),1.8(w/v = 3.6),2.2(w/v = 4.4),2.6(w/v = 5.2)
400	1.4(w/v = 2.8),1.8(w/v = 3.6),2.2(w/v = 4.4),2.6(w/v = 5.2),3.0(w/v = 6.0)
500	1.8(w/v = 3.6),2.2(w/v = 4.4),2.6(w/v = 5.2),3.0(w/v = 6.0),3.4(w/v = 6.8)
600	2.2(w/v = 4.4),2.6(w/v = 5.2),3.0(w/v = 6.0),3.4(w/v = 6.8),3.8(w/v = 7.6)
700	2.6(w/v = 5.2),3.0(w/v = 6.0),3.4(w/v = 6.8),3.8(w/v = 7.6),4.2(w/v = 8.4)
800	3.0(w/v = 6.0),3.4(w/v = 6.8),3.8(w/v = 7.6),4.2(w/v = 8.4),4.6(w/v = 9.2)
900	3.4(w/v = 6.8),3.8(w/v = 7.6),4.2(w/v = 8.4),4.6(w/v = 9.2),5.0(w/v = 10.0)

3.5 การศึกษาหาความสัมพันธ์ในการดูดซับที่สภาวะสมดุล โดยใช้ไอโซเทอมของแลงเมียร์และฟลอยลิช

1. นำสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟเข้มข้น 100 g/m^3 ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ที่แช่อยู่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส
2. กวนโดยใช้เครื่องกวนมอเตอร์ด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที
3. นำดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ประมาณ 1.0 กรัม (w/v = 2.0 kg/m^3) ใส่ลงในบีกเกอร์ปั่นกวน
4. ใช้เวลาในการกวน 3 วัน หลังจากนั้น นำสารละลายสีย้อม 5 มิลลิลิตร มากรองผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟเป็น 200 300 400 500 600 700 800 900 g/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การทดลองหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส

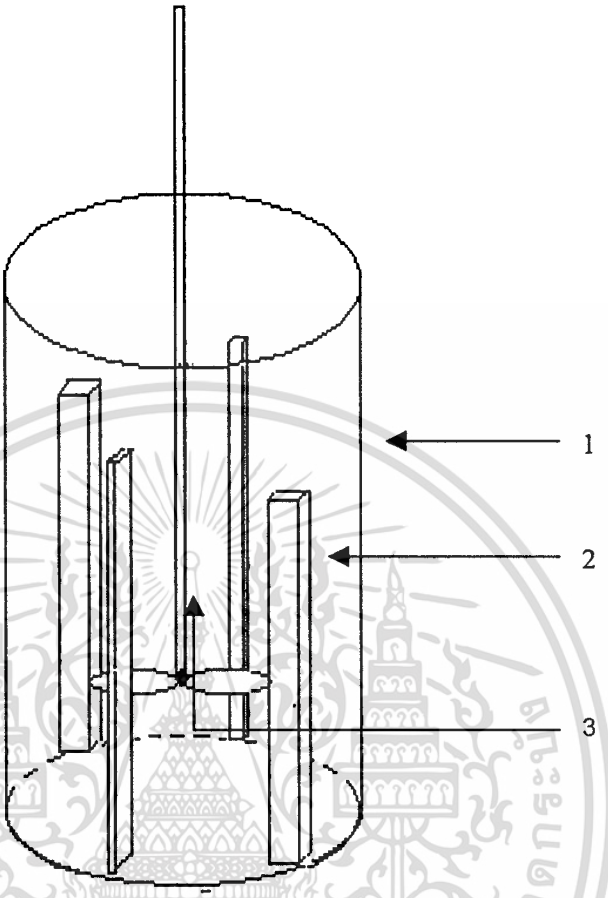
1. นำสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟเข้มข้น 100 g/m^3 ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ที่แช่อยู่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. กวนโดยใช้เครื่องกวนมอเตอร์ด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาที
3. นำดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ประมาณ 1.0 กรัม (w/v = 2 kg/m^3) ใส่ลงในบีกเกอร์ปั่นกวน
4. เก็บสารละลายสีย้อม 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 30 นาทีแรกให้เก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้นให้เก็บสารละลายสีย้อมทุกๆ 10 นาที จนครบ 120 นาที
5. นำสารละลายสีย้อมมากรองผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42 และนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลองเป็น 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส

3.7 การศึกษาหาค่าเอนทัลปีจากสมการของแวนฮอฟต์ ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ และค่าเอนโทรปี

1. นำสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟเข้มข้น 100 g/m^3 ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ที่แช่อยู่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
2. กวนโดยใช้เครื่องกวนมอเตอร์ด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาที
3. นำดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ประมาณ 1.0 กรัม (w/v = 2.0 kg/m^3) ใส่ลงในบีกเกอร์ปั่นกวน
4. ใช้เวลาในการกวน 3 วัน หลังจากนั้น นำสารละลายสีย้อม 5 มิลลิลิตร มากรองผ่านกระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 42
5. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลองเป็น 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการดูดซับแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. บีกเกอร์ (Beaker) ทำด้วยแก้ว
   - สูง 14 เซนติเมตร
   - เส้นผ่าศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร
2. บัฟเฟิล (Baffle) ทำด้วยแก้ว
   - สูง 11 เซนติเมตร
   - กว้าง 1 เซนติเมตร
   - หนา 0.2 เซนติเมตร
3. ใบพัดแบบ 4 แฉก (Four-blades impeller) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม
   - ยาวข้างละ 2.5 เซนติเมตร
   - สูงจากฐาน 3.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

นำดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ซึ่งสังเคราะห์จากสารละลายผสมเจือจางของแมกนีเซียมคลอไรด์และอะลูมิเนียมคลอไรด์กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต มาทำการศึกษาหาองค์ประกอบทางกายภาพ ได้แก่ ขนาดของอนุภาค รูพรุน พื้นที่ผิวและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางกายภาพของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์

องค์ประกอบทางกายภาพ	ค่าที่วัดได้
ขนาดของอนุภาค	8.42×10^{-4} m
ขนาดของรูพรุน	4.62 nm
พื้นที่ผิว	219.64 m^2/g
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน	27.60 meq/100g

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซนต์น้ำหนักโดยประมาณ
Na_2O	11.00
MgO	51.20
Al_2O_3	33.30
Cl	4.73

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางกายภาพของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เทียบกับงานวิจัยของ Jason Orthman และคณะ [34] ที่ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์พบว่าขนาดของพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 186 m^2/g และขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง mesopore (2-50 นาโนเมตร) จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกับการทดลองของ Jason Orthman พบว่าขนาดพื้นที่ผิวของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่หาได้มีขนาดเล็กกว่าแต่ไม่น่ามีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากนัก เนื่องจากกลไกการดูดซับเป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออนและขนาดของรูพรุนพบว่าดินเหนียวที่สังเคราะห์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน เมื่อพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบพบว่ามีค่าสูงกว่าดินเหนียวตามธรรมชาติ ทั่วไปที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุอยู่ในช่วง 0.1-1.0 meq/100g

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซเรย์ ฟลูออเรสเซนต์ คือ MgO 51.20% และ Al_2O_3 33.30% โดยมี Na_2O 11.00% และ Cl 4.73% เป็นสารรบกวน เมื่อเทียบกับการทดลองของ Di Cosimo J.I. และคณะ [35] ที่ทำการศึกษาหาโครงสร้าง พื้นที่ผิว และสมบัติการเป็นตัวเร่งของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์แบบ (Mg-Al) พบว่าจากสูตรทั่วไปของ ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ คือ

$$[\,Mg_{1-x}\,Al_x\,(OH)_2\,]^{x+}\,[A^{n-}_{x/n}.2H_2O]$$

โดยที่ค่า x = Al / (Al+Mg) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.67 จากองค์ประกอบทางเคมีสามารถคำนวณหาค่า Mg เท่ากับ 30.87% และ Al เท่ากับ 17.62% ดังนั้นจะได้ค่า x เท่ากับ 0.36 ซึ่งอยู่ในช่วงดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ได้ของ Di Cosimo J.I. และคณะ

ลักษณะของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ได้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 ลักษณะของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ได้

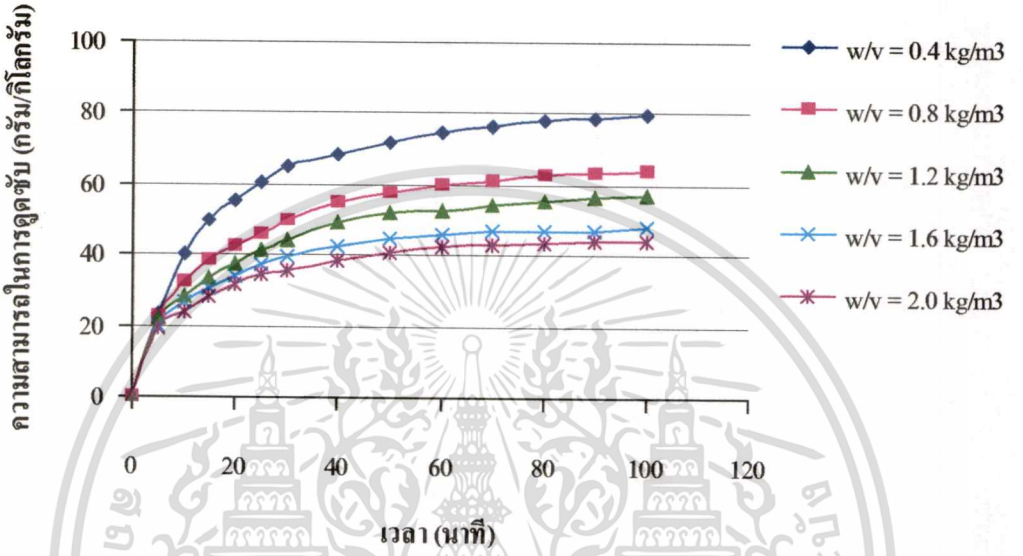
4.2 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

จากการทดลองการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอ็คทีฟด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ ที่เวลาต่างๆ ด้วยวิธีการแบบแบทช์ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) และอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) ที่แตกต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 C_0 = 100 ppm และ w/v = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.2



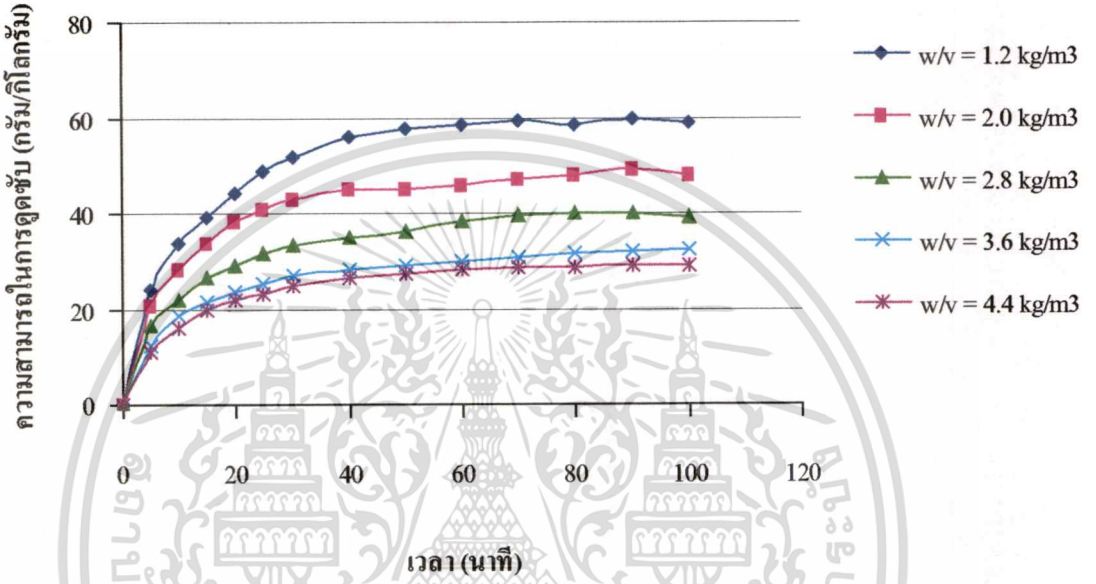
รูปที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมไปยังพื้นผิวของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์และผ่านเข้าไปในรูพรุนภายในเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเข้าสู่สมดุลอย่างช้า ๆ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 0.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 79.49 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 63.94, 57.03, 48.13 และ 44.10 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด และเนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับคิดได้จาก $q = (C_0-C_t) \times (v/w)$ [26] จากสูตรเห็นได้ว่าเมื่อ C_0 คงที่ ถ้าอัตราส่วน w/v เพิ่มขึ้น C_t มีค่าลดลงน้อยกว่าจำนวนเท่าของน้ำหนักตัวดูดซับที่มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 C_0 = 200 ppm และ w/v = 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.3



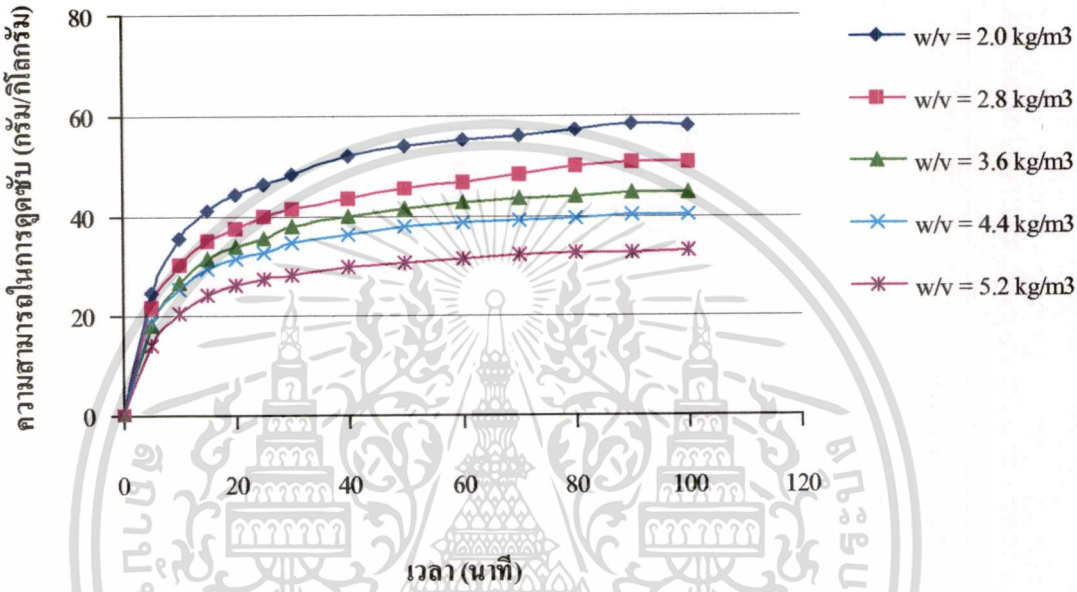
รูปที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 59.05 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 48.21, 39.28, 32.61 และ 29.09 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 C_0 = 300 ppm และ w/v = 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลา ได้ดังรูปที่ 4.4



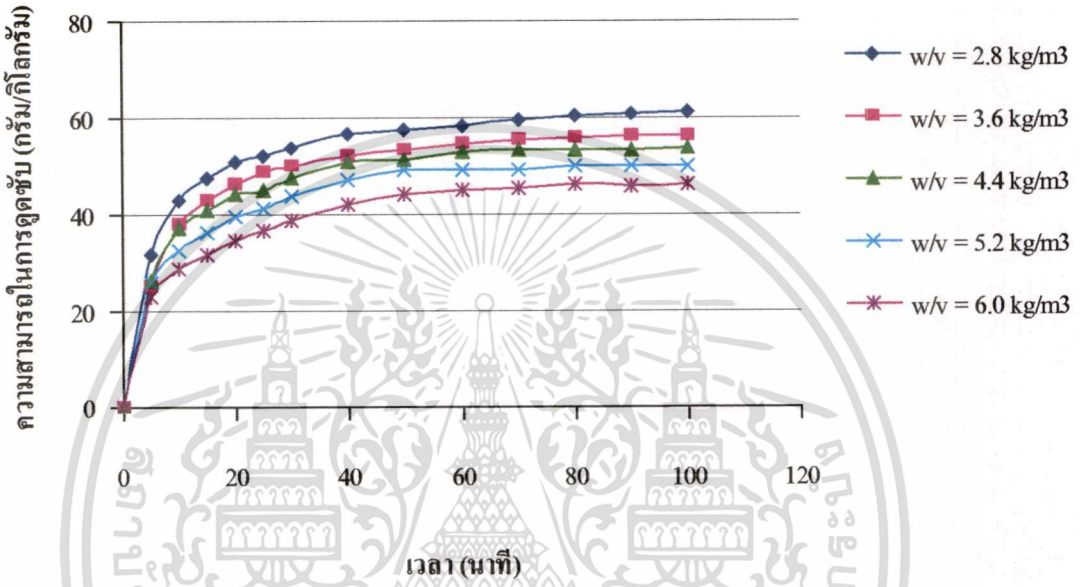
รูปที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 57.86 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 50.66, 44.44, 40.03 และ 33.15 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 C_0 = 400 ppm และ w/v = 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.5



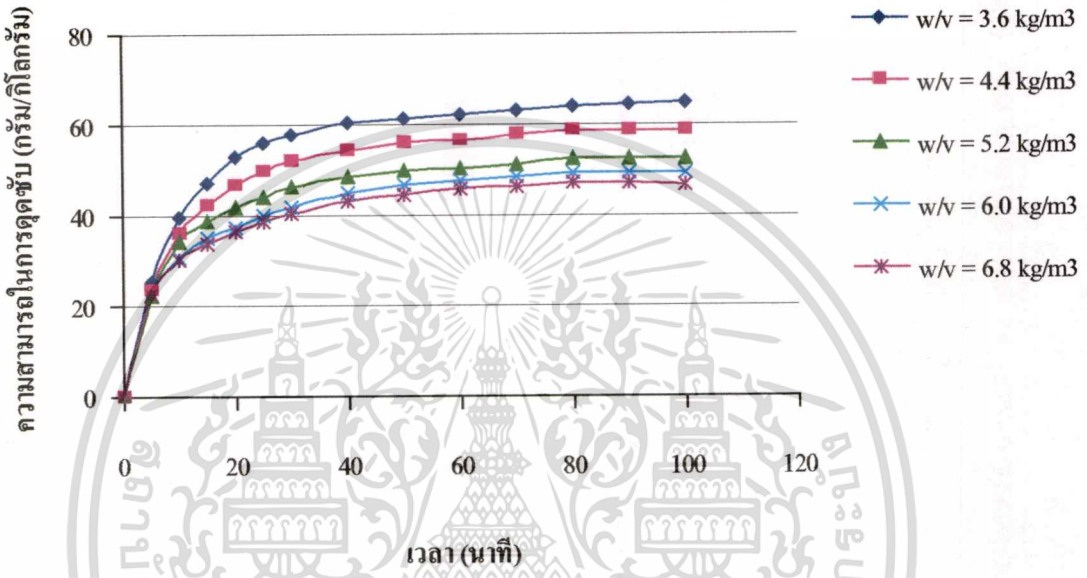
รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 61.19 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 56.41, 53.75, 50.21 และ 46.25 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 C_0 = 500 ppm และ w/v = 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.6



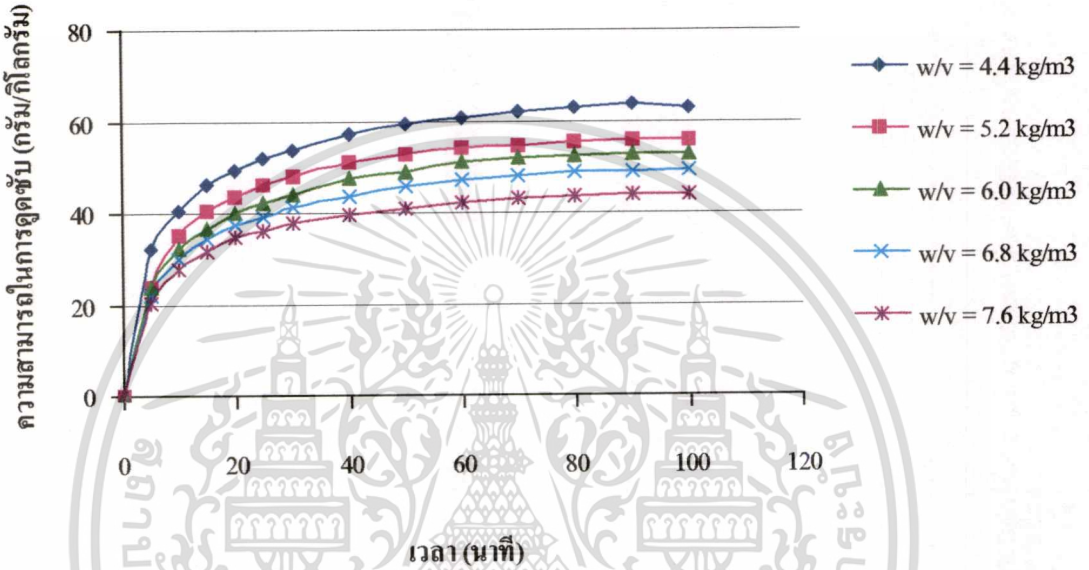
รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 65.01 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 58.59, 52.57, 49.29 และ 46.83 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 C_0 = 600 ppm และ w/v = 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.7



