การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน

นางสาวสายรุ้ง นพขุนทด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM WASTEWATER BY SHALE

Sairoong Nopkhuntod

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.สุดจิต ครุจิต)

ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ดร.สมชาย ดารารัตน์)

กรรมการ

____

(ผศ. ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร)

กรรมการ

____

(อ. ดร.ฉัตรเพชร ยศพล)

กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สายรุ้ง นพขุนทด : การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน (REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM WASTEWATER BY SHALE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร, 235 หน้า.

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเข้มข้นของสีสูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงเพราะองค์ประกอบทางเคมีในสีย้อม การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยกระบวนการบำบัดทั่วไปจะทำได้ยาก ปัจจุบันมีความสนใจในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยกระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีราคาถูก จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี การศึกษาครั้งนี้ทำการคัดเลือกหินดินดานที่มีขนาดแตกต่างกัน A (1.00 < A < 2.00 มิลลิเมตร) B (0.50 < B < 1.00 มิลลิเมตร) C (0.25 < C < 0.50 มิลลิเมตร) D (0.18 < D < 0.25 มิลลิเมตร) และ E (0.15 < E < 0.18 มิลลิเมตร) เพื่อนำมาใช้เป็นสารดูดซับในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีพชนิด Remazol Deep Red RGB (Red) Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) และ Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) โดยทำการศึกษาการดูดซับโดยระบบกะเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม จากการศึกษาพบว่าข้อมูลการดูดซับที่สภาวะสมดุลสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.0114-0.0322 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red 0.4479-1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue และ 0.0133-0.0255 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ตามลำดับ และจากผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีค่าสูงสุดที่สภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ และที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นนำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาทดสอบกับตัวกลางหินดินดานในระบบคอลัมน์แบบ Fixed Bed เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของคอลัมน์หินดินดาน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และสีของคอลัมน์หินดินดานมีค่าเท่ากับร้อยละ 97 และ 90 ตามลำดับ และคอลัมน์หินดินดานเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ เพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูง และอายุการใช้งานนานเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี และน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนักศึกษา ____________________

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _______________

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ___________

SAIROONG NOPKHUNTOD : REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM WASTEWATER BY SHALE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JAREEYA YIMRATTANABOVORN, Ph.D., 235 PP.

SHALE/REACTIVE DYES/ADSORPTION/TEXTILE WASTEWATER

Colored textile effluents represent severe environmental problems as they contain mixture of chemicals, auxiliaries and dyestuffs of different classes and chemical constitutions. Elimination of dyes in the textile wastewater by conventional wastewater treatment methods is very difficult. At present, there is a growing interest in using inexpensive and potential materials for the adsorption of reactive dyes. Shale has been reported to be a potential media to remove color from wastewater because of its chemical characteristics. In this study, shale was used as an adsorbent. The chosen shale had particle sizes of : A (1.00 < A < 2.00 mm), B (0.50 < B < 1.00 mm), C (0.25 < C < 0.50 mm), D (0.18 < D < 0.25 mm) and E (0.15 < E < 0.18 mm). Reactive Remazol Deep Red RGB (Red), Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) and Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) were used as adsorbates. Batch adsorption experiments were performed to investigate the effect of contact time, pH, temperature and initial dye concentration. It was found that the equilibrium data were best described by the Langmuir isotherm model, with the maximum monolayer adsorption capacities of 0.0114-0.0322 mg/g for Red, 0.4479-1.1409 mg/g for Blue and 0.0133-0.0255 mg/g for Yellow, respectively. The maximum adsorption capacity of reactive dye by shale occurred at an initial pH of 2, initial concentration of 700 Pt-Co and temperature 45 ºC. Reactive dye adsorption capacities increased with an increase of the initial dye concentration and temperature whereas with a decrease of pH. The

fixed bed column experiments were applied with actual textile wastewater for estimation of life span. The results showed that COD and color removal efficiencies of shale fix bed column were 97% and 90%, respectively. Also the shale fixed bed columns were suitable for using with textile effluent from activated sludge system because of their COD and color removal efficiencies and life expectancy comparison using with dyebath wastewater and raw wastewater.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Environmental Engineering Student's Signature ________________

Academic Year 2011 Advisor's Signature ________________

Co-Advisor's Signature ______________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สมชาย ดารารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร และอาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่อนุเคราะห์หินดินดาน บริษัท ไดสตาร์ไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์ผงสีย้อม และโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี ที่อนุเคราะห์น้ำเสีย

ขอขอบพระคุณโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอกระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว ที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สายรุ้ง นพขุนทด

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.สมชาย ดารารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพน์ร่วม ที่กรุณาดูแลเอาใจใส่ และให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต ครุจิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วิจิตรเสถียร และอาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดียิ่ง และขอขอบพระคุณ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่อนุเคราะห์หินดินดาน บริษัท ไดสตาร์ไทย จำกัด ที่อนุเคราะห์ผงสีย้อม และ โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี ที่อนุเคราะห์น้ำเสีย

ขอขอบพระคุณโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอกระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัว ที่คอยห่วงใย ดูแล และให้กำลังใจเสมอมาจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สายรุ้ง นพขุนทด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฒ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ถ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและที่มา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตการศึกษา 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม 6
2.1.1 การเตรียมผ้า 6
2.1.2 การย้อมสี 8
2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ 8
2.2 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม 8
2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม 8
2.2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย 12
2.2.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม 13
2.3 การวัดความเข้มข้นสี 16
2.3.1 การวัดความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ 16
2.3.2 การวัดความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ 19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 สีย้อม 19
2.4.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม 20
2.4.2 การจำแนกสีย้อม 21
2.4.3 ความเป็นพิษของสีย้อม 26
2.5 สีย้อมรีแอคทีฟ 26
2.5.1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ 26
2.5.2 ประเภทขงสีย้อมรีแอคทีฟ 28
2.6 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม 29
2.6.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี 29
2.6.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน 31
2.6.3 กระบวนการเยื่อกรอง 36
2.6.4 ไฟฟ้าเคมี 37
2.6.5 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ 38
2.6.6 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ 40
2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม 41
2.8 การดูดซับ 43
2.8.1 ประเภทของการดูดซับ 43
2.8.2 กลไกการดูดซับ 44
2.8.3 ประเภทของสารดูดซับ 45
2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ 46
2.8.5 สมการไอโซเทอมการดูดซับ 50
2.9 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์ 55
2.9.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ
(Empty Bed Contract Time : EBCT) 58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.10 หินดินดาน (Shale) 58
2.10.1 แหล่งผลิตและปริมาณหินดินดานในประเทศไทย 59
2.10.2 การใช้ประโยชน์หินดินดาน 60
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 62
2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมของหินดินดาน 62
2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและปัจจัยการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 64
2.12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 68
3 วิธีดำเนินการวิจัย 71
3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย 71
3.2 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย 71
3.3 การจำแนกขนาดหินดินดาน 71
3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน 74
3.4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน 74
3.4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน 74
3.5 สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมของหินดินดาน 75
3.5.1 การเตรียมสีย้อม 75
3.5.2 การวัดความเข้มข้นของสี 76
3.6 ศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน 77

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน........................79
3.7.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดาน 79
3.7.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ
ของหินดินดาน 81
3.8 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน 82
3.8.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับ
ของหินดินดาน 82
3.8.2 การศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับ
ของหินดินดาน 84
3.8.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดาน 85
3.9 การศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟในชุดทดลองคอลัมน์..87
3.9.1 การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study) 87
3.9.2 ศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดาน 88
3.9.3 ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจาก
โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม 91
3.10 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง 92
3.11 การวิเคราะห์ข้อมูล..93
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล..94
4.1 ลักษณะสมบัติของหินดินดาน 94
4.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน 94
4.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน...97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน ... 98
4.2.1 ผลศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ... 98
4.2.2 ผลศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ... 100
4.2.3 ผลศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ... 101
4.2.4 สรุปผลศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน ... 102
4.3 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน ... 102
4.3.1 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ... 102
4.3.2 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ ... 110
4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน ... 118
4.4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น ... 118
4.4.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง ... 121
4.4.3 ผลของอุณหภูมิ ... 124
4.4.4 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ... 126
4.5 ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์ ... 127
4.5.1 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ... 127
4.5.2 สีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ... 132
4.5.3 สรุปผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์ ... 134