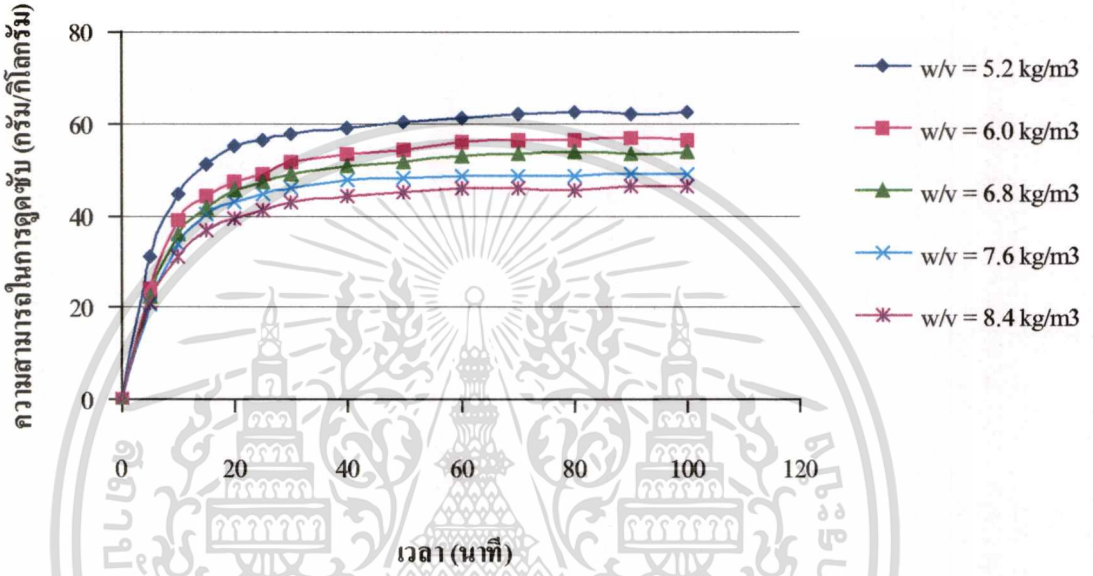
รูปที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 63.00 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 55.82, 52.81, 49.06 และ 44.15 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 C_0 = 700 ppm และ w/v = 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.8



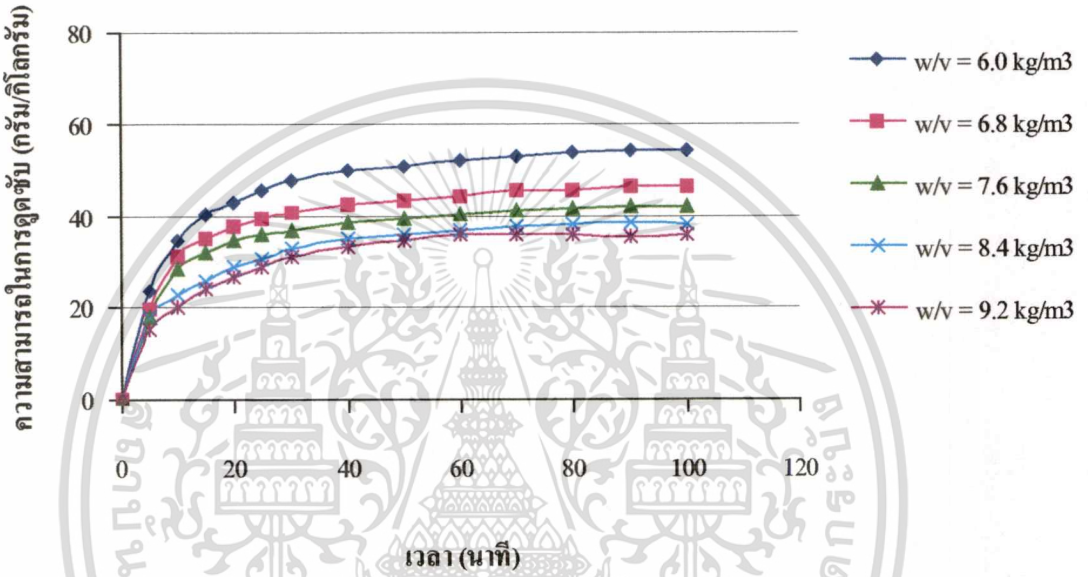
รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และใช้ความเข้มข้นสีย้อม 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 62.32 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 56.46, 53.65, 48.93 และ 46.45 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 C_0 = 800 ppm และ w/v = 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.9



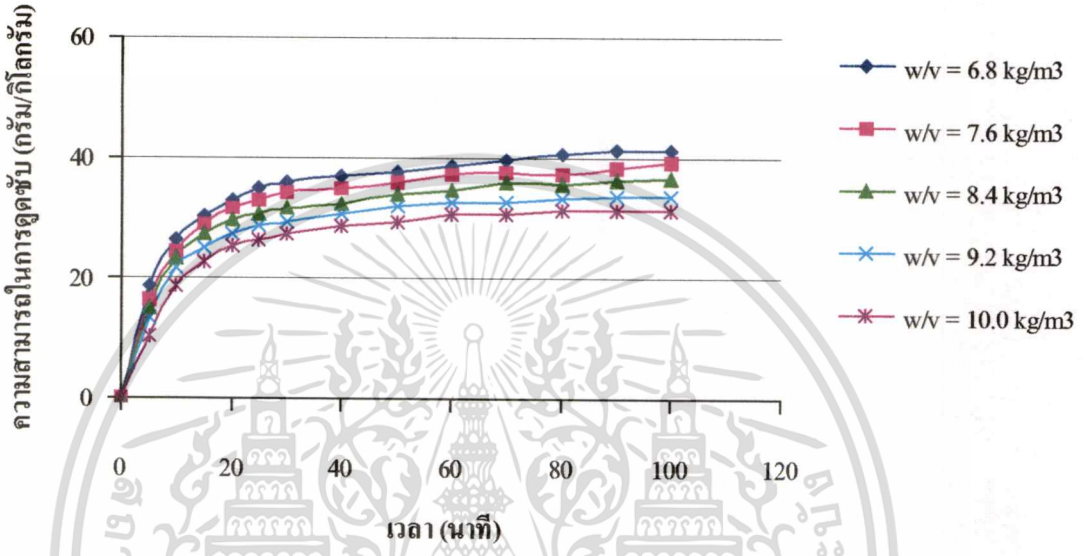
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์(w/v)เท่ากับ 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 54.11 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 46.22, 42.04, 38.19 และ 35.86 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์แสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 C_0 = 900 ppm และ w/v = 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.10



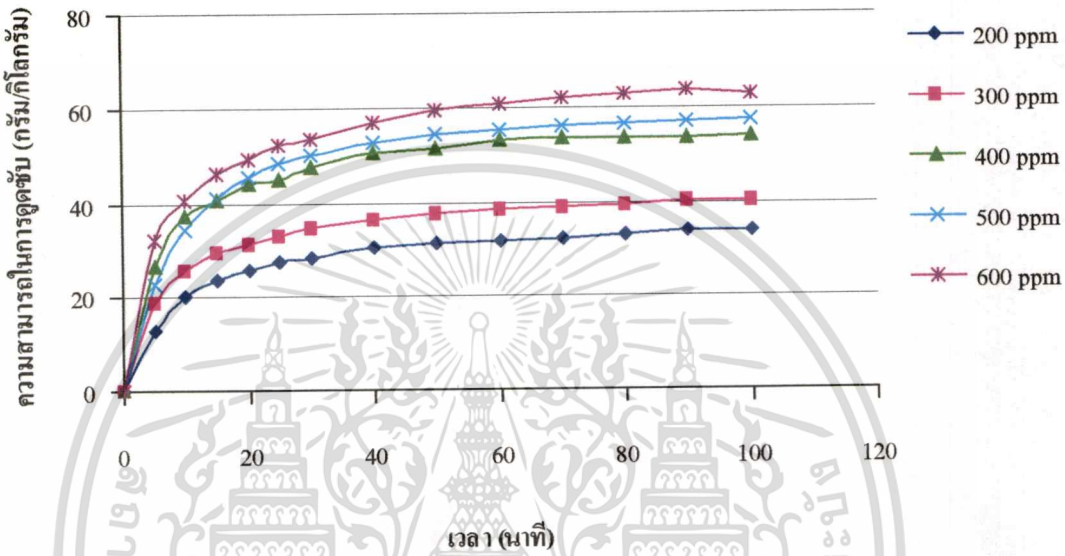
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้ความเข้มข้นสีย้อม 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับในช่วง 30 นาทีแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุล และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับลดลงเรื่อยๆจาก 41.25 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 39.30, 36.64, 33.72 และ 31.43 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วน w/v เป็น 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.10 C_0 = 200, 300, 400, 500, 600 ppm และ w/v = 4.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 200, 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 200, 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจาก 29.09 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 40.03, 53.75, 58.59 และ 63.00 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับต่ำที่สุด ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากเหตุผล 2 ประการ คือ

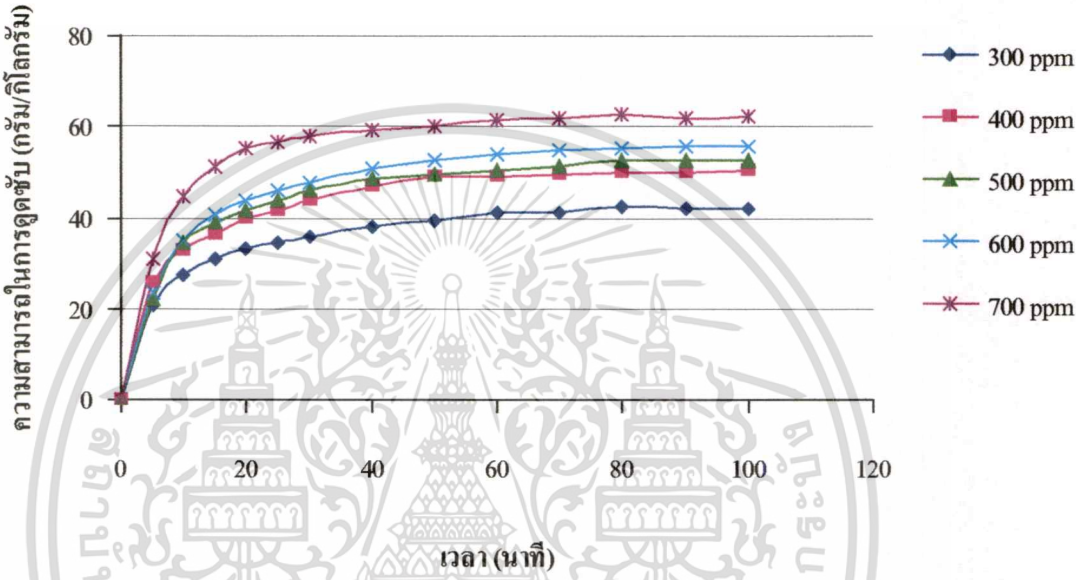
1. เนื่องจากความสามารถในการดูดซับคิดจาก $q = (C_0-C_t) \times (v/w)$ จากสูตรเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วน w/v คงที่ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) เพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับ (q) มีค่าเพิ่มขึ้น

2. เมื่อพิจารณาที่ตัวดูดซับเห็นว่าได้ว่าจะมีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับเหลือพอที่จะสามารถดูดซับสีย้อมได้เรื่อยๆ ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.11 C_0 = 300, 400, 500, 600, 700 ppm และ w/v = 5.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 300, 400, 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.12



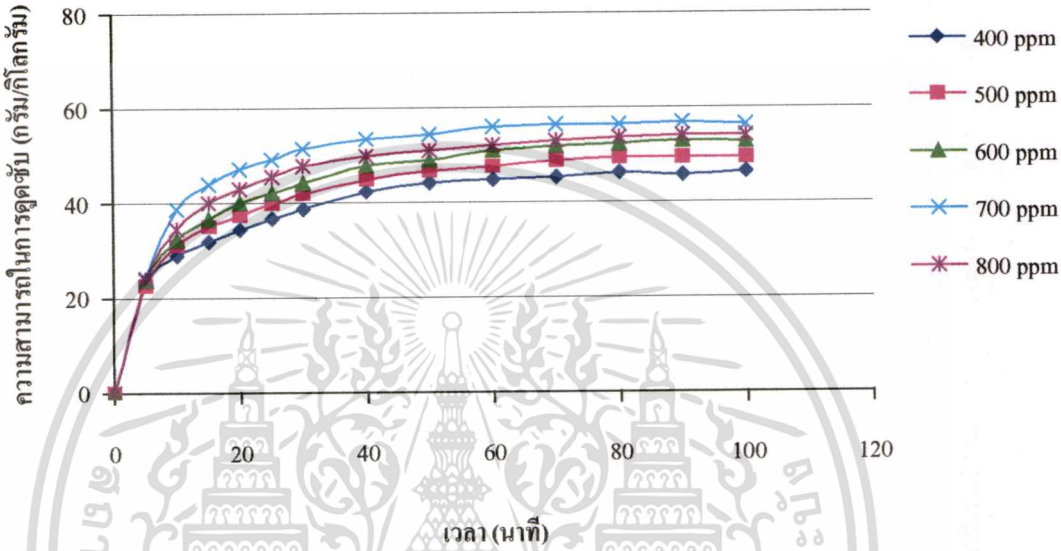
รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 300, 400, 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 400, 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจาก 42.14 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 50.21, 52.57, 55.82 และ 62.32 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จะแสดงค่าความสามารถในการดูดซับต่ำที่สุด ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400, 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.12 C_0 = 400, 500, 600, 700, 800 ppm และ w/v = 6.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 400, 500, 600, 700 และ 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.13



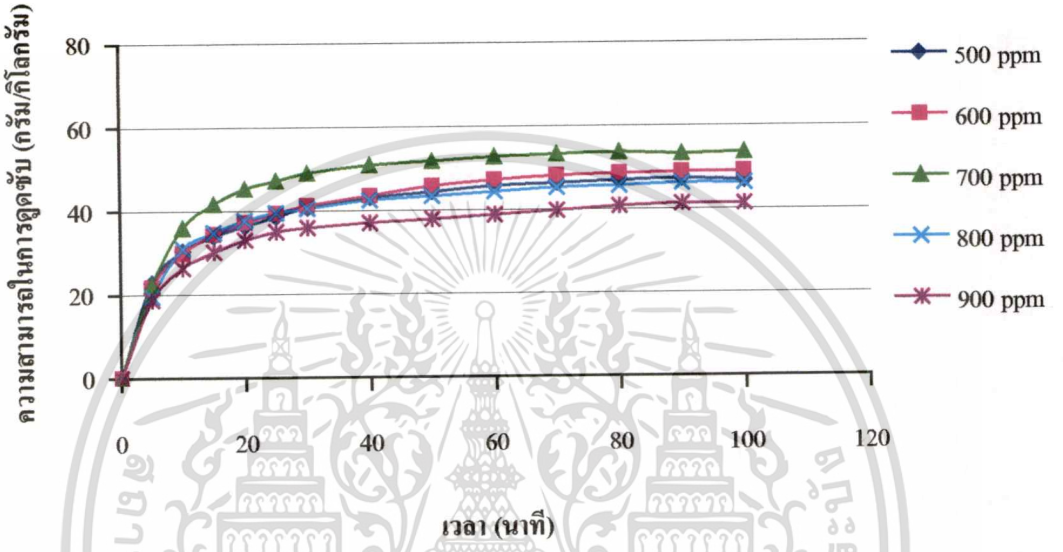
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 400, 500, 600, 700 และ 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจาก 46.25 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 49.29, 52.81 และ 56.46 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงๆ [36] มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมจากสารละลายเข้าไปที่รูพรุนของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากจึงทำให้เกิดการเบียดเสียดของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปในรูพรุนมีผลทำให้โมเลกุลสีย้อมเข้าไปในรูพรุนได้น้อยลง การดูดซับจึงมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.13 C_0 = 500, 600, 700, 800 และ 900 ppm และ w/v = 6.8 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 500, 600, 700, 800 และ 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยใช้ดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับเวลาได้ดังรูปที่ 4.14



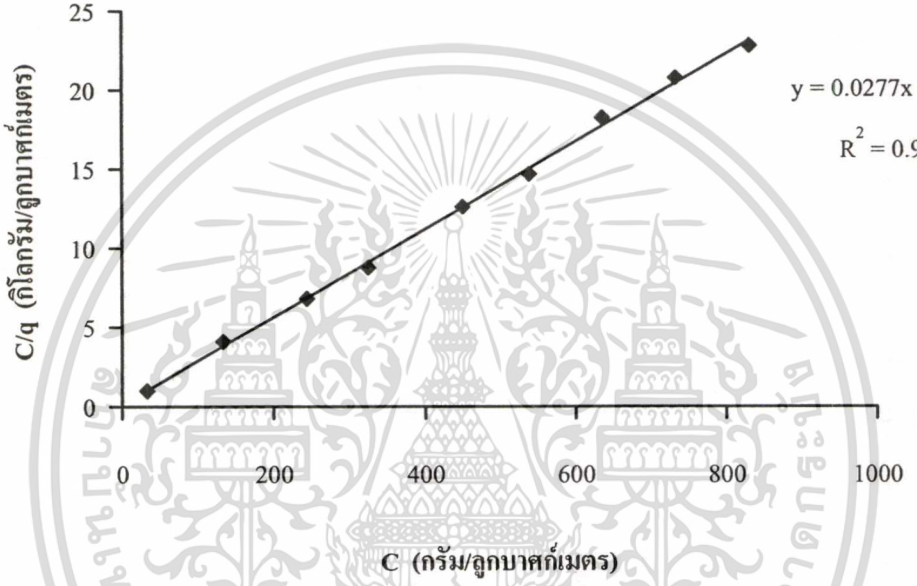
รูปที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 500, 600, 700, 800 และ 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรไปเป็น 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจาก 46.83 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 49.06 และ 53.65 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็น 800 และ 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงตามลำดับ เนื่องจากสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงๆ มีผลทำให้เกิดการเบียดเสียดของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปในรูพรุน ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นสีย้อมมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

จากข้อมูลของไอโซเทอมในการดูดซับสามารถนำไปแทนค่าในสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption) และสมการการดูดซับของฟลอยลิช (Freundlich adsorption) โดยสมการการดูดซับของแลงเมียร์จะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือต่อความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (C/q) กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือ (C) กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 สมการการดูดซับของแลงเมียร์เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

สมการการดูดซับของแลงเมียร์คือ

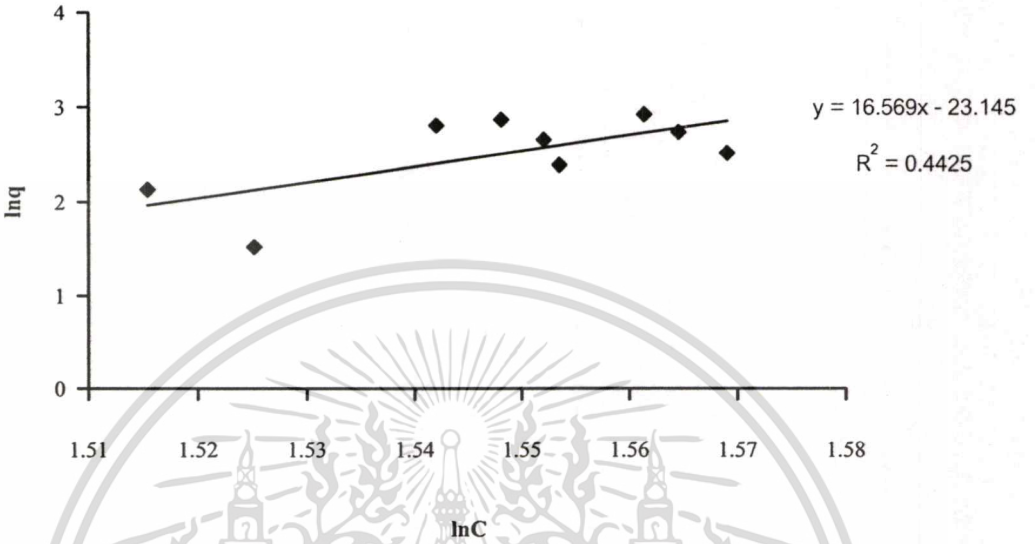
$$C/q = (1/K_A q_m) + C/q_m$$

จากความชัน (slope) = 0.0277 และ จุดตัดแกน y = 0.0987 ทำให้สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_m) และ ค่าคงที่สมการแลงเมียร์ (K_A) ได้ดังนี้

ความชัน = $1/q_m$	จุดตัดแกน y = $1/K_A q_m$
0.0277 = $1/q_m$	0.0987 = $1/K_A$ (36.10 g/kg)
q_m = 36.10 g/kg	K_A = 0.28 m^3/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสมการการดูดซับของฟลอยลิชจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมธรรมชาติของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (lnq) กับล็อกการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือ (ln C) กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 สมการการดูดซับของฟลอยลิชเมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

สมการการดูดซับของฟลอยลิชคือ

$$\ln q = \ln K_F + 1/n \ln C$$

จากความชัน (slope) = 16.569 และ จุดตัดแกน y = -23.145 ทำให้สามารถหาค่าคงที่ n และ K_F ได้ดังนี้

ความชัน = 1/n	จุดตัดแกน y = $\ln K_F$
16.569 = 1/n	0.0987 = $\ln K_F$
n = 0.06	K_F = 0.28 m^3/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และสมการแบบจำลองการดูดซับของฟลอยลิช พบว่าจากสมการแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์มีค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการแบบจำลองการดูดซับของฟลอยลิช ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับของสารละลายสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์คือการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์มีตำแหน่งการดูดซับปกคลุมเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer coverage) และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วโมเลกุลของสีย้อมจะไม่เกิดการซ้อนทับซึ่งกันและกัน ในงานวิจัยของ Jason Orthman [34] ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_m) มีค่าเท่ากับ 32.15 g/kg ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองและค่าคงที่สมการแลงเมียร์ (K_A) แสดงถึงพลังงานในการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสีย้อมและดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.28 m^3/g ซึ่งมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Ming-Shen Chiou และคณะ [37] ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟด้วยไคโตซานที่มีการยึดเกาะ (cross-linked) พบว่าการดูดซับเป็นแบบเคมี และค่าคงที่สมการแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 1.59 m^3/g แสดงว่าการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ยึดเกาะกันด้วยแรงอ่อนๆ เมื่อพิจารณาสมการแบบจำลองการดูดซับของฟลอยลิชจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) มีค่าน้อยมาก น่าจะมีผลมาจากในการทดลองมีการใช้ความเข้มข้นของสีย้อมสูงมากซึ่งสมการแบบจำลองการดูดซับของฟลอยลิชเหมาะที่จะใช้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นไม่สูงนักและเมื่อพิจารณาขนาดของโมเลกุลสีย้อมพบว่าโมเลกุลมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนที่อยู่ในช่วง mesopore ทำให้โมเลกุลสีย้อมเมื่อเกิดการดูดซับจะไปปิดรูพรุนจึงไม่เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของฟลอยลิชคือที่ความเข้มข้นต่ำความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

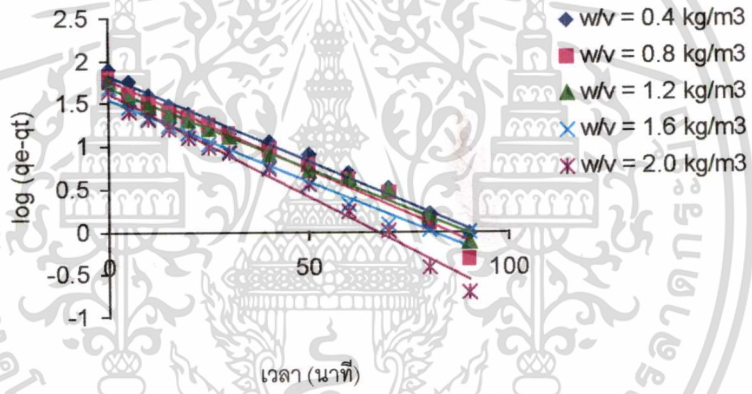
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แบบจำลองในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

จากการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ค่าความเข้มข้นและอัตราส่วน w/v ที่แตกต่างกัน ใช้แบบจำลองในการพิจารณา 2 แบบ คือ แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo – First Order Model) และแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo- Second Order Model) ได้ดังนี้

4.4.1 C_0 = 100 ppm และ w/v = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 kg/m^3

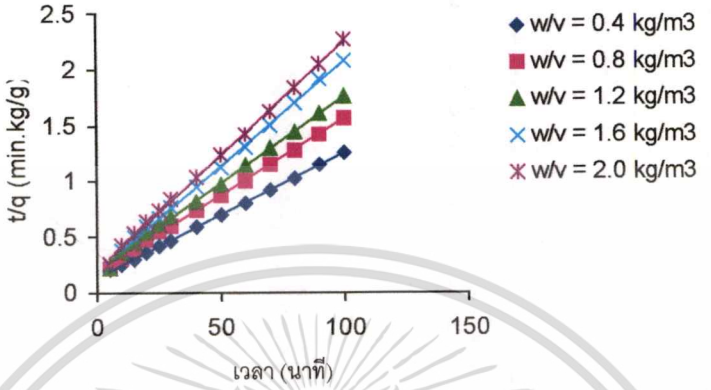
จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4-2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.18

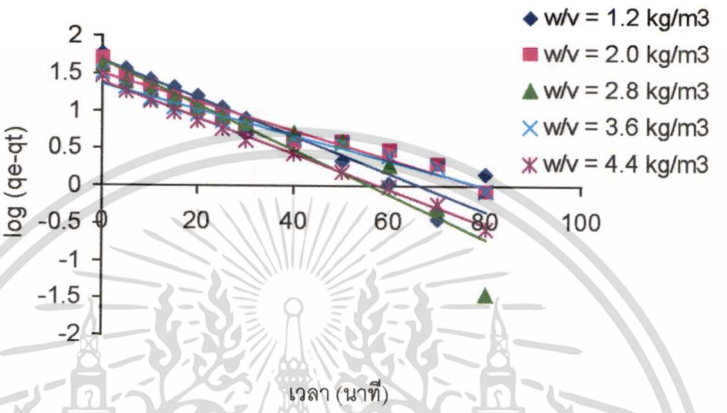


รูปที่ 4.18 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.4-2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

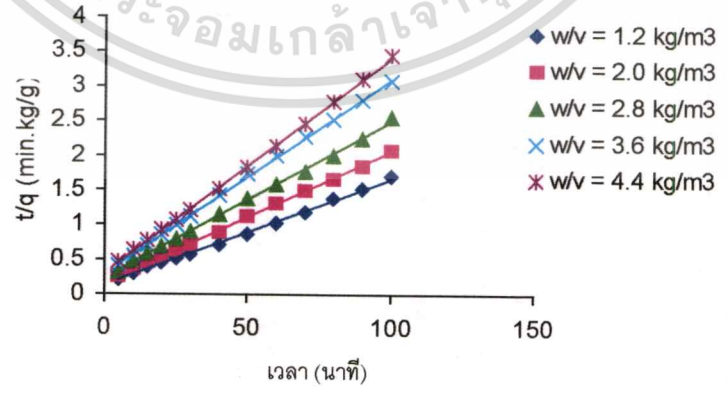
4.4.2 C_0 = 200 ppm และ w/v = 1.2, 2.0, 2.8, 3.6 และ 4.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2-4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.20

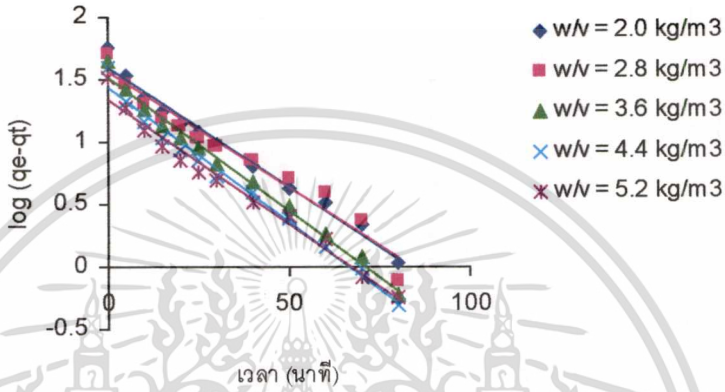


รูปที่ 4.20 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 1.2-4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

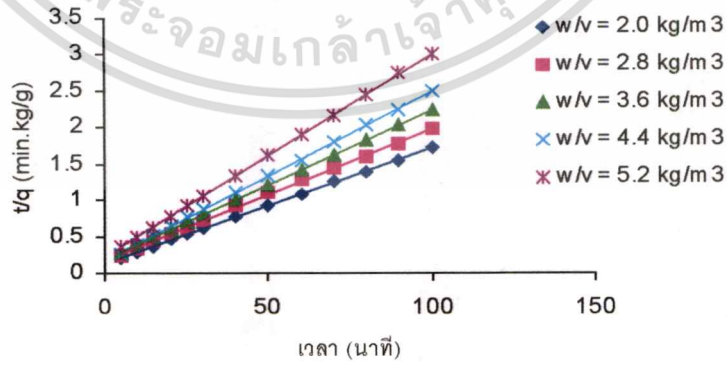
4.4.3 C_0 = 300 ppm และ w/v = 2.0, 2.8, 3.6, 4.4 และ 5.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0-5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.22

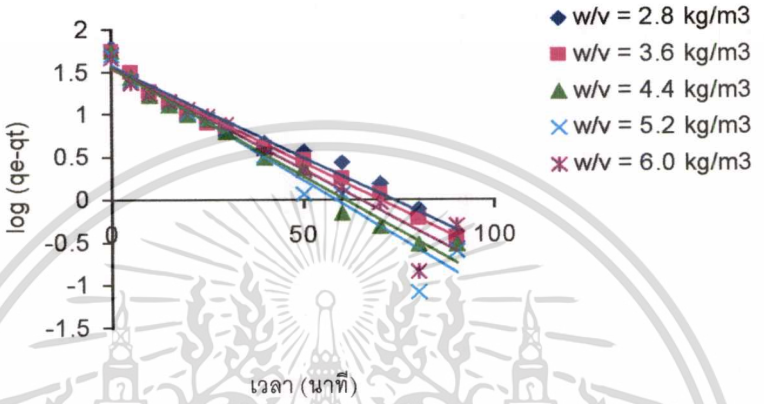


รูปที่ 4.22 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0-5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

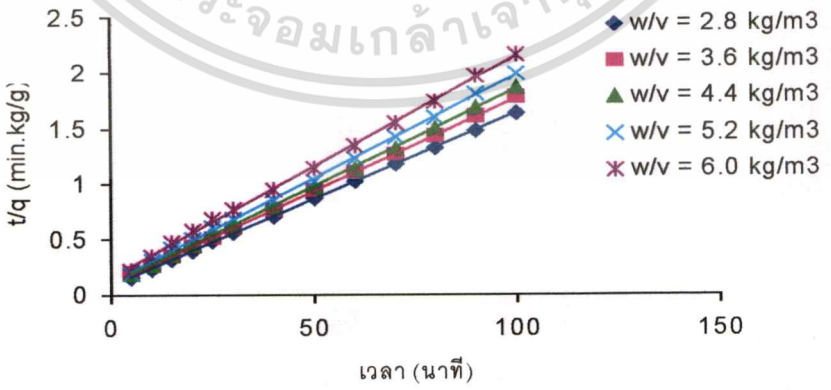
4.4.4 C_0 = 400 ppm และ w/v = 2.8, 3.6, 4.4, 5.2 และ 6.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8-6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.24

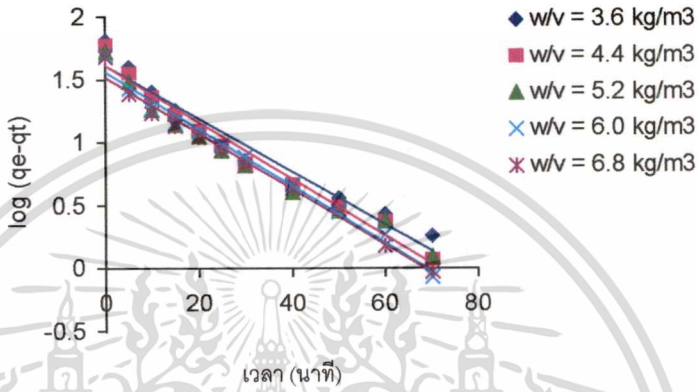


รูปที่ 4.24 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.8-6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

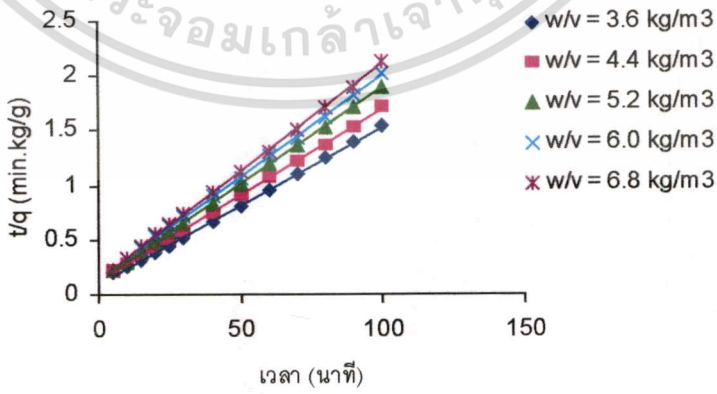
4.4.5 C_0 = 500 ppm และ w/v = 3.6, 4.4, 5.2, 6.0 และ 6.8 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์(w/v) เท่ากับ 3.6-6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.26

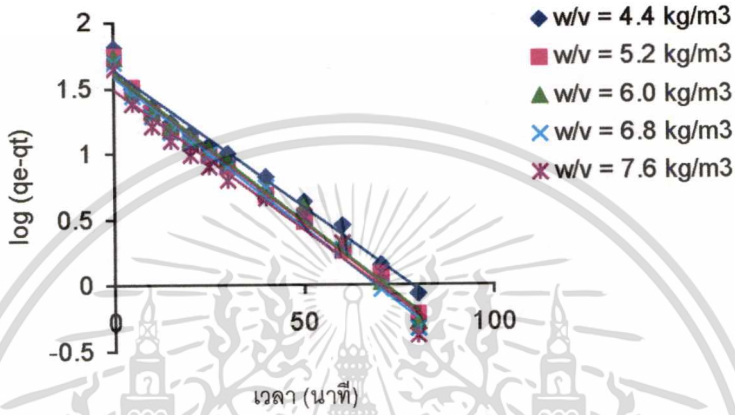


รูปที่ 4.26 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์(w/v) เท่ากับ 3.6-6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

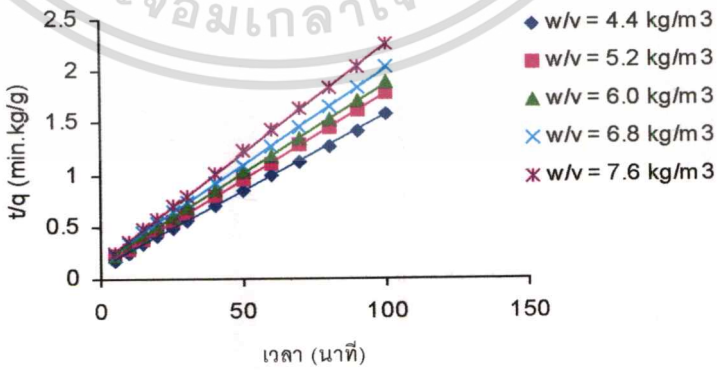
4.4.6 C_0 = 600 ppm และ w/v = 4.4, 5.2, 6.0, 6.8 และ 7.6 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4-7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.28

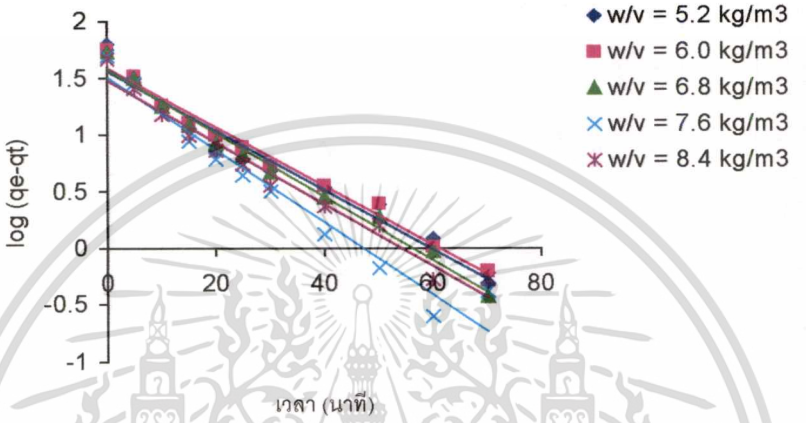


รูปที่ 4.28 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4-7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

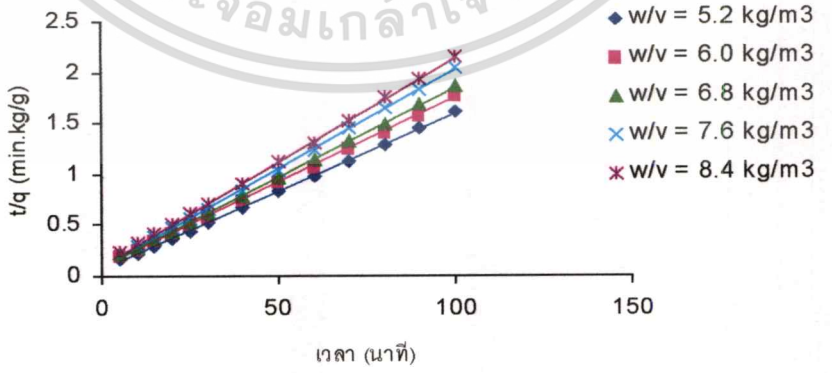
4.4.7 C_0 = 700 ppm และ w/v = 5.2, 6.0, 6.8, 7.6 และ 8.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2-8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.30

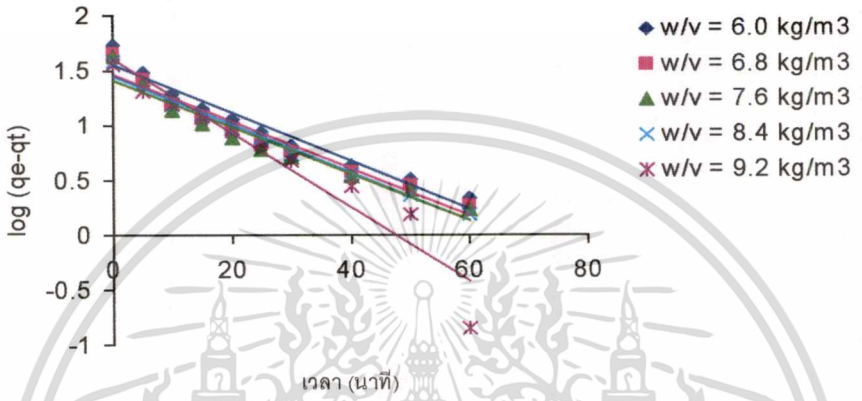


รูปที่ 4.30 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2-8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

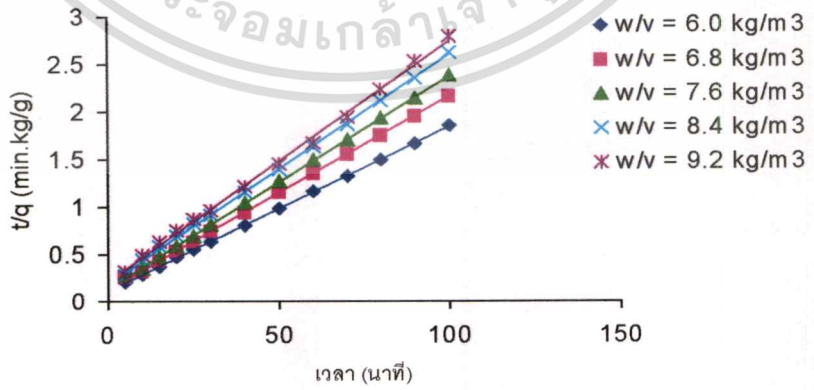
4.4.8 C_0 = 800 ppm และ w/v = 6.0, 6.8, 7.6, 8.4 และ 9.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0-9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.32

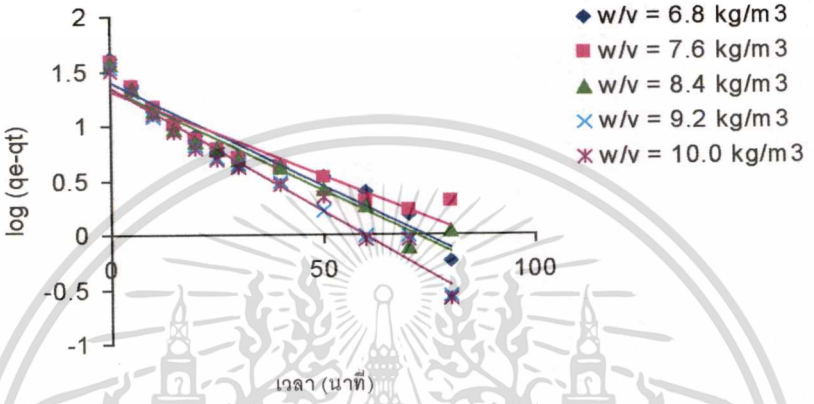


รูปที่ 4.32 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0-9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

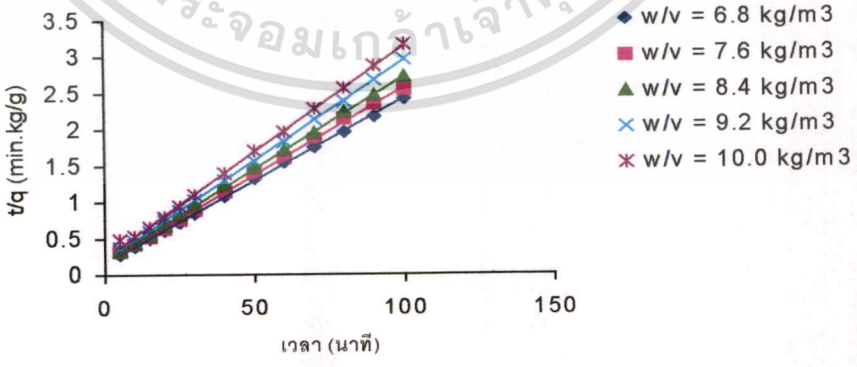
4.4.9 C_0 = 900 ppm และ w/v = 6.8, 7.6, 8.4, 9.2 และ 10.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8-10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8-10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสองที่ได้จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.35 สามารถนำไปแทนค่าในสมการ คือ

แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 / 2.303)t$$

โดยที่ความชันมีค่าเท่ากับ k_1 และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log q_e$

แบบจำลองการดูดซับอันดับ

$$t/q_t = [1/k_2 q_{e2}^2] + [1/q_{e2}]\, t$$

โดยที่ความชันมีค่าเท่ากับ $[1/q_{e2}]$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $[1/k_2 q_{e2}^2]$

จากสมการแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถหาค่าคงที่ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

C_0 (g/m^3)	w/v (kg/m^3)	First order			Second order		
		k_1 (1/min)	q_{e1} (g/kg)	R^2	k_2 (kg/g.min)	q_{e2} (g/kg)	R^2
100	0.4	4.56×10^{-2}	66.27	0.9913	8.81×10^{-4}	90.09	0.9995
	0.8	4.80×10^{-2}	58.91	0.9803	1.06×10^{-3}	72.46	0.9993
	1.2	4.33×10^{-2}	47.81	0.9888	1.22×10^{-3}	64.10	0.9984
	1.6	4.43×10^{-2}	34.85	0.9819	1.81×10^{-3}	52.91	0.9994
	2.0	5.57×10^{-2}	41.06	0.9847	1.98×10^{-3}	49.02	0.9991
200	1.2	5.78×10^{-2}	45.59	0.9202	1.81×10^{-3}	65.36	0.9982
	2.0	4.40×10^{-2}	31.39	0.9533	2.46×10^{-3}	52.63	0.9993
	2.8	6.88×10^{-2}	47.35	0.8745	2.68×10^{-3}	44.05	0.9986
	3.6	3.92×10^{-2}	22.59	0.9692	2.86×10^{-3}	35.46	0.9995
	4.4	5.50×10^{-2}	23.72	0.9955	3.35×10^{-3}	32.15	0.9996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