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสีย
จากโรงงานฟอกย้อม.. 135
4.6.1 น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี 136
4.6.2 น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 140
4.6.3 น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 143
4.6.4 สรุปผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสีย
จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม 147
4.7 การนำกระบวนการดูดซับของหินดินดานไปประยุกต์ใช้.................................. 148
5 สรุปผลการวิจัย.. 156
5.1 สรุปผลการวิจัย 156
รายการอ้างอิง.. 159
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. วิธีการวัดความเข้มข้นสีของน้ำ.. 174
ภาคผนวก ข. การศึกษาสารติดตาม.. 186
ภาคผนวก ค. ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 191
ภาคผนวก ง. ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับ
โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET 199
ภาคผนวก จ. การศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 202
ภาคผนวก ฉ. ความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดี
ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.. 214
ภาคผนวก ช. ผลการทดสอบทางสถิติประสิทธิภาพ
การกำจัดของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์.................................... 223
ภาคผนวก ซ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา 228
ประวัติผู้เขียน 235

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ภาระการปล่อยมลพิษจากกระบวนการผลิตผ้าคอทตอน 11
2.2 ความสามารถในการผนึกกับเส้นใยของสีย้อม 16
2.3 แหล่งกำเนิดและประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ 17
2.4 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน 23
2.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งด้วยวิธีต่าง ๆ 30
2.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกำจัดสีย้อม 33
2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม 42
2.8 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี 44
2.9 ส่วนประกอบทางเคมีของหินดินดาน 59
2.10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน 59
2.11 ปริมาณและมูลค่าการผลิตการใช้หินดินดานตั้งแต่ปี 2544-2550 60
2.12 ปัจจัยและผลของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 69
3.1 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของหนดินดานแต่ละขนาด 73
3.2 ขนาดของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 73
3.3 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติตัวอย่างของหินดินดาน 74
3.4 ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม 78
3.5 สภาวะในการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน แต่ละชุดการทดลอง 79
3.6 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 80
3.7 สภาวะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 81
3.8 สภาวะในการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 83

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.9 สภาวะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 84
3.10 สภาวะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 86
3.11 ผลการศึกษาสารติดตาม 88
3.12 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง 89
3.13 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์ 91
3.14 สภาวะในการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง 92
3.15 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง 92
4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของหินดินดาน 95
4.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน 96
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน 98
4.4 ปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาดที่ระยะเวลาสัมผัส 72 และ 120 ชั่วโมง 99
4.5 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานแต่ละขนาด Langmuir และ Freundlich 106
4.6 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานแต่ละขนาด Langmuir และ Freundlich 107

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.7 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด Langmuir และ Freundlich 108
4.8 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ 109
4.9 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 ของหินดินดานแต่ละขนาดแบบ Langmuir และ Freundlich 112
4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 ของหินดินดานแต่ละขนาดแบบ Langmuir และ Freundlich 114
4.11 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 ของหินดินดานแต่ละขนาดแบบ Langmuir และ Freundlich 115
4.12 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 ของหินดินดานแต่ละขนาดแบบ Langmuir และ Freundlich 116
4.13 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ 117
4.14 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาดในสภาวะปัจจัยต่าง ๆ 119
4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาดในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red 129
4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาดในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue 130
4.17 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาดขนาดในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow 132
4.18 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานขนาดขนาด E ในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดที่ 1 2 3 และ 4 134
4.19 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรีที่ใช้ในการศึกษา 136
4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของหินดินดาน 137
4.21 ลักษณะพื้นที่สำหรับระบบบำบัดโดยดิน 147

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.22 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดโดยดิน 150
4.23 สรุปค่าที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัย 155

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม 7
2.2 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ 10
2.3 โครงสร้างสีย้อม Reactive Black 5 27
2.4 กลไกการดูดติดบนอนุภาคของสารดูดซับ 43
2.5 กราฟไอโซเทอมแบบ Langmuir 51
2.6 กราฟไอโซเทอมแบบ Freundlich 52
2.7 กราฟสำหรับหาค่า C_s ของสมการไอโซเทอมแบบ BET 54
2.8 กราฟไอโซเทอมแบบ BET 55
2.9 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับ แบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow 56
3.1 ขั้นตอนการศึกษา 72
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม 75
3.3 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red 77
3.4 แผนผังการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 78
3.5 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 80
3.6 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 82
3.7 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 83
3.8 แผนผังการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 85
3.9 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง 86