C_0 (g/m^3)	w/v (kg/m^3)	First order			Second order		
		k_1 (1/min)	q_{e1} (g/kg)	R^2	k_2 (kg/g.min)	q_{e2} (g/kg)	R^2
300	2.0	$4.40x10^{-2}$	39.49	0.9805	$3.35x10^{-5}$	62.89	0.9997
	2.8	$4.24x10^{-2}$	36.14	0.9575	$5.55x10^{-5}$	54.94	0.9989
	3.6	$4.88x10^{-2}$	32.46	0.9891	$7.51x10^{-5}$	48.54	0.9999
	4.4	$4.95x10^{-2}$	26.89	0.9852	$1.05x10^{-4}$	43.10	0.9999
	5.2	$4.58x10^{-2}$	21.82	0.9772	$1.67x10^{-4}$	35.58	0.9999
400	2.8	$4.88x10^{-2}$	35.94	0.9661	$2.03x10^{-5}$	64.52	0.9999
	3.6	$5.09x10^{-2}$	34.56	0.9821	$2.82x10^{-5}$	59.88	0.9999
	4.4	$5.87x10^{-2}$	35.42	0.9797	$3.09x10^{-5}$	57.14	0.9997
	5.2	$6.24x10^{-2}$	38.18	0.9449	$4.16x10^{-5}$	53.76	0.9994
	6.0	$5.55x10^{-2}$	35.81	0.9443	$6.20x10^{-5}$	50.25	0.9990
500	3.6	$4.86x10^{-2}$	40.72	0.9479	$2.07x10^{-5}$	69.93	0.9995
	4.4	$5.13x10^{-2}$	40.14	0.9737	$2.87x10^{-5}$	63.69	0.9996
	5.2	$4.86x10^{-2}$	33.52	0.9645	$3.87x10^{-5}$	56.49	0.9998
	6.0	$5.23x10^{-2}$	36.34	0.9878	$5.10x10^{-5}$	53.47	0.9996
	6.8	$5.10x10^{-2}$	32.91	0.9849	$5.43x10^{-5}$	50.76	0.9995
600	4.4	$4.80x10^{-2}$	42.64	0.9833	$2.25x10^{-5}$	68.03	0.9995
	5.2	$5.16x10^{-2}$	39.12	0.9888	$3.40x10^{-5}$	60.24	0.9999
	6.0	$5.18x10^{-2}$	40.76	0.9870	$4.38x10^{-5}$	57.47	0.9996
	6.8	$5.27x10^{-2}$	38.08	0.9880	$5.41x10^{-5}$	53.47	0.9997
	7.6	$4.90x10^{-2}$	30.64	0.9702	$6.95x10^{-5}$	47.39	0.9998
700	5.2	$6.01x10^{-2}$	36.04	0.9583	$1.55x10^{-5}$	65.36	0.9997
	6.0	$5.96x10^{-2}$	38.51	0.9805	$2.60x10^{-5}$	60.60	0.9995
	6.8	$6.47x10^{-2}$	37.81	0.9839	$3.05x10^{-5}$	57.14	0.9993
	7.6	$7.36x10^{-2}$	31.98	0.9569	$3.72x10^{-5}$	51.81	0.9987
	8.4	$6.31x10^{-2}$	30.34	0.9724	$4.38x10^{-5}$	49.02	0.9995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_0 (g/m^3)	w/v (kg/m^3)	First order			Second order		
		k_1 (1/min)	q_{e1} (g/kg)	R^2	k_2 (kg/g.min)	q_{e2} (g/kg)	R^2
800	6.0	$5.43x10^{-2}$	37.77	0.9561	$3.51x10^{-5}$	58.14	0.9999
	6.8	$5.32x10^{-2}$	30.74	0.9353	$5.43x10^{-5}$	49.50	0.9998
	7.6	$5.32x10^{-2}$	27.65	0.9337	$7.10x10^{-5}$	44.84	0.9998
	8.4	$5.30x10^{-2}$	29.04	0.9793	$1.12x10^{-4}$	41.66	0.9996
	9.2	$6.01x10^{-2}$	30.78	0.9940	$1.38x10^{-4}$	39.53	0.9983
900	6.8	$4.37x10^{-2}$	25.25	0.9496	$8.16x10^{-5}$	44.05	0.9996
	7.6	$3.57x10^{-2}$	20.87	0.8937	$9.75x10^{-5}$	41.32	0.9992
	8.4	$4.31x10^{-2}$	22.05	0.9444	$1.20x10^{-4}$	39.21	0.9996
	9.2	$5.20x10^{-2}$	22.94	0.9712	$1.50x10^{-4}$	36.23	0.9997
	10.0	$5.22x10^{-2}$	22.80	0.9686	$1.71x10^{-4}$	34.24	0.9987

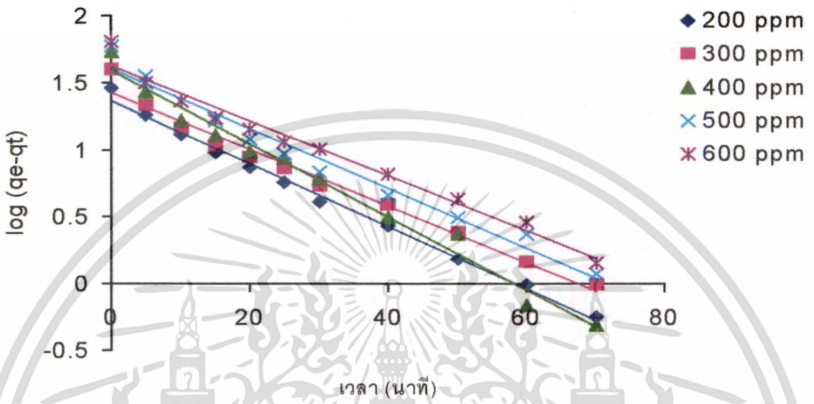
จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง พบว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราส่วน w/v ที่แตกต่างกัน ของแบบจำลองการดูดซับอันดับสองมีค่าสัมประสิทธ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง

จากค่าคงที่อัตราเร็วที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเมื่อพิจารณาการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 0.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าอัตราเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คือจาก $8.81x10^{-4}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที ไปเป็น $1.06x10^{-3}$, $1.22x10^{-3}$, $1.81x10^{-3}$ และ $1.98x10^{-3}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที ตามลำดับ ผลการทดลองสำหรับ 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 และ 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสีย้อมคงที่ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์มีผลทำให้มีการเพิ่มของตำแหน่งที่ใช้ในการดูดซับทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสมาเกิดการดูดซับได้เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ ดังนั้นแสดงว่าค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวหรือปริมาณของตัวดูดซับนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

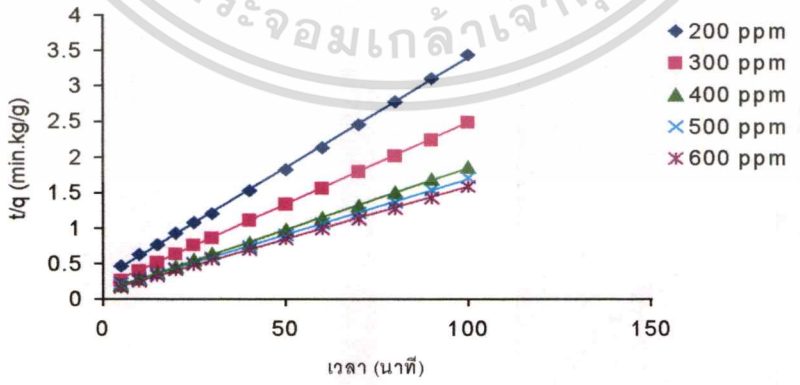
4.4.10 C_0 = 200, 300, 400, 500 และ 600 ppm และ w/v = 4.4 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200-600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.36

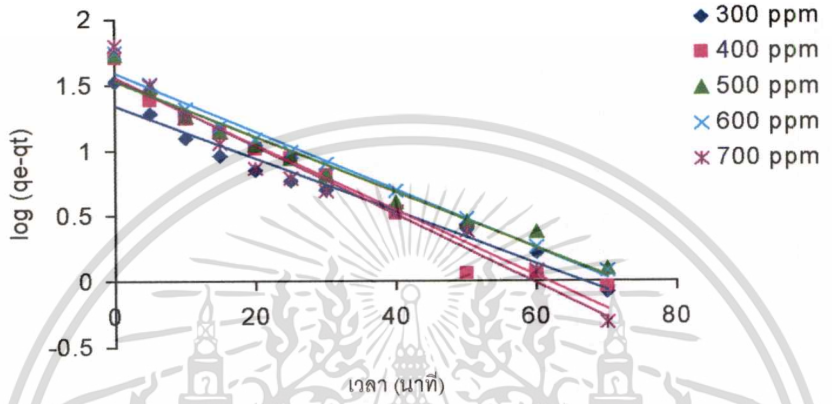


รูปที่ 4.36 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 200-600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

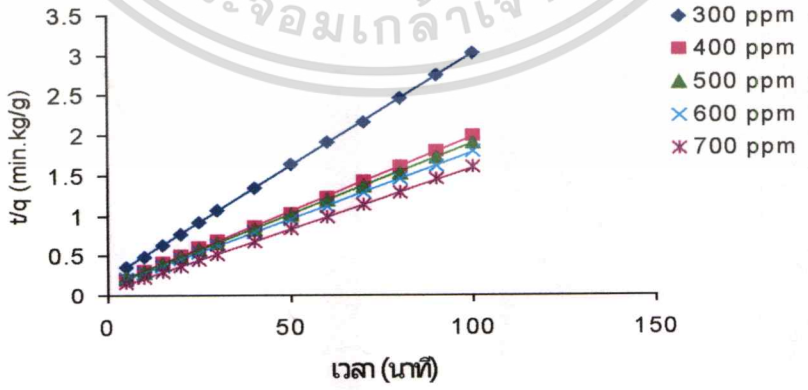
4.4.11 C_0 = 300, 400, 500, 600 และ 700 ppm และ w/v = 5.2 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300-700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.38

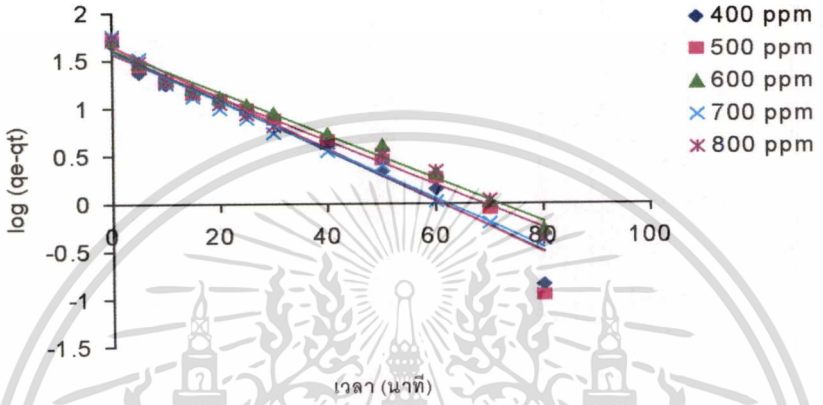


รูปที่ 4.38 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 300-700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

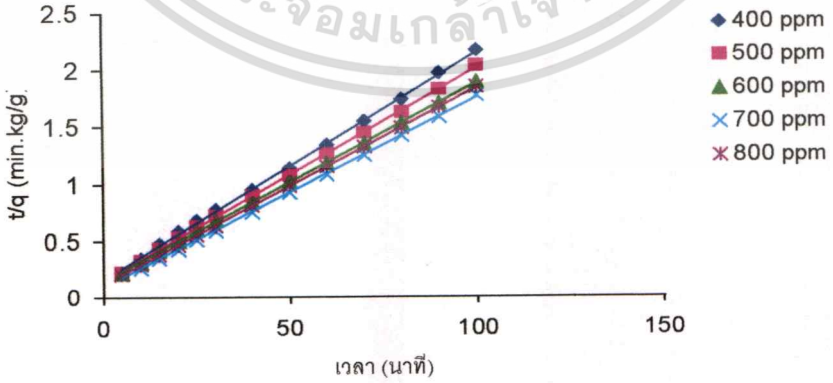
4.4.12 C_0 = 400, 500, 600, 700 และ 800 ppm และ w/v = 6.0 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400-800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.40

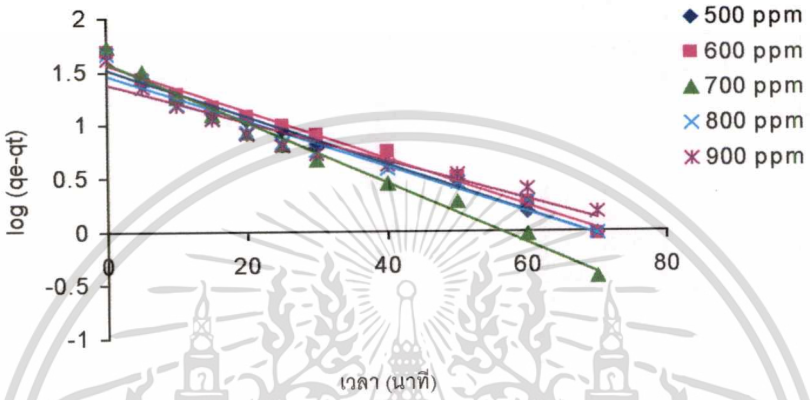


รูปที่ 4.40 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 400-800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

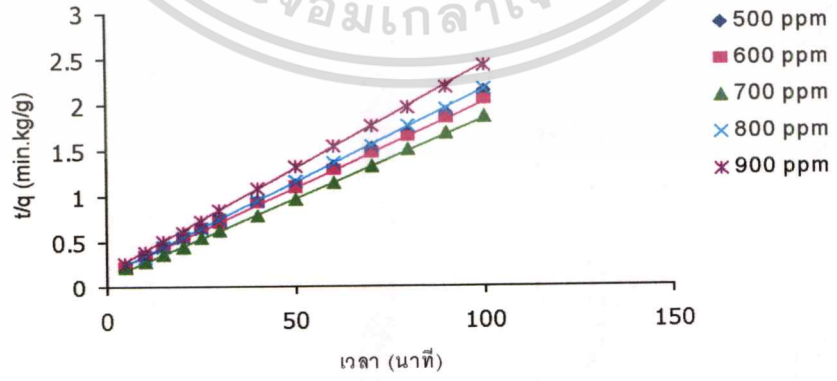
4.4.13 C_0 = 500, 600, 700, 800 และ 900 ppm และ w/v = 6.8 kg/m^3

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เวลาต่างๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัว (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่อิ่มตัวลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ { $\log(q_e-q_t)$ } กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับและเวลามาแทนค่าในแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่างๆ (t/q_t) กับเวลา (t) แสดงได้ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเป็น 500-900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรและใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.35 ถึง 4.42 ค่าคงที่อัตราเร็วที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเมื่อพิจารณาการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 300, 400, 500 และ 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วลดลงเรื่อยๆ คือจาก $3.35x10^{-3}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที ไปเป็น $1.05x10^{-4}$, $3.09x10^{-5}$, $2.87x10^{-5}$ และ $2.25x10^{-5}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที ตามลำดับ เนื่องจากการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200, 300, 400, 500 และ 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (q_e) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คือจาก 32.15, 43.10, 57.14, 63.69 และ 68.03 กรัม/กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวมีค่าสูงขึ้นจึงต้องใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวมากขึ้นทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลง [37] และเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง คือ

$$t/q_t = 1/q_{e2}^2 k_2 + 1/q_{e2} t$$

จัดรูปใหม่เป็น

$$1/q_t - 1/q_{e2} t = 1/q_{e2}^2 k_2$$

$$q_{e2}^2/q_t - q_{e2} = 1/k_2$$

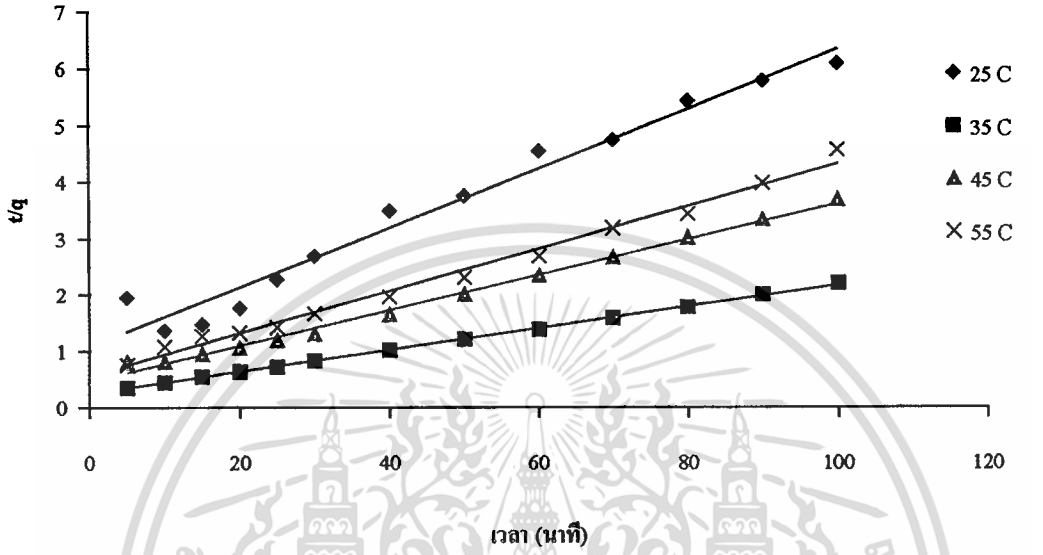
$$[q_{e2}^2 - (q_{e2} x\, q_t)]/q_t = 1/k_2$$

จะเห็นได้ว่า จากสมการที่จัดรูปใหม่ค่าคงที่อัตราเร็ว (k_2) แปรผกผันกับค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (q_e) ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวสูงขึ้นทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วมีค่าลดลง ผลการทดลองสำหรับอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นจาก 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 500, 600 และ 700 ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วลดลงเรื่อยๆ คือจาก $6.20x10^{-5}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที ไปเป็น$5.10x10^{-5}$, $4.38x10^{-5}$ และ $2.60x10^{-5}$ กิโลกรัม/กรัม.นาทีตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรมีค่าคงที่อัตราเร็วเพิ่มขึ้น $3.51x10^{-5}$ กิโลกรัม/กรัม.นาที เนื่องจากการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 400, 500, 600 และ 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (q_e) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คือจาก 50.25 กรัม/กิโลกรัม ไปเป็น 53.47, 57.47 และ 60.60 กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวมีค่าสูงขึ้นจึงต้องใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวมากขึ้นทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าลดลง แต่ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัวลดลงเท่ากับ 58.14 กรัม/กิโลกรัม จึงใช้เวลาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวน้อยลงทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรมีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

จากแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 4.44 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองการดูดซับอันดับสองที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	R^2	ค่าคงที่อัตราเร็ว (k_2) (กิโลกรัม/กรัม.นาที)
25	0.9707	1.58×10^{-3}
35	0.9994	1.98×10^{-3}
45	0.9949	2.25×10^{-3}
55	0.9927	3.02×10^{-3}

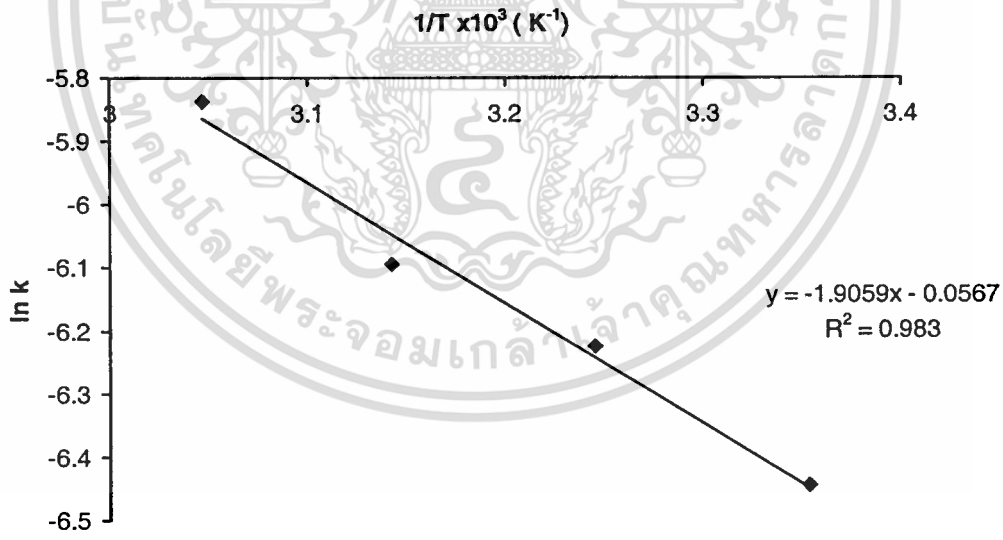
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส ไปเป็น 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีผลทำทำให้ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 1.58×10^{-3} กิโลกรัม/กรัม.นาที ไปเป็น 1.98×10^{-3}, 2.25×10^{-3} และ 3.02×10^{-3} กิโลกรัม/กรัม.นาที ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มของจำนวนโมเลกุลของสารที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานต่ำสุดของค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ที่ทำให้เกิดการดูดซับ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลเหล่านี้จะมีผลทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) คือ

$$\ln k = \ln A - Ea/RT$$

โดยที่ความชันของกราฟ คือ $-Ea/RT$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$
เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างล็อกการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว (lnk) และหนึ่งส่วนอุณหภูมิ (1/T) ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (Ea) ได้



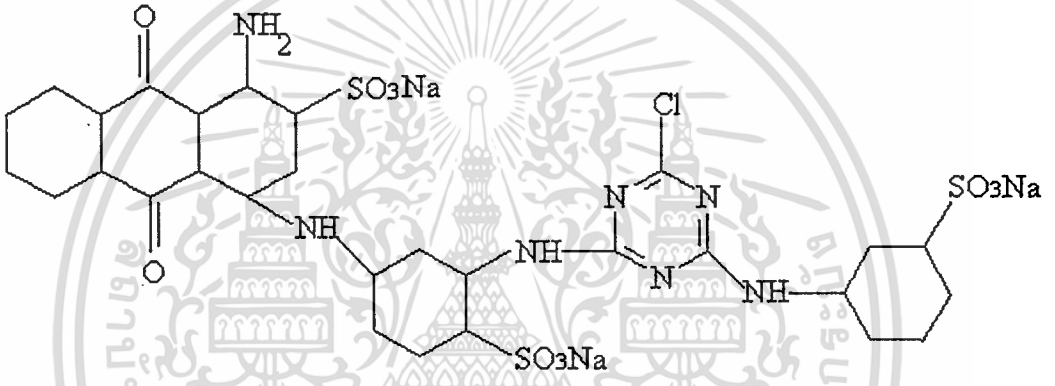
รูปที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 25, 35, 45, 55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.45 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์มีค่าเท่ากับ 15.85 กิโลจูล/โมล ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Mahramanlioglu [38] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับฟลูออไรด์ในสารละลายโดยใช้ดินฟอกขาวที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าอยู่ระหว่าง 8-16 กิโลจูล/โมล

จากกลไกการดูดซับของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) โมเลกุลของสีย้อมจะดูดซับบนประจุที่พื้นผิวของดินเหนียว
2) กลไกเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นประจุลบ โมเลกุลของสีย้อมแสดงคุณสมบัติเป็นประจุลบแสดงได้ดังรูปที่ 4.46 สามารถแลกเปลี่ยนกับชั้นในของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เป็นประจุลบของคาร์บอเนต



รูปที่ 4.45 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากลไกการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เป็นไปตามกลไกที่ 2 และจากงานวิจัยของ Shigeo Miyata [20] ได้ศึกษาหาไอโซเทอมของการแลกเปลี่ยนไอออนของสารประกอบดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่สังเคราะห์ขึ้น (HT) โดยพิจารณาที่มีประจุลบแตกต่างกัน พบว่าค่าคงที่การแลกเปลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุลของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เป็นประจุลบแบบโมโนเวเลนท์ (monovalent) เรียงตามลำดับได้ดังนี้ $OH^- > F^- > Cl^- > Br^- > NO_3^- > I^-$ ส่วนที่เป็นประจุลบแบบไดเวเลนท์สามารถเรียงลำดับค่าคงที่ของการแลกเลี่ยนไอออนที่สภาวะสมดุลได้เป็น $CO_3^{2-} > NYS^{2-} > SO_4^{2-}$ โดยที่คาร์บอเนตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าเมื่อเทียบกับไอออนอื่นๆ และยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแบบไดเวเลนท์ได้ดีอีกด้วย ทำให้ในการทดลองจึงเลือกใช้คาร์บอเนตเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์

ค่าทางอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ คือ เอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH°) พลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) และเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS°)

4.6.1 ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH°) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์

จากการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K) ได้จาก

$$K = [q_e\,(w/v)] / [C_0 - q_e\,(w/v)] \qquad [\ 26\ ]$$

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ
25	2.75
35	2.02
45	1.71
55	1.50

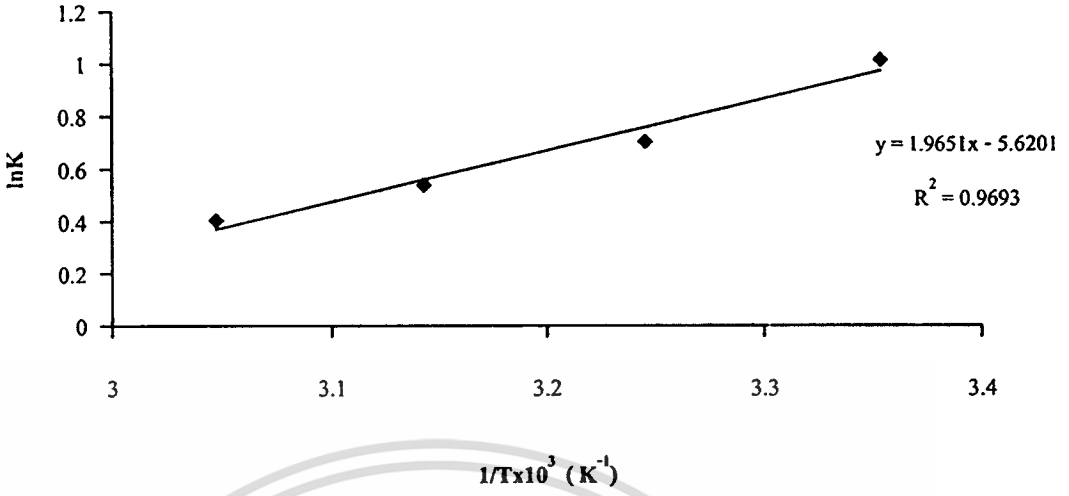
จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 นำไปแทนในสมการของแวนฮอฟด์ คือ

$$\ln K = -\Delta H^\circ/RT + \text{constant}$$

โดยที่ความชันของกราฟ คือ $-\Delta H^\circ/R$ และ จุดตัดแกน y คือ constant

ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างล็อกการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (lnK) และหนึ่งส่วนอุณหภูมิ (1/T) แสดงได้ดังรูปที่ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ของสมการแวนท์ฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากความชันที่ได้จากสมการของแวนท์ฮอฟฟ์ได้ค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH°) เท่ากับ -16.34 กิโลจูล/โมล จะเห็นได้ว่าค่าเอนทัลปีมาตรฐานมีค่าเป็นลบ (ΔH° = ลบ) แสดงว่าการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เป็นการดูดซับแบบคายความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นมีผลทำให้การดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ลดลงและเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับลดลงมีผลทำให้การดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าเอนทัลปีโดยทั่วไป [26] พบว่าการดูดซับทางเคมีมีค่าเท่ากับ 40-120 กิโลจูล/โมล ซึ่งมีค่ามากกว่าการดูดซับทางกายภาพซึ่งโดยทั่วไปมีค่า $<$ 40 กิโลจูล/โมล ดังนั้นการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์จึงเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งสอดคล้องกับกลไกการดูดซับที่เป็นแบบการแลกเปลี่ยนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน(ΔG°)ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์

จากค่าคงที่สมดุลที่ 25 องศาเซลเซียส ที่ได้จากตารางที่ 4.6 นำมาแทนค่าในสมการ

โดยที่ K (25°C) = 2.75 , R = 8.314 J/mol.K , T = 298 K

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

$$= -(8.314 \text{ J/mol.K})(298 \text{ K})(\ln 2.75)$$

$$= -2.51 \text{ kJ/mol}$$

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์มีค่าเท่ากับ -2.51 kJ/mol ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีค่าเป็นลบ [39] แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้วขบวนการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สามารถเกิดขึ้นได้เอง

4.6.3 ค่าเอนโทรปีมาตรฐาน (ΔS°) ของการดูดซับสีย้อมด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์

จากค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH°) ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.6.1 และค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.6.2 นำมาแทนค่าในสมการ

$$\Delta S^\circ = (\Delta H^\circ - \Delta G^\circ) / T$$

โดยที่ $\Delta H^\circ = -16.34$ kJ/mol , $\Delta G^\circ = -2.51$ kJ/mol , T = 298 K

$$\Delta S^\circ = [(-16.34 \text{ kJ/mol}) - (-2.51 \text{ kJ/mol})] / (298 \text{ K})$$

$$= -4.64 \times 10^{-2} \text{ kJ/mol.K}$$

จากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ -4.64×10^{-2} kJ/mol.K โดยทั่วไปค่าเอนโทรปีของการดูดซับบอกถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (adsorbent) และตัวถูกดูดซับ (adsorbate) [39,40] โดยที่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta S^\circ = +$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมากบอกถึงมีการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นลบ ($\Delta S^\circ = -$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อยบอกถึงไม่มีการเกิดพันธะหรือไม่มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ดังนั้นจากค่าเอนโทรปีที่หาได้มีค่าเป็นลบแสดงว่า โมเลกุลของสีย้อมที่เป็นประจุลบ(dye^-)เกิดการแลกเปลี่ยนกับชั้นในของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่เป็นประจุลบของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}- hydrotalcite) โดยไม่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเท่ากัน ความสามารถในการดูดซับสีย้อมมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน w/v สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน w/v เดียวกัน ความสามารถ ในการดูดซับสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 800 และ 900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราส่วน w/v เดียวกัน

จากไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์พบว่า เป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับของฟลอยลิช (Freundlich adsorption isotherm)

จากแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งและแบบจำลองการดูดซับอันดับสองพบว่าการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และจากแบบจำลองการดูดซับอันดับสองสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเท่ากัน ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วน w/v สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอัตราส่วน w/v เดียวกัน จะได้ว่าค่าคงที่ในการดูดซับจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 800 และ 900 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าคงที่อัตราเร็วมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วน w/v เดียวกัน

จากค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 15.85 กิโลจูล/โมล บอกถึงกลไกการดูดซับเป็นแบบแลกเปลี่ยนไอออน

จากค่าทางอุณหพลศาสตร์พบว่าการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์มีค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH°) เท่ากับ -16.34 กิโลจูล/โมล แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบคายความร้อนและการดูดซับเป็นแบบกายภาพ ส่วนค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG°) มีค่าเท่ากับ -2.51 กิโลจูล/โมล แสดงว่าโดยธรรมชาติแล้วขบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง และค่าเอนโทรปี (ΔS°) มีค่าเท่ากับ -4.64×10^{-2} กิโลจูล/โมล.เคลวิน บอกถึงตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับไม่เกิดพันธะระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการหาค่าความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นเดียวกันแต่อัตราส่วน w/v ต่างกันควรมีการหาค่าความสามารถในการดูดซับที่เหมาะสมด้วย
2. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เช่น ขนาดของ ตัวดูดซับ ความเร็วรอบของใบพัด ค่าพีเอช เป็นต้น
3. ควรมีการศึกษาการดูดซับเทียบกับสีย้อมชนิดอื่นๆ เช่น สีย้อมเบสิค สีย้อมเอซิด เป็นต้น
4. ควรมีการศึกษาความสามารถในการดูดซับของดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์ที่นำกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การให้ความร้อน การล้างด้วยเบสเป็นต้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. พิมล เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. **เคมีสภาวะแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าท์. 2539.
2. เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. **วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.** กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์. 2537.
3. อุดม จารุรัตน์ และจารุรัตน์ วรนิสรากุล. **วิศวกรรมการประปาและสุขาภิบาล.** กรุงเทพฯ : เรือนแก้วการพิมพ์. 2542
4. Jason Orthman. "Development of Superior Adsorbents from Bentonite to Remove Colour Organics." **Adsorption Studies.** Vol. 5, 2000. pp.1-68.
5. Philippe C. et. al. "Treatment and Reuse of Wastewater from the Textile Wet-Processing Industry : Review of Emerging Technologies." **J. Chem. Technol. Biotechnol.** Vol.72, 1998. pp. 289-302.
6. Danald L.S. **Environmental Soil Chemistry.** USA : Acadamic Press. 1995.
7. กรองกาญจน์ ภูระรัตน์. "การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดพาราควอทโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีและการดูดซับด้วยถ่าน." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2530.
8. วินัย สมบูรณ์. "การบำบัดโลหะหนักด้วยโพลิเมอร์ธรรมชาติ." หน้า 10-18. ในรายงานสัมมนาระดับปริญญาเอก สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2541.
9. ศิไรรัตน์ ศรีเกษเพชร์. "การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2543.
10. ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์. "การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาการจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
11. Weber W.J. Jr. **Physicochemical Process for Water Quality Control.** USA : Wiley Interscience. 1972.
12. Charler N. and Satterfield. **Heterogenous Catalysis in Industrial Practice** , 2nd ed. New York : McGraw-Hill. 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สันทัด ศิริอนันท์ไพบูลย์ และขนิษฐา ชัยรัตนาวรรณ. **เคมีวิทยาศาสตร์.** กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชัน. 2542.

14. Mckay, G. et. al. "Sorption of Dye from Aqueous Solution by Peat." **chemical Engineering Journal.** Vol.70, 1998. pp.115-124.

15. Raymond Chang. **Essential Chemistry.** International edition. New York : McGraw-Hill. 1996.

16. Raymond Chang. **Chemistry.** 5th ed. New York : McGraw-Hill. 1994.

17. นภดล ไชยคำ และคณะ. **เคมีเล่ม 1.** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. 2542.

18. Heinrich Zollinger. **Color Chemistry.** New York : Weinheim. 1987.

19. ชัยยุทธ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม. **เคมีประยุกต์.** กรุงเทพฯ : ว. เพ็ชร์สกุล. 2543.

20. Shigeo Miyata. 1983. "Anion-Exchange Properties of Hydrotalcite-Like Compounds." **Clay and Clay Minerals.** Vol.4, 1983. pp. 305-311.

21. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม.** 2542.

22. ลั่นทม จอนจอบทรง. "การบำบัดและจัดการน้ำเสียจากการย้อมสี." **วารสารเทคโนโลยีที่เหมาะสม.** (ตค.-ธค. 35) หน้า 38-43.

23. วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ. "การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย." วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.

24. อภิชาต หิรัญจิตต์. "การกำจัดสีย้อมรีแอ็คทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดติดผิวและโคแอกกูเลชัน." วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.

25. พัชรี คำธิดา และคณะ. "การกำจัดสีอินทรีย์ที่ละลายในน้ำด้วยดินฟอกสีที่ใช้แล้ว." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ, มหาวิทยาลัยรังสิต. 2537.

26. F-C. WU. et. al. "Kinetic of Color Removal by Adsorption from Water Using Activated Clay." **Environmental Technology.** Vol. 22, 2001. pp. 771-729.

27. R.S. Juang. et. al. "The Ability of Activated Clay for the Adsorption of Dyes from Aqueous Solution." **Environmental Technology.** Vol. 18, 1997. pp. 525-531.

28. G, Mckay. "Equilibrium Studies for the Adsorption of Dyestuffs from Aqueous Solutions by Low-Cost Materials." **Water , Air , and Soil Pollution.** Vol. 29, 1986. pp. 273-283.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

29. Y.S. Ho. et. al. "The Sorption of Lead (II) Ions on Peat." **Water Res.** Vol. 33, 1999. pp. 578-584.

30. Chnoong-Kheng Lee. et. al. "Removal of Some Organic Dyes by Hexane-Extracted Spent Bleaching Earth." **J. Chem. Tech. Biotechnol.** Vol. 69, 1997. pp. 93-99.

31. Mohammad S. et. al. "Colour Removal from Textile Effluents by Adsorption Techniques." **Water Res.** Vol. 25, 1991. pp. 271-273.

32. Mamdouh M. et. al. "Removal of Different Basic Dyes from Aqueous Solutions by Adsorption on Palm-Fruit Bunch Particles." **Chemical Engineering Journal.** Vol. 66, 1997. pp. 223-226.

33. Gupta G.S. et. al. "Removal of Chrome Dyes from Aqueous Solutions by Mixed Adsorbents : Fly Ash and Coal." **Water Res.** Vol. 24, 1990. pp. 45-50.

34. J. Orthman. et. al. "Use Of Anionic Clay Hydrotalcite to Remove Coloured Organics from Aqueous Solution." **Separation Purification Technology.** Vol. 31, 2003. pp. 53-59.

35. Di Cosimo J.I. et. al. "Structure and Surface and Catalytic Properties of Mg-Al Basic Oxides." **Journal of Catalysis.** Vol. 178, 1998. pp. 499-510.

36. Bruce C. Gates. **Catalytic Chemistry.** USA: John Wiley & Son, Inc. 1992.

37. Ming-Shen Chiou. et. at. "Equillibrium and Kinetic Modeling of Adsorption of Reactive Dye on Cross-Linked Chitosan Beads." **Journal of Hazadous Materials.** Vol. B93, 2002. pp. 233-248.

38. Mahramanlioglu M. et. al. "Adsorption of Fluoride from Aqueous Solution by Acid Treated Spent Bleaching Earth." **Journal of Fluorine Chemistry.** Vol. 115, 2002. pp. 41-47.

39. Naseem Rauf. et. al. "Thermodynamics of Fe(II) and Mn(II) Adsorption onto Bentonite from Aqueous Solutions." **J. Chem. Thermodynamics.** Vol. 32, 2000. pp. 651-658.

40. Vind K. Gupta et. al. "Removal of Cadmium and Nickel from Wastewater Using Bagasse fly ash - a Sugar Industry Waste." **Water Research.** Vol. 37, 2003. pp. 4038-4044.

41. Summer, M.E. et. al. **Method of Soil Analysis. Part 3.** USA: John Wiley & Son, Inc. 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

ก.1 วิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

1. นำสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด

2. เตรียมสารละลายสีที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 20 40 60 80 และ 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

3. นำสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max}

4. นำข้อมูลที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมก็จะได้กราฟมาตรฐาน

ก.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

1. นำสารละลายสีย้อมที่ต้องการหาความเข้มข้น มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ λ_{max} ของแต่ละความเข้มข้น

2. นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ มาหาความเข้มข้นโดยใช้วิธีการเทียบมาตรฐาน

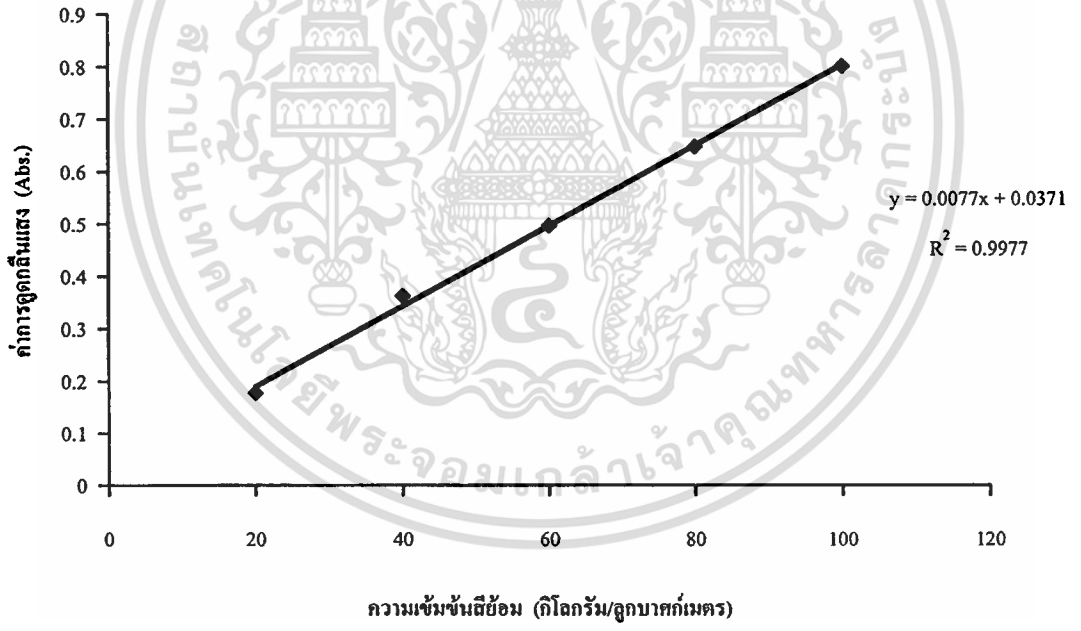
ก.3 กราฟมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) คือ 600 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

ความเข้มข้นของสีย้อม (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
20	0.177
40	0.362
60	0.492
80	0.647
100	0.800



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับและแบบจำลองในการดูดซับ

ตารางที่ ข.1 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log(q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	95.60	95.60	92.00	94.40	0.00	1.90	-	2.08
5	88.50	85.70	81.30	85.17	23.08	1.75	0.22	3.63
10	78.00	77.30	79.50	78.24	40.38	1.59	0.25	1.12
15	75.60	76.50	71.49	74.53	49.68	1.47	0.30	2.67
20	73.20	74.30	69.16	72.22	55.45	1.38	0.36	2.71
25	71.50	72.60	66.70	70.29	60.26	1.28	0.41	3.14
30	68.00	70.10	67.01	68.37	65.06	1.16	0.46	1.58
40	66.50	68.40	66.37	67.09	68.27	1.05	0.59	1.14
50	65.40	66.70	65.33	65.81	71.47	0.90	0.70	0.77
60	63.40	65.30	64.89	64.53	74.68	0.68	0.80	1.00
70	62.80	64.50	64.34	63.88	76.28	0.51	0.92	0.94
80	62.50	63.00	64.22	63.24	77.88	0.20	1.03	0.88
90	62.00	62.40	64.57	62.99	78.53	-0.02	1.15	1.38
100	62.50	62.00	63.30	62.60	79.49	-	1.26	0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	99.50	98.80	103.44	100.58	0	1.81	-	2.50
5	84.20	80.19	83.50	82.63	22.44	1.62	0.22	2.14
10	73.84	75.20	75.39	74.81	32.21	1.50	0.31	0.85
15	68.50	70.15	70.78	69.81	38.46	1.41	0.39	1.18
20	65.45	67.20	67.93	66.86	42.15	1.34	0.47	1.27
25	63.60	64.50	63.63	63.91	45.83	1.26	0.55	0.51
30	61.55	62.40	58.18	60.71	49.84	1.15	0.60	2.23
40	57.25	55.90	57.43	56.86	54.65	0.97	0.73	0.84
50	55.30	55.00	52.57	54.29	57.85	0.78	0.86	1.50
60	53.55	52.10	52.63	52.76	59.78	0.62	1.00	0.73
70	50.50	51.50	53.19	51.73	61.06	0.46	1.15	1.36
80	49.50	50.10	51.75	50.45	62.66	0.11	1.28	1.17
90	48.60	49.50	51.33	49.81	63.46	-0.32	1.42	1.39
100	48.70	49.00	50.56	49.42	63.94	-	1.56	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.20 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	98.50	97.50	95.57	97.19	0.00	1.76	-	1.49
5	71.65	70.43	69.63	70.57	22.19	1.54	0.23	1.02
10	64.63	63.00	62.27	63.30	28.25	1.46	0.35	1.21
15	56.70	56.50	57.98	57.06	33.44	1.37	0.45	0.80
20	53.66	52.10	52.58	52.78	37.01	1.30	0.54	0.80
25	48.25	47.85	47.03	47.71	41.23	1.20	0.61	0.62
30	45.67	44.55	42.41	44.21	44.16	1.11	0.68	1.66
40	38.55	38.10	38.04	38.23	49.13	0.90	0.81	0.28
50	35.45	34.66	34.86	34.99	51.84	0.72	0.96	0.41
60	34.10	33.10	34.26	33.82	52.81	0.63	1.14	0.63
70	33.44	32.55	31.18	32.39	54.00	0.48	1.30	1.14
80	31.20	30.95	29.56	30.57	55.52	0.18	1.44	0.88
90	29.55	29.00	30.43	29.66	56.28	-0.12	1.60	0.72
100	28.75	28.66	28.84	28.75	57.03	-	1.75	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.60 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	100.10	101.65	102.60	101.45	0.00	1.68	-	1.26
5	71.20	70.33	68.95	70.16	19.56	1.46	0.26	1.13
10	59.62	58.66	58.30	58.86	26.62	1.33	0.38	0.68
15	53.40	52.80	50.88	52.36	30.68	1.24	0.49	1.32
20	46.85	47.00	46.88	46.91	34.09	1.15	0.59	0.08
25	42.75	41.65	40.34	41.58	37.42	1.03	0.67	1.21
30	39.22	38.90	36.51	38.21	39.53	0.93	0.76	1.48
40	34.65	33.40	32.93	33.66	42.37	0.76	0.94	0.89
50	31.20	30.52	28.76	30.16	44.56	0.55	1.12	1.26
60	28.10	27.50	27.86	27.82	46.02	0.32	1.30	0.30
70	27.80	26.10	25.27	26.39	46.92	0.09	1.49	1.29
80	27.20	25.90	25.29	26.13	47.08	0.02	1.70	0.98
90	27.00	25.60	25.40	26.00	47.16	-0.01	1.91	0.87
100	25.33	24.52	23.47	24.44	48.13	-	2.08	0.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.00 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/m^3)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	98.65	99.20	98.58	98.81	0.00	1.64	-	0.34
5	61.25	60.58	60.75	60.86	18.97	1.40	0.26	0.35
10	52.63	50.22	52.43	51.76	23.53	1.31	0.43	1.34
15	43.65	42.10	40.67	42.14	28.33	1.20	0.53	1.49
20	36.10	35.66	36.21	35.99	31.41	1.10	0.64	0.29
25	31.22	30.54	29.29	30.35	34.23	0.99	0.73	0.98
30	28.40	27.55	26.25	27.40	35.71	0.92	0.84	1.08
40	22.85	21.66	20.38	21.63	38.59	0.74	1.04	1.24
50	18.96	17.85	16.53	17.78	40.51	0.56	1.23	1.22
60	14.53	14.20	13.45	14.06	42.37	0.24	1.42	0.55
70	13.62	12.55	11.78	12.65	43.08	0.01	1.63	0.92
80	11.20	12.53	10.38	11.37	43.72	-0.41	1.83	1.09
90	11.25	10.66	11.06	10.99	43.91	-0.72	2.05	0.30
100	11.00	10.05	10.75	10.60	44.10	-	2.27	0.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	197.12	195.52	195.45	196.03	0.00	1.78	-	0.94
5	168.56	165.21	167.38	167.05	24.15	1.55	0.21	1.70
10	156.66	154.25	155.62	155.51	33.76	1.41	0.30	1.21
15	150.24	148.95	148.11	149.10	39.10	1.32	0.38	1.07
20	144.60	142.20	142.56	143.12	44.09	1.20	0.45	1.29
25	138.55	136.66	137.47	137.56	48.72	1.04	0.51	0.95
30	134.10	132.52	134.54	133.72	51.92	0.89	0.58	1.06
40	130.58	128.88	127.60	129.02	55.84	0.59	0.72	1.49
50	127.31	125.22	128.11	126.88	57.62	0.33	0.87	1.49
60	126.30	124.10	126.40	125.60	58.69	0.03	1.02	1.30
70	125.10	123.33	125.79	124.74	59.40	-0.45	1.18	1.27
80	125.90	124.00	128.19	126.03	58.33	0.15	1.37	2.10
90	125.10	123.66	124.20	124.32	59.76	-	1.51	0.73
100	126.00	124.22	125.29	125.17	59.05	-0.15	1.69	0.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	200.15	202.30	200.64	201.03	0.00	1.69	-	1.13
5	161.35	159.65	159.51	160.17	20.43	1.46	0.24	1.02
10	145.62	143.22	145.53	144.79	28.12	1.32	0.36	1.36
15	134.69	132.00	133.06	133.25	33.89	1.18	0.44	1.36
20	125.63	123.85	124.62	124.70	38.16	1.04	0.52	0.89
25	120.10	118.45	120.16	119.57	40.73	0.92	0.61	0.97
30	115.72	113.24	115.65	114.87	43.08	0.78	0.70	1.41
40	111.05	109.62	111.13	110.60	45.21	0.59	0.88	0.85
50	111.00	109.51	111.29	110.60	45.21	0.59	1.11	0.96
60	109.26	107.77	109.64	108.89	46.07	0.48	1.30	0.99
70	107.77	105.30	107.18	106.75	47.14	0.28	1.49	1.29
80	105.32	103.84	104.70	104.62	48.21	-0.07	1.66	0.74
90	103.66	101.17	103.90	102.91	49.06	-	1.83	1.51
100	104.10	104.20	105.56	104.62	48.21	-0.07	2.07	0.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	197.66	195.52	196.44	196.54	0.00	1.60	-	1.07
5	151.84	149.66	151.44	150.98	16.27	1.38	0.31	1.16
10	136.77	134.22	134.52	135.17	21.92	1.26	0.46	1.39
15	123.95	121.10	122.00	122.35	26.50	1.13	0.57	1.46
20	115.36	113.58	115.04	114.66	29.24	1.04	0.68	0.95
25	108.10	106.88	108.48	107.82	31.68	0.93	0.79	0.84
30	103.65	104.23	102.77	103.55	33.21	0.84	0.90	0.74
40	99.65	97.42	98.19	98.42	35.04	0.71	1.14	1.13
50	96.33	94.15	94.52	95.00	36.26	0.59	1.38	1.17
60	90.45	88.41	89.46	89.44	38.25	0.27	1.57	1.02
70	86.60	84.62	85.58	85.60	39.62	-0.31	1.77	0.99
80	85.13	83.61	84.22	84.32	40.08	-1.45	2.00	0.76
90	85.15	84.00	83.51	84.22	40.11	-	2.24	0.84
100	86.22	85.41	88.02	86.55	39.28	-0.08	2.55	1.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	202.32	202.52	205.30	203.38	0.00	1.51	-	1.67
5	160.35	158.63	158.41	159.13	12.29	1.31	0.41	1.06
10	137.86	135.42	136.58	136.62	18.54	1.15	0.54	1.22
15	126.66	124.35	125.1	125.37	21.67	1.04	0.69	1.18
20	119.32	117.77	116.34	118.01	23.71	0.95	0.84	1.49
25	112.95	110.52	112.38	111.95	25.40	0.86	0.98	1.27
30	107.31	105.25	107.7	106.75	26.84	0.76	1.12	1.32
40	102.75	100.21	101.72	101.56	28.28	0.64	1.41	1.28
50	99.99	97.35	99.54	98.96	29.00	0.56	1.72	1.41
60	96.25	94.65	94.28	95.06	30.09	0.40	1.99	1.05
70	93.62	91.54	92.25	92.47	30.81	0.26	2.27	1.06
80	90.13	88.54	88.33	89.00	31.77	-0.07	2.52	0.98
90	88.16	86.61	88.36	87.71	32.13	-0.32	2.80	0.96
100	86.14	84.45	87.32	85.97	32.61	-5.83	3.07	1.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 200 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	197.28	198.52	194.84	196.88	0.00	1.46	-	1.87
5	149.25	147.67	149.30	148.74	10.94	1.26	0.46	0.93
10	127.65	125.30	127.06	126.67	15.96	1.12	0.63	1.22
15	111.12	109.62	111.21	110.65	19.60	0.98	0.77	0.89
20	102.62	100.06	100.71	101.13	21.76	0.86	0.92	1.33
25	95.25	93.33	94.02	94.20	23.34	0.76	1.07	0.97
30	87.75	85.55	87.19	86.83	25.01	0.61	1.20	1.14
40	81.14	79.13	82.31	80.86	26.37	0.43	1.52	1.61
50	76.36	74.45	76.17	75.66	27.55	0.19	1.81	1.05
60	74.44	72.25	72.88	73.19	28.11	-0.01	2.13	1.13
70	72.35	70.06	71.73	71.38	28.52	-0.25	2.45	1.18
80	71.68	69.25	69.31	70.08	28.82	-0.58	2.78	1.39
90	70.10	68.21	69.59	69.30	29.00	-1.05	3.10	0.98
100	69.25	67.75	69.73	68.91	29.09	-	3.44	1.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	290.15	288.65	272.12	283.64	0.00	1.76	-	10.00
5	235.12	233.25	234.74	234.37	24.63	1.53	0.20	0.99
10	213.52	211.11	213.56	212.73	35.45	1.36	0.28	1.40
15	202.95	200.30	202.45	201.90	40.87	1.24	0.37	1.41
20	196.36	194.45	195.42	195.41	44.11	1.15	0.45	0.96
25	192.85	190.32	190.07	191.08	46.28	1.08	0.54	1.54
30	187.75	185.63	186.87	186.75	48.44	0.99	0.62	1.07
40	181.15	179.96	179.67	180.26	51.69	0.81	0.77	0.78
50	176.85	174.48	176.46	175.93	53.85	0.64	0.93	1.27
60	174.26	172.56	174.49	173.77	54.94	0.51	1.09	1.05
70	172.72	170.05	172.03	171.60	56.02	0.34	1.25	1.39
80	170.15	168.26	169.91	169.44	57.10	0.03	1.40	1.03
90	168.62	166.65	166.54	167.27	58.18	-	1.55	1.17
100	168.15	167.23	168.38	167.92	57.86	-0.49	1.73	0.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	qt (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	294.62	294.56	287.93	292.37	0.00	1.70	-	3.85
5	232.32	230.15	232.54	231.67	21.68	1.46	0.23	1.32
10	208.14	206.65	207.83	207.54	30.29	1.31	0.33	0.79
15	195.24	193.54	194.39	194.39	34.99	1.19	0.43	0.85
20	188.62	186.95	187.86	187.81	37.34	1.12	0.54	0.84
25	182.62	180.06	181.01	181.23	39.69	1.04	0.63	1.29
30	177.25	175.23	178.04	176.84	41.26	0.97	0.73	1.45
40	171.62	169.23	169.93	170.26	43.61	0.85	0.92	1.23
50	166.65	164.45	163.90	165.00	45.49	0.71	1.10	1.46
60	162.36	160.45	161.66	161.49	46.74	0.59	1.28	0.97
70	158.89	156.66	155.78	157.11	48.31	0.37	1.45	1.60
80	153.25	151.15	153.76	152.72	49.87	-0.11	1.60	1.38
90	151.62	149.48	150.49	150.53	50.66	-	1.78	1.07
100	151.12	149.22	151.25	150.53	50.66	-	1.97	1.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	321.25	325.10	328.83	325.06	0.00	1.65	-	3.79
5	261.62	259.15	260.13	260.30	17.99	1.42	0.28	1.24
10	231.85	229.95	228.2	230.00	26.41	1.26	0.38	1.83
15	213.36	211.25	213.43	212.68	31.22	1.12	0.48	1.24
20	205.35	203.36	203.38	204.03	33.62	1.03	0.59	1.14
25	198.62	196.66	197.31	197.53	35.43	0.96	0.71	1.00
30	189.54	187.75	189.32	188.87	37.83	0.82	0.79	0.98
40	183.36	181.15	182.63	182.38	39.63	0.68	1.01	1.13
50	176.35	174.45	176.87	175.89	41.44	0.48	1.21	1.27
60	172.64	170.15	171.89	171.56	42.64	0.26	1.41	1.28
70	170.74	168.23	169.20	169.39	43.24	0.08	1.62	1.27
80	168.45	166.66	166.58	167.23	43.84	-0.22	1.82	1.06
90	166.65	164.46	164.07	165.06	44.44	-	2.03	1.39
100	166.15	164.43	164.60	165.06	44.44	-	2.25	0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log(q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	346.25	345.15	355.15	348.85	0.00	1.60	-	5.48
5	267.83	265.45	266.85	266.71	18.67	1.33	0.27	1.20
10	237.25	235.56	237.56	236.79	25.47	1.16	0.39	1.08
15	220.36	218.24	220.50	219.70	29.35	1.03	0.51	1.27
20	212.35	210.06	211.04	211.15	31.29	0.94	0.64	1.15
25	205.55	203.36	205.31	204.74	32.75	0.86	0.76	1.20
30	197.52	195.25	195.83	196.20	34.69	0.73	0.86	1.18
40	190.10	188.85	190.42	189.79	36.15	0.59	1.11	0.83
50	184.45	182.63	183.06	183.38	37.61	0.39	1.33	0.95
60	180.55	178.21	178.54	179.10	38.58	0.16	1.56	1.27
70	177.42	175.23	178.26	176.97	39.06	-0.01	1.79	1.56
80	175.21	173.36	175.92	174.83	39.55	-0.31	2.02	1.32
90	173.24	171.15	173.68	172.69	40.03	-	2.25	1.35
100	173.14	170.21	174.22	172.69	40.03	-	2.50	2.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 300 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	324.15	322.25	326.08	324.16	0.00	1.52	-	1.92
5	252.36	250.61	251.05	251.34	14.00	1.28	0.36	0.91
10	217.53	215.32	217.28	216.71	20.66	1.10	0.48	1.21
15	200.69	198.42	199.06	199.39	23.99	0.96	0.63	1.17
20	189.95	187.45	188.31	188.57	26.07	0.85	0.77	1.27
25	183.25	181.65	181.34	182.08	27.32	0.77	0.91	1.03
30	178.45	176.20	178.60	177.75	28.16	0.70	1.07	1.34
40	170.85	168.16	168.26	169.09	29.82	0.52	1.34	1.53
50	165.52	163.35	165.41	164.76	30.65	0.40	1.63	1.22
60	161.75	159.32	160.22	160.43	31.49	0.22	1.91	1.23
70	157.62	155.24	155.44	156.10	32.32	-0.08	2.17	1.32
80	155.65	153.21	155.57	154.81	32.57	-0.23	2.46	1.39
90	154.35	152.42	155.05	153.94	32.73	-0.38	2.75	1.36
100	152.26	150.06	152.99	151.77	33.15	-	3.02	1.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	404.25	405.10	405.83	405.06	0.00	1.79	-	0.79
5	331.56	333.45	333.57	332.86	31.82	1.47	0.16	1.13
10	300.25	302.84	301.98	301.69	42.95	1.26	0.23	1.32
15	285.36	289.45	291.29	288.70	47.59	1.13	0.32	3.04
20	278.75	280.12	279.96	279.61	50.83	1.02	0.39	0.75
25	274.36	276.65	276.12	275.71	52.23	0.95	0.48	1.20
30	269.95	271.63	271.27	270.95	53.93	0.86	0.56	0.88
40	262.48	264.45	263.84	263.59	56.56	0.67	0.71	1.01
50	260.10	262.85	260.05	261.00	57.48	0.57	0.87	1.60
60	257.75	259.72	257.73	258.40	58.41	0.44	1.03	1.14
70	253.36	255.55	255.91	254.94	59.65	0.19	1.17	1.38
80	251.11	253.35	253.85	252.77	60.42	-0.11	1.32	1.46
90	250.01	252.51	251.89	251.47	60.88	-0.51	1.48	1.30
100	249.42	251.12	251.29	250.61	61.19	-	1.63	1.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	408.12	406.85	412.33	409.10	0.00	1.75	-	2.87
5	318.45	320.21	319.15	319.27	24.95	1.50	0.20	0.89
10	271.42	273.36	272.00	272.26	38.01	1.26	0.26	1.00
15	254.13	256.26	255.12	255.17	42.76	1.14	0.35	1.07
20	240.68	242.85	242.23	241.92	46.44	1.00	0.43	1.12
25	233.33	235.14	234.22	234.23	48.58	0.89	0.51	0.91
30	227.54	229.98	228.52	228.68	50.12	0.80	0.60	1.23
40	219.45	221.32	222.17	220.98	52.26	0.62	0.77	1.39
50	215.62	217.47	217.04	216.71	53.44	0.47	0.94	0.97
60	211.10	213.57	212.65	212.44	54.63	0.25	1.10	1.25
70	209.83	211.41	209.66	210.30	55.22	0.07	1.27	0.97
80	207.45	209.34	207.69	208.16	55.82	-0.23	1.43	1.03
90	206.84	208.82	206.27	207.31	56.05	-0.45	1.61	1.34
100	205.55	207.16	205.38	206.03	56.41	-	1.77	0.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.18 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	414.54	415.64	420.58	416.92	0.00	1.73	-	3.22
5	298.15	301.12	302.26	300.51	26.46	1.44	0.19	2.12
10	252.84	253.15	255.80	253.93	37.04	1.22	0.27	1.63
15	236.24	238.48	237.06	237.26	40.83	1.11	0.37	1.13
20	221.65	224.31	223.52	223.16	44.04	0.99	0.45	1.37
25	216.65	219.35	219.38	218.46	45.10	0.94	0.55	1.57
30	205.42	208.34	208.29	207.35	47.63	0.79	0.63	1.67
40	193.42	195.25	193.63	194.10	50.64	0.49	0.79	1.00
50	188.85	191.14	192.05	190.68	51.42	0.37	0.97	1.65
60	182.13	184.30	183.83	183.42	53.07	-0.17	1.13	1.14
70	181.62	183.74	182.32	182.56	53.26	-0.31	1.31	1.08
80	180.54	182.62	181.97	181.71	53.46	-0.54	1.50	1.06
90	180.20	182.45	182.48	181.71	53.46	-0.54	1.68	1.31
100	179.65	181.62	180.02	180.43	53.75	-	1.86	1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	400.15	399.41	397.35	398.97	0.00	1.70	-	1.45
5	264.85	266.42	265.14	265.47	25.63	1.39	0.20	0.84
10	227.75	230.65	230.31	229.57	32.54	1.25	0.31	1.59
15	208.56	211.86	210.06	210.34	36.24	1.15	0.41	1.65
20	190.25	193.52	193.40	192.39	39.69	1.02	0.50	1.85
25	181.15	184.36	184.75	183.42	41.41	0.94	0.60	1.98
30	170.62	172.96	170.77	171.45	43.71	0.81	0.69	1.31
40	153.61	155.52	155.24	154.79	46.92	0.52	0.85	1.03
50	142.81	144.45	143.78	143.68	49.06	0.06	1.02	0.82
60	142.51	144.25	144.28	143.68	49.06	0.06	1.22	1.01
70	141.68	143.52	141.97	142.39	49.30	-0.04	1.42	0.99
80	137.41	139.59	137.36	138.12	50.12	-1.09	1.60	1.27
90	138.25	140.12	138.54	138.97	49.96	-0.61	1.80	1.01
100	137.25	138.68	137.14	137.69	50.21	-	1.99	0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.20 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 400 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	398.52	399.25	395.30	397.69	0.00	1.67	-	2.10
5	257.43	260.85	261.45	259.91	22.96	1.37	0.22	2.17
10	222.31	225.68	226.62	224.87	28.80	1.24	0.35	2.27
15	204.16	207.54	209.06	206.92	31.79	1.16	0.47	2.51
20	190.34	192.62	190.37	191.11	34.43	1.07	0.58	1.31
25	176.26	178.92	178.40	177.86	36.64	0.98	0.68	1.41
30	164.87	166.65	166.18	165.90	38.63	0.88	0.78	0.92
40	143.48	145.23	144.88	144.53	42.19	0.61	0.95	0.93
50	132.64	134.45	133.17	133.42	44.05	0.34	1.14	0.93
60	127.64	130.65	127.87	128.72	44.83	0.15	1.34	1.68
70	124.36	126.05	126.78	125.73	45.33	-0.03	1.54	1.24
80	120.38	122.54	120.17	121.03	46.11	-0.85	1.73	1.31
90	121.65	123.54	124.29	123.16	45.75	-0.30	1.97	1.36
100	119.57	121.03	119.91	120.17	46.25	-	2.16	0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 3.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	502.65	502.38	504.33	503.12	0.00	1.81	-	1.06
5	409.84	412.62	413.39	411.95	25.32	1.60	0.20	1.87
10	358.41	361.25	360.34	360.00	39.75	1.40	0.25	1.45
15	332.95	335.58	333.56	334.03	46.97	1.26	0.32	1.38
20	310.57	313.37	313.86	312.60	52.92	1.08	0.38	1.78
25	300.45	302.87	301.36	301.56	55.99	0.96	0.45	1.22
30	293.51	296.65	295.02	295.06	57.79	0.86	0.52	1.57
40	283.21	286.62	286.13	285.32	60.50	0.65	0.66	1.84
50	280.62	283.61	282.01	282.08	61.40	0.56	0.81	1.50
60	277.83	279.30	279.36	278.83	62.30	0.43	0.96	0.87
70	274.95	276.10	275.69	275.58	63.20	0.26	1.11	0.58
80	271.25	273.68	272.09	272.34	64.11	-0.04	1.25	1.23
90	269.34	271.53	270.30	270.39	64.65	-0.44	1.39	1.10
100	268.54	270.67	268.06	269.09	65.01	-	1.54	1.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.22 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	510.62	511.75	516.60	512.99	0.00	1.77	-	3.18
5	407.35	410.82	411.05	409.74	23.47	1.55	0.21	2.07
10	353.41	356.27	355.89	355.19	35.86	1.36	0.28	1.55
15	324.15	327.62	328.09	326.62	42.36	1.22	0.35	2.15
20	305.48	308.47	307.47	307.14	46.78	1.08	0.43	1.52
25	292.14	295.36	296.93	294.81	49.59	0.97	0.50	2.44
30	281.65	284.82	284.84	283.77	52.10	0.83	0.58	1.84
40	272.40	275.09	274.60	274.03	54.31	0.66	0.74	1.43
50	265.24	268.74	268.61	267.53	55.79	0.49	0.90	1.98
60	262.37	265.38	265.12	264.29	56.52	0.37	1.06	1.67
70	257.62	260.17	259.48	259.09	57.70	0.07	1.21	1.32
80	251.32	254.75	255.63	253.90	58.88	-	1.36	2.28
90	251.42	254.70	255.58	253.90	58.88	-	1.53	2.19
100	253.72	255.05	256.80	255.19	58.59	-0.53	1.71	1.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.23 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	490.25	492.67	489.81	490.91	0.00	1.72	-	1.54
5	373.61	376.47	375.88	375.32	22.23	1.48	0.22	1.51
10	310.38	313.42	313.22	312.34	34.34	1.26	0.29	1.70
15	286.26	289.58	291.04	288.96	38.84	1.14	0.39	2.45
20	272.30	275.91	275.83	274.68	41.58	1.04	0.48	2.06
25	260.67	263.47	262.88	262.34	43.96	0.94	0.57	1.48
30	249.58	252.22	252.10	251.30	46.08	0.81	0.65	1.49
40	236.27	239.65	239.01	238.31	48.58	0.60	0.82	1.80
50	230.38	233.35	233.68	232.47	49.70	0.46	1.01	1.82
60	227.85	230.00	231.76	229.87	50.20	0.38	1.20	1.96
70	222.35	225.64	224.10	224.03	51.32	0.10	1.36	1.65
80	216.39	219.57	218.58	218.18	52.45	-0.90	1.53	1.63
90	216.30	219.85	218.39	218.18	52.45	-0.90	1.72	1.78
100	215.69	218.38	218.52	217.53	52.57	-	1.90	1.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.24 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	496.65	496.74	496.47	496.62	0.00	1.69	-	0.14
5	360.85	362.10	362.90	361.95	22.45	1.43	0.22	1.03
10	310.62	312.25	311.03	311.30	30.89	1.27	0.32	0.85
15	284.21	286.95	286.75	285.97	35.11	1.15	0.43	1.53
20	271.66	273.27	274.04	272.99	37.27	1.08	0.54	1.21
25	256.68	258.34	257.18	257.40	39.87	0.98	0.63	0.85
30	244.95	246.38	245.80	245.71	41.82	0.88	0.72	0.72
40	226.10	228.73	227.76	227.53	44.85	0.66	0.89	1.33
50	216.38	218.46	216.58	217.14	46.58	0.45	1.07	1.15
60	210.48	212.75	210.67	211.30	47.55	0.26	1.26	1.26
70	204.31	206.65	205.39	205.45	48.53	-0.06	1.44	1.17
80	199.53	201.37	201.83	200.91	49.29	-0.97	1.62	1.22
90	199.50	201.30	199.98	200.26	49.39	-	1.82	0.93
100	199.58	200.99	202.16	200.91	49.29	-0.97	2.03	1.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.25 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 500 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	log (q_e-q_t)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	498.72	495.14	496.00	496.62	0.00	1.67	-	1.87
5	339.56	342.51	341.44	341.17	22.86	1.39	0.22	1.49
10	287.35	290.47	291.79	289.87	30.40	1.23	0.33	2.28
15	263.30	266.85	267.37	265.84	33.94	1.13	0.44	2.22
20	247.38	250.16	251.29	249.61	36.33	1.04	0.55	2.01
25	232.95	235.10	235.99	234.68	38.52	0.94	0.65	1.56
30	218.37	221.64	221.16	220.39	40.62	0.83	0.74	1.77
40	202.26	205.48	204.74	204.16	43.01	0.63	0.93	1.69
50	193.45	196.33	195.40	195.06	44.35	0.47	1.13	1.47
60	183.61	186.48	185.87	185.32	45.78	0.18	1.31	1.51
70	179.25	182.62	182.42	181.43	46.35	-0.02	1.51	1.89
80	175.43	178.61	178.55	177.53	46.93	-0.42	1.70	1.82
90	172.84	175.18	176.80	174.94	47.31	-	1.90	1.99
100	175.52	179.25	179.77	178.18	46.83	-0.32	2.14	2.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.26 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 4.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	592.14	590.63	589.12	590.63	0.00	1.80	-	1.51
5	448.58	451.12	450.69	450.13	31.93	1.50	0.16	1.36
10	410.69	413.56	412.20	412.15	40.56	1.36	0.25	1.44
15	384.51	387.70	388.31	386.84	46.32	1.24	0.32	2.04
20	372.26	375.19	376.11	374.18	49.19	1.16	0.41	2.01
25	359.54	362.52	362.50	361.52	52.07	1.06	0.48	1.71
30	353.42	356.41	355.74	355.19	53.51	1.00	0.56	1.57
40	338.58	341.00	340.42	340.00	56.96	0.82	0.70	1.26
50	327.18	330.68	331.75	329.87	59.26	0.64	0.84	2.39
60	321.87	324.22	324.53	323.54	60.70	0.46	0.99	1.45
70	315.70	318.42	317.54	317.22	62.14	0.16	1.13	1.39
80	312.07	315.51	316.46	314.68	62.72	-0.06	1.28	2.31
90	308.84	311.19	312.64	310.89	63.58	-	1.42	1.92
100	310.22	313.87	316.17	313.42	63.00	-0.24	1.59	3.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.27 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	605.16	606.45	609.66	607.09	0.00	1.75	-	2.32
5	482.47	485.78	485.43	484.56	23.56	1.51	0.21	1.82
10	422.60	425.33	425.36	424.43	35.13	1.32	0.28	1.58
15	393.66	396.47	397.72	395.95	40.60	1.18	0.37	2.08
20	378.84	381.21	380.34	380.13	43.65	1.09	0.46	1.20
25	365.95	368.70	367.76	367.47	46.08	0.99	0.54	1.40
30	355.99	358.33	359.59	357.97	47.91	0.90	0.63	1.83
40	340.21	343.60	342.64	342.15	50.95	0.69	0.79	1.75
50	330.16	333.47	334.35	332.66	52.78	0.48	0.95	2.21
60	324.97	327.82	326.20	326.33	53.99	0.26	1.11	1.43
70	321.60	324.47	323.41	323.16	54.60	0.09	1.28	1.45
80	318.47	321.82	319.71	320.00	55.21	-0.22	1.45	1.69
90	315.22	318.70	318.49	317.47	55.70	-0.91	1.62	1.95
100	314.33	317.60	318.59	316.84	55.82	-	1.79	2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.28 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	600.15	599.47	598.85	599.49	0.00	1.72	-	0.65
5	456.87	458.16	458.88	457.97	23.59	1.47	0.21	1.02
10	405.64	407.38	405.22	406.08	32.24	1.32	0.31	1.15
15	378.35	380.19	379.93	379.49	36.67	1.21	0.41	1.00
20	358.91	360.87	359.83	359.87	39.94	1.11	0.50	0.98
25	345.19	347.03	347.52	346.58	42.15	1.03	0.59	1.23
30	333.38	335.66	334.64	334.56	44.16	0.94	0.68	1.14
40	312.08	314.91	314.02	313.67	47.64	0.72	0.84	1.45
50	305.15	307.96	305.13	306.08	48.90	0.60	1.02	1.63
60	293.80	295.49	294.75	294.68	50.80	0.32	1.18	0.85
70	287.67	289.03	288.35	288.35	51.86	0.02	1.35	0.68
80	284.93	286.45	284.19	285.19	52.38	-0.28	1.53	1.15
90	281.60	283.15	281.34	282.03	52.91	-	1.70	0.98
100	282.52	284.25	281.21	282.66	52.81	-0.98	1.89	1.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.29 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	602.15	602.51	603.32	602.66	0.00	1.69	-	0.60
5	452.86	455.18	455.43	454.49	21.79	1.44	0.23	1.42
10	397.42	400.75	400.12	399.43	29.89	1.28	0.33	1.77
15	367.20	370.48	369.47	369.05	34.35	1.17	0.44	1.68
20	348.71	351.38	350.09	350.06	37.15	1.08	0.54	1.34
25	332.87	336.65	337.01	335.51	39.29	0.99	0.64	2.29
30	320.22	323.48	324.85	322.85	41.15	0.90	0.73	2.38
40	305.71	308.60	306.78	307.03	43.48	0.75	0.92	1.46
50	289.25	292.38	291.97	291.20	45.80	0.51	1.09	1.70
60	279.69	282.51	282.93	281.71	47.20	0.27	1.27	1.76
70	273.58	276.39	276.17	275.38	48.13	-0.03	1.45	1.56
80	270.75	273.20	272.71	272.22	48.59	-0.33	1.65	1.30
90	268.57	271.42	270.97	270.32	48.87	-0.73	1.84	1.53
100	267.52	270.80	268.83	269.05	49.06	-	2.04	1.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.30 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 600 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	589.45	588.42	588.32	588.73	0.00	1.64	-	0.63
5	432.35	434.16	434.32	433.61	20.41	1.38	0.24	1.09
10	375.70	377.65	376.60	376.65	27.91	1.21	0.36	0.98
15	347.54	349.23	347.71	348.16	31.65	1.10	0.47	0.93
20	325.72	327.06	325.25	326.01	34.57	0.98	0.58	0.94
25	312.61	314.69	312.75	313.35	36.23	0.90	0.69	1.16
30	299.39	301.74	300.97	300.70	37.90	0.80	0.79	1.20
40	287.39	289.16	287.57	288.04	39.57	0.66	1.01	0.97
50	277.65	279.85	278.12	278.54	40.81	0.52	1.23	1.16
60	268.73	270.57	267.85	269.05	42.06	0.32	1.43	1.39
70	261.25	263.90	263.01	262.72	42.90	0.10	1.63	1.35
80	255.36	257.42	256.39	256.39	43.73	-0.38	1.83	1.03
90	252.15	254.70	254.73	253.86	44.06	-1.08	2.04	1.48
100	252.25	254.57	252.87	253.23	44.15	-	2.27	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.31 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log(q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	707.25	712.47	712.56	710.76	0.00	1.80	-	3.04
5	548.76	551.34	549.90	550.00	30.92	1.50	0.16	1.29
10	475.37	478.77	479.41	477.85	44.79	1.25	0.22	2.17
15	442.16	445.69	446.97	444.94	51.12	1.06	0.29	2.49
20	421.85	424.17	424.24	423.42	55.26	0.86	0.36	1.36
25	415.97	418.44	416.86	417.09	56.48	0.78	0.44	1.25
30	408.48	411.72	412.08	410.76	57.69	0.69	0.52	1.98
40	401.56	404.42	403.50	403.16	59.15	0.53	0.68	1.46
50	396.18	399.77	398.35	398.10	60.13	0.39	0.83	1.81
60	389.37	392.15	393.79	391.77	61.34	0.09	0.98	2.23
70	385.56	388.99	389.36	387.97	62.07	-0.31	1.13	2.10
80	383.69	386.70	385.93	385.44	62.56	-	1.28	1.56
90	385.75	388.42	389.74	387.97	62.07	-0.31	1.45	2.03
100	385.72	387.32	387.09	386.71	62.32	-0.61	1.60	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.32 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	691.52	693.21	693.52	692.75	0.00	1.75	-	1.08
5	546.33	548.25	548.67	547.75	24.17	1.51	0.21	1.25
10	459.75	461.00	460.00	460.25	38.75	1.26	0.26	0.66
15	428.50	430.96	427.54	429.00	43.96	1.11	0.34	1.76
20	409.08	411.25	410.42	410.25	47.08	0.99	0.42	1.09
25	396.27	398.46	398.52	397.75	49.17	0.89	0.51	1.28
30	383.88	385.41	382.71	384.00	51.46	0.73	0.58	1.35
40	371.67	373.18	373.40	372.75	53.33	0.55	0.75	0.94
50	365.33	367.46	366.71	366.50	54.38	0.40	0.92	1.08
60	356.28	358.43	358.54	357.75	55.83	0.02	1.07	1.27
70	354.86	356.37	354.52	355.25	56.25	-0.20	1.24	0.98
80	353.76	355.51	352.73	354.00	56.46	-0.38	1.42	1.41
90	350.04	352.65	351.81	351.50	56.88	-	1.58	1.33
100	353.57	355.38	353.05	354.00	56.46	-0.38	1.77	1.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.33 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	713.63	713.31	715.96	714.30	0.00	1.73	-	1.45
5	543.88	545.64	544.52	544.68	22.38	1.50	0.22	0.89
10	451.27	453.75	451.82	452.28	35.96	1.25	0.28	1.30
15	413.35	415.65	413.90	414.30	41.55	1.08	0.36	1.20
20	387.42	389.80	389.75	388.99	45.27	0.92	0.44	1.36
25	375.27	377.16	376.56	376.33	47.13	0.81	0.53	0.97
30	362.65	364.45	363.91	363.67	48.99	0.67	0.61	0.92
40	350.48	352.63	349.92	351.01	50.86	0.45	0.79	1.43
50	343.94	345.28	344.82	344.68	51.79	0.27	0.97	0.68
60	337.07	339.74	338.24	338.35	52.72	-0.03	1.14	1.34
70	333.72	335.61	334.35	334.56	53.28	-0.43	1.31	0.96
80	331.26	333.86	330.97	332.03	53.65	-	1.49	1.59
90	333.18	335.84	334.66	334.56	53.28	-0.43	1.69	1.33
100	332.55	333.64	329.90	332.03	53.65	-	1.86	1.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.34 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	714.27	713.63	715.78	714.56	0.00	1.69	-	1.10
5	558.77	560.15	558.62	559.18	20.44	1.45	0.24	0.84
10	456.44	458.66	458.63	457.91	33.77	1.18	0.30	1.27
15	408.81	410.26	408.47	409.18	40.18	0.94	0.37	0.95
20	387.50	389.72	389.54	388.92	42.85	0.78	0.47	1.23
25	375.12	377.35	376.34	376.27	44.51	0.64	0.56	1.12
30	365.81	367.28	367.22	366.77	45.76	0.50	0.66	0.83
40	351.28	353.67	353.60	352.85	47.59	0.12	0.84	1.36
50	346.07	348.34	348.93	347.78	48.26	-0.18	1.04	1.51
60	343.48	345.68	344.70	344.62	48.68	-0.60	1.23	1.10
70	344.23	346.18	347.26	345.89	48.51	-0.38	1.44	1.54
80	344.10	346.25	347.32	345.89	48.51	-0.38	1.65	1.64
90	340.39	342.66	341.33	341.46	49.09	-	1.83	1.14
100	341.38	343.18	343.60	342.72	48.93	-	2.04	1.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.35 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 700 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	701.48	701.37	702.85	701.90	0.00	1.67	-	0.82
5	524.46	526.14	524.40	525.00	21.06	1.40	0.24	0.99
10	438.27	440.58	439.83	439.56	31.23	1.18	0.32	1.18
15	392.32	394.55	395.10	393.99	36.66	0.99	0.41	1.47
20	372.74	374.65	371.91	373.10	39.14	0.86	0.51	1.41
25	356.28	358.60	356.96	357.28	41.03	0.73	0.61	1.19
30	340.45	342.51	341.42	341.46	42.91	0.55	0.70	1.03
40	330.17	332.39	331.43	331.33	44.12	0.37	0.91	1.11
50	324.32	326.90	323.78	325.00	44.87	0.20	1.11	1.67
60	315.47	317.64	315.31	316.14	45.92	-0.28	1.31	1.30
70	315.42	317.21	315.79	316.14	45.92	-0.28	1.52	0.94
80	318.37	320.28	319.25	319.30	45.55	-0.04	1.76	0.96
90	312.88	314.48	313.47	313.61	46.23	-0.65	1.95	0.81
100	310.99	312.65	311.49	311.71	46.45	-	2.15	0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.36 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	798.14	798.57	796.66	797.79	0.00	1.73	-	1.00
5	653.48	655.62	655.72	654.94	23.81	1.48	0.21	1.27
10	589.08	591.95	588.97	590.00	34.63	1.29	0.29	1.69
15	556.45	558.62	557.52	557.53	40.04	1.15	0.37	1.09
20	539.78	541.60	540.57	540.65	42.86	1.05	0.47	0.91
25	524.87	526.77	523.54	525.06	45.45	0.94	0.55	1.62
30	511.18	513.62	511.44	512.08	47.62	0.81	0.63	1.34
40	498.36	500.15	498.76	499.09	49.78	0.64	0.80	0.94
50	491.66	493.12	493.02	492.60	50.87	0.51	0.98	0.82
60	485.48	487.70	485.12	486.10	51.95	0.34	1.16	1.40
70	478.05	480.58	480.20	479.61	53.03	0.03	1.32	1.36
80	474.78	476.61	475.74	475.71	53.68	-0.36	1.49	0.92
90	472.96	474.64	471.76	473.12	54.11	-	1.66	1.45
100	472.51	474.82	472.03	473.12	54.11	-	1.85	1.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.37 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	806.57	805.39	808.68	806.88	0.00	1.66	-	1.67
5	673.84	675.53	673.89	674.42	19.48	1.43	0.26	0.96
10	595.48	597.57	596.42	596.49	30.94	1.18	0.32	1.05
15	569.04	571.27	571.25	570.52	34.76	1.06	0.43	1.28
20	550.65	552.40	550.07	551.04	37.62	0.93	0.53	1.21
25	537.25	539.66	537.24	538.05	39.53	0.83	0.63	1.39
30	530.58	532.78	531.32	531.56	40.49	0.76	0.74	1.12
40	517.94	519.36	518.41	518.57	42.40	0.58	0.94	0.72
50	511.22	513.49	511.53	512.08	43.35	0.46	1.15	1.23
60	504.42	506.84	505.48	505.58	44.31	0.28	1.35	1.21
70	498.75	500.52	498.00	499.09	45.26	-0.02	1.55	1.29
80	495.13	497.02	497.32	496.49	45.65	-0.24	1.75	1.19
90	491.33	493.47	493.00	492.60	46.22	-	1.95	1.12
100	491.74	493.51	492.55	492.60	46.22	-	2.16	0.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.38 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	808.54	809.37	808.58	808.83	0.00	1.62	-	0.47
5	670.92	672.34	670.25	671.17	18.11	1.38	0.28	1.07
10	592.48	594.09	593.18	593.25	28.37	1.14	0.35	0.81
15	566.35	568.34	567.12	567.27	31.78	1.01	0.47	1.00
20	546.25	548.67	548.45	547.79	34.35	0.89	0.58	1.34
25	533.18	535.84	535.41	534.81	36.06	0.78	0.69	1.43
30	527.08	529.11	528.74	528.31	36.91	0.71	0.81	1.08
40	514.32	516.48	515.16	515.32	38.62	0.53	1.04	1.09
50	507.39	509.82	509.28	508.83	39.47	0.41	1.27	1.28
60	501.33	503.77	501.92	502.34	40.33	0.23	1.49	1.27
70	494.16	496.27	497.09	495.84	41.18	-0.07	1.70	1.51
80	492.27	494.83	492.65	493.25	41.52	-0.29	1.93	1.38
90	488.74	490.64	488.67	489.35	42.04	-	2.14	1.12
100	488.71	490.81	488.53	489.35	42.04	-	2.38	1.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.39 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log(q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	799.31	798.47	797.54	798.44	0.00	1.58	-	0.89
5	648.82	650.30	648.15	649.09	17.78	1.31	0.28	1.10
10	605.48	607.19	606.02	606.23	22.88	1.19	0.44	0.87
15	579.47	581.37	579.94	580.26	25.97	1.09	0.58	0.99
20	553.28	555.78	553.81	554.29	29.07	0.97	0.69	1.32
25	540.36	542.06	541.48	541.30	30.61	0.89	0.82	0.86
30	520.58	522.37	522.51	521.82	32.93	0.73	0.91	1.08
40	505.27	507.77	505.65	506.23	34.79	0.55	1.15	1.35
50	494.84	496.63	496.05	495.84	36.02	0.37	1.39	0.91
60	488.43	490.95	488.67	489.35	36.80	0.19	1.63	1.39
70	481.54	483.50	483.54	482.86	37.57	-0.11	1.86	1.14
80	479.22	481.17	480.39	480.26	37.88	-0.33	2.11	0.98
90	475.64	477.73	475.71	476.36	38.34	-	2.35	1.19
100	476.38	478.30	478.30	477.66	38.19	-0.81	2.62	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.40 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 800 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	799.42	800.12	800.07	799.87	0.00	1.56	-	0.39
5	657.68	658.32	658.93	658.31	15.39	1.31	0.32	0.63
10	611.88	613.39	613.31	612.86	20.33	1.20	0.49	0.85
15	579.67	581.75	579.75	580.39	23.86	1.08	0.63	1.18
20	553.36	555.72	554.18	554.42	26.68	0.97	0.75	1.20
25	533.58	535.40	535.84	534.94	28.80	0.86	0.87	1.20
30	511.60	513.94	513.04	512.86	31.20	0.68	0.96	1.18
40	493.74	495.27	495.03	494.68	33.17	0.45	1.21	0.82
50	481.57	483.38	484.02	482.99	34.44	0.19	1.45	1.27
60	469.85	471.10	469.05	470.00	35.86	-0.85	1.67	1.03
70	467.08	469.33	469.69	468.70	36.00	-	1.94	1.41
80	469.20	471.27	469.53	470.00	35.86	-0.85	2.23	1.11
90	471.38	473.56	472.86	472.60	35.57	-0.37	2.53	1.11
100	470.84	471.25	467.91	470.00	35.86	-0.85	2.79	1.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.41 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 6.8 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	896.48	895.62	895.03	895.71	0.00	1.62	-	0.73
5	767.06	769.37	768.89	768.44	18.72	1.35	0.27	1.22
10	715.56	717.73	716.18	716.49	26.36	1.17	0.38	1.12
15	689.58	691.82	690.16	690.52	30.18	1.04	0.50	1.16
20	670.27	672.83	670.02	671.04	33.04	0.91	0.61	1.56
25	657.18	659.50	657.47	658.05	34.95	0.80	0.72	1.26
30	650.49	652.72	651.47	651.56	35.91	0.73	0.84	1.12
40	642.75	644.38	644.18	643.77	37.05	0.62	1.08	0.89
50	637.57	639.22	638.92	638.57	37.82	0.54	1.32	0.88
60	631.17	633.49	631.58	632.08	38.77	0.39	1.55	1.24
70	624.55	626.44	625.75	625.58	39.72	0.18	1.76	0.96
80	618.37	620.82	618.08	619.09	40.68	-0.24	1.97	1.51
90	614.47	616.85	614.25	615.19	41.25	-	2.18	1.44
100	614.36	616.70	614.51	615.19	41.25	-	2.42	1.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.42 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 7.6 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	909.72	910.38	913.80	911.30	0.00	1.59	-	2.19
5	786.24	788.35	789.17	787.92	16.23	1.36	0.31	1.51
10	725.57	727.03	728.04	726.88	24.27	1.18	0.41	1.24
15	689.52	691.66	690.38	690.52	29.05	1.01	0.52	1.08
20	670.88	672.25	669.99	671.04	31.61	0.89	0.63	1.14
25	658.38	660.14	659.53	659.35	33.15	0.79	0.75	0.89
30	650.45	652.30	651.93	651.56	34.18	0.71	0.88	0.98
40	644.87	646.48	643.83	645.06	35.03	0.63	1.14	1.34
50	637.11	639.65	638.95	638.57	35.89	0.53	1.39	1.31
60	627.42	629.07	628.05	628.18	37.25	0.31	1.61	0.83
70	624.28	626.57	625.89	625.58	37.59	0.23	1.86	1.18
80	627.34	629.63	627.57	628.18	37.25	0.31	2.15	1.26
90	618.38	620.72	618.17	619.09	38.45	-0.07	2.34	1.42
100	611.65	613.54	612.61	612.60	39.30	-	2.54	0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.43 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 8.4 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	903.62	905.33	905.48	904.81	0.00	1.56	-	1.03
5	779.09	781.54	779.76	780.13	14.84	1.34	0.34	1.27
10	709.67	711.57	708.76	710.00	23.19	1.13	0.43	1.43
15	673.48	675.50	675.84	674.94	27.37	0.97	0.55	1.28
20	655.14	656.83	658.28	656.75	29.53	0.85	0.68	1.57
25	646.56	648.95	647.47	647.66	30.61	0.78	0.82	1.21
30	637.30	639.62	638.79	638.57	31.69	0.69	0.95	1.18
40	631.33	633.48	631.43	632.08	32.47	0.62	1.23	1.21
50	618.00	619.87	619.40	619.09	34.01	0.42	1.47	0.97
60	611.26	613.45	613.09	612.60	34.79	0.27	1.72	1.17
70	602.64	604.39	603.50	603.51	35.87	-0.11	1.95	0.88
80	605.75	607.38	605.17	606.10	35.56	0.03	2.25	1.15
90	598.48	600.54	599.81	599.61	36.33	-0.51	2.48	1.04
100	596.20	598.64	596.19	597.01	36.64	-	2.73	1.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.44 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 9.2 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	896.37	893.54	894.70	894.87	0.00	1.53	-	1.42
5	770.54	772.64	772.19	771.79	13.38	1.31	0.37	1.11
10	695.48	697.30	695.67	696.15	21.60	1.08	0.46	1.00
15	663.84	665.58	662.88	664.10	25.08	0.94	0.60	1.37
20	643.25	645.75	645.61	644.87	27.17	0.82	0.74	1.40
25	631.24	633.17	631.74	632.05	28.57	0.71	0.88	1.00
30	624.30	626.48	626.14	625.64	29.26	0.65	1.03	1.17
40	611.58	613.36	613.52	612.82	30.66	0.49	1.30	1.08
50	599.45	601.64	598.91	600.00	32.05	0.22	1.56	1.45
60	592.71	594.05	594.01	593.59	32.75	-0.01	1.83	0.76
70	592.58	594.45	593.74	593.59	32.75	-0.01	2.14	0.94
80	586.65	588.19	586.70	587.18	33.44	-0.55	2.39	0.88
90	584.34	586.57	586.79	585.90	33.58	-0.86	2.68	1.36
100	583.47	585.68	584.71	584.62	33.72	-	2.97	1.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.45 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 10.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตรที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 900 กรัม/ลูกบาศก์เมตรด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	$\log (q_e-q_t)$	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3					
0	899.15	898.64	896.36	898.05	0.00	1.50	-	1.49
5	793.35	795.70	793.43	794.16	10.39	1.32	0.48	1.33
10	710.18	712.50	710.44	711.04	18.70	1.10	0.53	1.27
15	669.35	671.84	671.15	670.78	22.73	0.94	0.66	1.29
20	643.28	645.57	645.58	644.81	25.32	0.79	0.79	1.33
25	632.84	634.75	631.77	633.12	26.49	0.69	0.94	1.51
30	624.36	626.18	625.42	625.32	27.27	0.62	1.10	0.91
40	611.54	613.48	612.00	612.34	28.57	0.46	1.40	1.01
50	604.77	606.67	606.08	605.84	29.22	0.34	1.71	0.97
60	591.30	593.80	593.48	592.86	30.52	-0.04	1.97	1.36
70	591.15	593.00	594.43	592.86	30.52	-0.04	2.29	1.64
80	585.52	587.96	585.60	586.36	31.17	-0.59	2.57	1.39
90	584.72	586.22	584.24	585.06	31.30	-0.89	2.88	1.03
100	582.42	584.65	584.24	583.77	31.43	-	3.18	1.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาไอโซเทอมของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C_0) (g/m^3)			เฉลี่ย	ความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือในสารละลาย (C) (g/m^3)			เฉลี่ย	q_e (g/kg)
ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3		
99.25	101.60	99.78	100.21	34.28	34.47	30.82	33.19	33.51
201.64	199.34	198.63	199.87	132.67	135.08	135.24	134.33	32.77
314.75	318.26	312.77	315.26	241.47	244.78	244.91	243.72	35.77
401.38	399.48	396.80	399.22	323.68	326.28	325.28	325.08	37.07
518.68	518.96	524.70	520.78	447.30	450.59	450.55	449.48	35.65
610.85	612.46	612.93	612.08	536.07	539.48	540.55	538.70	36.69
704.54	702.25	708.03	704.94	633.72	636.66	635.40	635.26	34.84
802.37	802.15	807.18	803.90	731.24	734.10	734.41	733.25	35.32
902.68	903.37	904.09	903.38	828.82	831.65	831.12	830.53	36.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอมของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

C/q (kg/m^3)	ln q	ln C	STD
0.99	1.53	1.52	1.64
4.10	1.52	2.13	1.51
6.81	1.55	2.39	2.36
8.77	1.57	2.51	1.81
12.61	1.55	2.65	2.64
14.68	1.56	2.73	1.72
18.23	1.54	2.80	2.19
20.76	1.55	2.87	2.30
22.80	1.56	2.92	1.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (Ea)

ตารางที่ ง.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 25 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
0	99.35	100.78	100.50	100.21	0.00	-	0.76
5	93.48	96.16	95.60	95.08	2.57	1.95	1.41
10	83.47	86.73	86.21	85.47	7.37	1.36	1.75
15	77.74	80.68	81.04	79.82	10.20	1.47	1.81
20	75.56	78.29	78.50	77.45	11.38	1.76	1.64
25	75.40	78.69	80.63	78.24	10.99	2.28	2.64
30	75.38	78.75	79.39	77.84	11.18	2.68	2.15
40	75.04	78.60	78.32	77.32	11.45	3.49	1.98
50	72.54	74.18	74.17	73.63	13.29	3.76	0.94
60	72.55	75.53	73.59	73.89	13.16	4.56	1.51
70	69.08	71.98	71.16	70.74	14.74	4.75	1.49
80	69.25	71.53	71.44	70.74	14.74	5.43	1.29
90	68.48	70.35	68.65	69.16	15.53	5.80	1.03
100	66.89	68.74	66.72	67.45	16.38	6.10	1.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
0	101.96	103.28	103.76	103.00	0.00	-	0.93
5	72.15	75.71	74.29	74.05	14.47	0.35	1.79
10	56.58	59.62	58.58	58.26	22.37	0.45	1.55
15	45.82	48.36	49.04	47.74	27.63	0.54	1.70
20	36.14	39.54	39.91	38.53	32.24	0.62	2.08
25	30.08	33.58	34.56	32.74	35.13	0.71	2.36
30	27.26	30.74	31.13	29.71	36.64	0.82	2.13
40	21.26	24.78	25.33	23.79	39.61	1.01	2.21
50	17.38	20.87	21.27	19.84	41.58	1.20	2.14
60	14.62	17.47	16.00	16.03	43.49	1.38	1.43
70	12.89	15.38	15.47	14.58	44.21	1.58	1.46
80	11.77	14.30	13.71	13.26	44.87	1.78	1.32
90	10.49	13.81	14.31	12.87	45.07	2.00	2.08
100	10.08	13.50	13.83	12.47	45.26	2.21	2.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
0	99.87	98.57	101.38	99.94	0.00	-	1.41
5	85.30	88.09	88.63	87.34	6.30	0.79	1.79
10	72.96	75.19	76.46	74.87	12.53	0.80	1.77
15	65.53	68.86	68.41	67.60	16.17	0.93	1.81
20	59.80	62.36	63.09	61.75	19.09	1.05	1.73
25	55.77	58.56	59.25	57.86	21.04	1.19	1.84
30	52.47	54.23	55.18	53.96	22.99	1.31	1.38
40	49.47	52.67	51.94	51.36	24.29	1.65	1.68
50	48.70	51.57	49.91	50.06	24.94	2.01	1.44
60	47.91	49.10	49.30	48.77	25.58	2.35	0.75
70	45.31	48.33	48.77	47.47	26.23	2.67	1.88
80	45.93	47.38	47.15	46.82	26.56	3.01	0.78
90	44.80	46.35	46.58	45.91	27.01	3.33	0.97
100	44.47	46.58	46.68	45.91	27.01	3.70	1.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส

t (min)	Concentration in solution (g/m^3)			เฉลี่ย	q_t (g/kg)	t/q	STD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
0	100.32	99.87	102.06	100.75	0.00	-	1.16
5	85.52	88.66	87.96	87.38	6.69	0.75	1.65
10	80.88	83.97	81.69	82.18	9.29	1.08	1.60
15	77.38	77.74	75.85	76.99	11.88	1.26	1.00
20	68.12	71.31	72.04	70.49	15.13	1.32	2.08
25	63.62	66.27	66.01	65.30	17.73	1.41	1.46
30	62.51	65.69	65.36	64.52	18.12	1.66	1.75
40	58.31	61.99	60.00	60.10	20.32	1.97	1.84
50	55.69	58.43	58.41	57.51	21.62	2.31	1.58
60	54.67	57.52	56.44	56.21	22.27	2.69	1.44
70	55.15	57.69	57.35	56.73	22.01	3.18	1.38
80	52.20	55.73	54.46	54.13	23.31	3.43	1.79
90	54.48	56.30	56.29	55.69	22.53	3.99	1.05
100	55.30	57.87	57.80	56.99	21.88	4.57	1.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH^0)

ตารางที่ จ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ด้วยดินเหนียวไฮโดรทัลไซท์สังเคราะห์ที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 25, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) (C_0)				ความเข้มข้นสีย้อมที่เหลือ (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) (C)				q_e (g/kg)	STD
	ครั้งที่			เฉลี่ย	ครั้งที่			เฉลี่ย		
	1	2	3		1	2	3			
298.15	99.60	98.89	98.81	99.10	25.34	26.54	27.32	26.40	36.35	0.72
308.15	100.30	99.63	100.70	100.21	33.00	34.10	32.47	33.19	33.51	0.69
318.15	100.63	100.87	101.74	101.08	36.85	37.57	37.60	37.34	31.87	0.50
328.15	99.98	100.32	101.95	100.75	40.38	41.40	39.33	40.37	30.19	1.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

การหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange Capacity)

ฉ.1 วิธีการหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange Capacity) [41]

A. การแลกเปลี่ยนไอออน

1. บันทึกน้ำหนักของหลอด centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างดิน 5.00 กรัม+หลอด centrifuge 50 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย NH_4Cl เข้มข้น 0.2 โมลาร์ จำนวน 30 มิลลิลิตร
4. ปิดฝาและผสมกันเป็นเวลา 5 นาที
5. นำไปหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายที่ได้ไปใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. เติมสารละลาย NH_4Cl เข้มข้น 0.2 โมลาร์ จำนวน 30 มิลลิลิตร
7. ทำให้ดินเกิดการแขวนลอยโดยใช้เครื่อง Vertex Stirrer
8. ทำซ้ำข้อ 4-6 อีก 2 ครั้ง
9. นำปริมาตรสารละลายที่อยู่ในขวดวัดปริมาตรไปวิเคราะห์หาค่าการแลกเปลี่ยน Na, K, Ca และ Mg

B. การล้าง NH_4^+ และ Cl^- ที่ไม่ได้จับกับตัวอย่างดิน

1. เติมน้ำปราศจากไอออน จำนวน 30 มิลลิลิตรลงไปในหลอดที่มีตัวอย่างดินอยู่
2. ทำให้ดินเกิดการแขวนลอยโดยใช้เครื่อง Vertex Stirrer
3. ปิดฝาและผสมกันเป็นเวลา 5 นาที
4. นำไปหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 15 นาที เทสารละลายทิ้ง

C. การแทนที่ NH_4^+ และ Cl^-

1. เติมสารละลาย KNO_3 เข้มข้น 0.2 โมลาร์ จำนวน 30 มิลลิลิตรลงในหลอด centrifuge
2. ปิดฝาผสมกันเป็นเวลา 5 นาที
3. นำไปหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายที่ได้ไปใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. นำปริมาตรสารละลายที่อยู่ในขวดวัดปริมาตรไปวิเคราะห์หาค่า NH_4^+ และ Cl^-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D. การคำนวณ

CEC ($cmol_{(+)}\ kg^{-1}$) = (mg $NH_4^+\ L^{-1}$ x 1L 10^{-3} mL x 1 meq 18.04 mg^{-1} x 100 mL) x (1/sample, g) x100 g

If 5.000 g of sample is used, CEC ($cmol_{(+)}\ kg^{-1}$) = 0.1108 x (mg $NH_4^+\ L^{-1}$)

AEC ($cmol_{(-)}\ kg^{-1}$) = (mg $Cl^-\ L^{-1}$ x 1L 10^{-3} mL x 1 meq 35.45 mg^{-1} x 100 mL) x (1/sample, g) x100 g

If 5.000 g of sample is used, AEC ($cmol_{(-)}\ kg^{-1}$) = 0.0564 x (mg $Cl^-\ L^{-1}$)

ตารางที่ ฉ.1 ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารละลาย NaCl เข้มข้น 0.01 โมลาร์ จำนวน 10 มิลลิลิตร

ครั้งที่	ปริมาตรเริ่มต้น	ปริมาตรสุดท้าย	ปริมาตรสุทธิ
1	0.00	12.50	12.70
2	12.50	25.30	12.80
3	25.30	38.05	12.75
เฉลี่ย			12.75

* หมายเหตุ ความเข้มข้นที่แน่นอนของ $AgNO_3$ คือ 0.0078 โมลาร์

ตารางที่ ฉ.2 ปริมาตรของสารละลาย $AgNO_3$ ที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นของ Cl^- ที่ 5 มิลลิลิตร

ครั้งที่	ปริมาตรเริ่มต้น	ปริมาตรสุดท้าย	ปริมาตรสุทธิ
1	0.00	8.40	8.40
2	8.60	17.20	8.60
3	17.20	25.70	8.50
เฉลี่ย			8.50

* หมายเหตุ ความเข้มข้นของ Cl^- คือ 0.0138 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

ข้อมูลและสภาวะในการหาองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องเอ็กซเรย์ ฟลูออเรสเซ็นต์

Printed by Eval on 04-Jun-2003 04:18:32
Sample :460603_001 hydrotalcite
Sample measured on 04-Jun-2003 02:56:24
Operator: user
Measuring Program: st-less-HS-Vac

Na2O	MgO	Al2O3	Cl	Compton	Rayleigh	Sum
1.9 KCps	28.4 KCps	7.0 KCps	5.8 KCps			
11.1 %	51.2 %	33.3 %	4.73 %	0.86	0.97	100.00 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลและสภาวะในการหาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องออโตซอร์บ

Quantachrome Corporation

Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report

Autosorb for Windows Version 1.19

Sample ID	hydrotalcite				
Description	adsorption 10, desorption 10				
Comments					
Sample Weight	0.0344 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	350.0 °C	Operator	0+
Cross-Sec Area	16.2 A°/molecule	Outgas Time	22.5 hrs	Analysis Time	606.4 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	07/31/2003
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	460730_2.RA
Station #	1	Batch Temp	77.40		

MULTIPIONT BET

P/Po	Volume [cc/g] STP	1/ (W ((Po/P)-1))
10092e-01	54.6773	1.643E+00
2.0119e-01	65.5892	3.072E+00
3.0179e-01	74.3526	4.651E+00
4.0088e-01	83.3796	6.421E+00

Area = 2.196E+02 m^2/g

Slope = 1.590E+01

Y-Intercept = -4.815E-02

Correlation Coefficient = 0.998724

C = -3.293E+02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฌ

ข้อมูลและสภาวะในการหาขนาดของรูพรุนโดยใช้เครื่องออโตซอ ร์บ

Quantachrome Corporation

Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report

Autosorb for Windows Version 1.19

Sample ID	hydrotalcite				
Description	adsorption 10, desorption 10				
Comments					
Sample Weight	0.0344 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	350.0 ^{0}C	Operator	0+
Cross-Sec Area	16.2 A^{0}/molecule	Outgas Time	22.5 hrs	Analysis Time	606.4 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	0	End of Run	07/31/2003
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	460730_2.RA
Station #	1	Batch Temp	77.40		

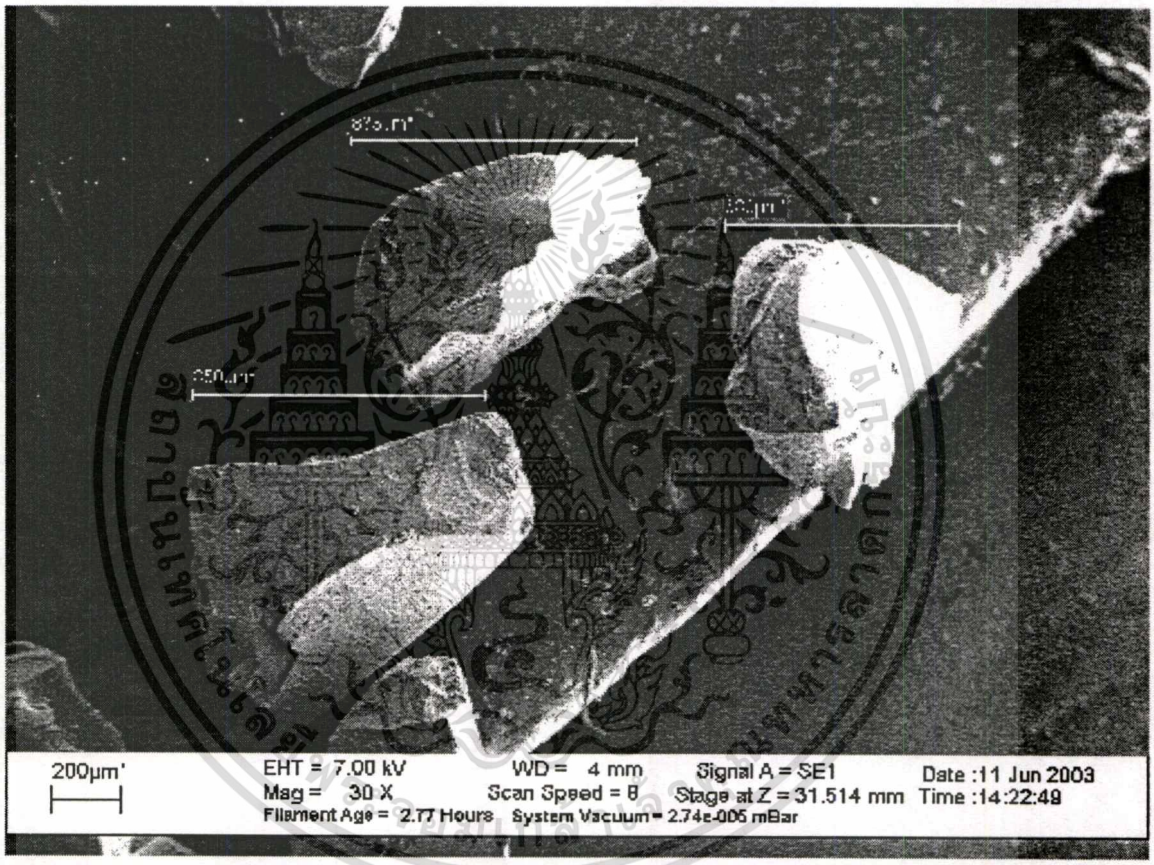
BJH DESORPTION PORE SIZE DISTRIBUTION

Diameter A^{0}	Pore Vol [cc/g]	Pore Surf Area [m^{2}/g]	Dv (d) [cc/A^{0}/g]	Ds (d) [m^{2}/A^{0}/g]	Dv (log d) [cc/g]	Ds (log d) [m^{2}/g]
18.02	2.913E-02	6.468E+01	5.878E-03	1.305E+01	2.423E-01	5.380E+02
23.13	5.337E-02	1.066E+02	4.603E-03	7.962E+00	2.441E-01	4.221E+02
28.93	8.127E-02	1.452E+02	4.401E-03	6.085E+00	2.919E-01	4.037E+02
36.21	1.111E-01	1.781E+02	3.627E-03	4.006E+00	3.011E-01	3.326E+02
46.24	1.511E-01	2.127E+02	3.381E-03	2.925E+00	3.580E-01	3.097E+02
61.29	1.843E-01	2.344E+02	1.818E-03	1.186E+00	2.546E-01	1.662E+02
88.33	2.221E-01	2.515E+02	1.053E-03	4.770E-01	2.113E-01	9.568E+01
156.40	3.044E-01	2.726E+02	8.212E-03	2.100E-01	2.853E-01	7.297E+01
1772.58	3.737E-01	2.741E+02	2.213E-03	4.994E-04	5.736E-02	1.294E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ญ

รูปและสภาวะในการหาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่องสแกนนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศานิต ไชยยะ เกิดวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จากมหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้