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 กราฟความสัมพันธ์ของความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลา ในการศึกษาสารติดตาม 88
3.11 แผนภาพจำลองชุดคอลัมน์ 90
3.12 ชุดทดลองคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษา 90
4.1 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของอนุภาคหินดินดานด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 3000 เท่า 96
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน กับขนาดของหินดินดาน 97
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความสามารถในการดูดซับ สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานขนาด A B C D และ E 99
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความสามารถในการดูดซับ สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานขนาด A B C D และ E 100
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับความสามารถในการดูดซับ สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานขนาด A B C D และ E 101
4.6 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E 104
4.7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E 105
4.8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับสีย้อม ผสมรีแอคทีฟแต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E 110
4.9 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสีย้อม ผสมรีแอคทีฟแต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E 111
4.10 กราฟผลของความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีต่อการดูดซับ ของหินดินดาน A B C D และ E 120
4.11 กราฟผลของความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีต่อการดูดซับ ของหินดินดาน A B C D และ E 122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.12 กราฟผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดาน A B C D และ E 125
4.13 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E
ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red 128
4.14 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E
ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue 130
4.15 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E
ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow 131
4.16 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด E
ในการกำจัดสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดที่ 1 2 3 และ 4 133
4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี
ของหินดินดานแต่ละขนาด 138
4.18 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด
ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี 138
4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี
ของหินดินดานแต่ละขนาด 139
4.20 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด
ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี 140
4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ
ของหินดินดานแต่ละขนาด 141
4.22 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด
ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 141
4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ
ของหินดินดานแต่ละขนาด 142
4.24 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด
ในการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 143

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ของหินดินดานแต่ละขนาด 144
4.26 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด ในการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 145
4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ของหินดินดานแต่ละขนาด 146
4.28 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ 146
4.29 ระบบไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration System) 151
4.30 การออกแบบตัวอย่างระบบไหลซึมเร็วโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง 154

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
ADMI	=	American Dye Manufacturers Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
B	=	ค่าคงที่ของระบบ
BET	=	Brunauer Emmett and Teller
Blue	=	Remazol Brilliant RN gran
BOD	=	Biochemical Oxygen Demand
BV	=	ปริมาตรของสารดูดซับ
C_e	=	ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล
C_i	=	ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบ
C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ
C_s	=	ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ
CEC	=	Cation Exchange Capacity
COD	=	Chemical Oxygen Demand
d_n	=	ความหนาแน่นของหินดินดาน
d_w	=	ความหนาแน่นของน้ำ
EBCT	=	Empty Bed Contact Time
EPA	=	Environmental Protection Agency
FWS	=	Free Water Surface Flow Constructed Wetland
$g\ cm^{-3}$	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
H^+	=	ไฮโดรเจนไอออน
K	=	ค่าคงที่ของระบบ
K_f	=	ค่าคงที่ของระบบ
L	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
LECA	=	Light Expanded Clay Aggregate
LD_{50}	=	Median lethal dose
L_{MTZ}	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

m	=	ปริมาณสารดูดซับ
n	=	ค่าความหนาแน่นการดูดซับ
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
Q	=	อัตราการไหล
R^2	=	Correlation Coefficient
Red	=	Remazol Deep Red RGB
SEM	=	Scanning electron microscope
SF	=	Subsurface Flow Constructed Wetland
t_b	=	เวลาที่ใช้ในการบำบัดจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
ti	=	ระยะเวลาหนึ่ง ๆ ที่สารละลายออกจากระบบ
t_s	=	เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
TDS	=	Total Dissolved Solid
TSS	=	Total Suspended Solid
x	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวสารดูดซับ
X	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ
X_e	=	ปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล
X_m	=	ปริมาณสารถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ
V	=	ปริมาตรน้ำในระบบ
V_B	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู
V_T	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ
V_Z	=	ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ
VFCW	=	Vertical Flow Constructed Wetland
W	=	น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์
Yellow	=	Remazol Yellow 3RS 133% gran
Z	=	ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ
Z_s	=	ความยาวของชั้นการดูดซับ

บทที่1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ มากมาย โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้ทำเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลาย ซึ่งได้แก่ อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในกระบวนการฟอกย้อมเป็นปริมาณมาก น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีความเข้มข้นของสีสูง มีค่าความเป็นกรด-ด่างและมีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งสีย้อมที่ใช้กันโดยทั่วไปมักเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อนและส่วนมากจะเป็นสารที่มีพิษ เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะทำให้เกิดความน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็นทำให้เกิดการขัดขวางการส่องผ่านของแสงลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ ทำให้กระบวนการฟอกตัวเอง (natural self purification) ของแหล่งน้ำธรรมชาติเสียไป ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำ สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักถูกออกแบบเพื่อต่อต้านการจางของสีเมื่อสัมผัสกับเหงื่อ น้ำ และแสงแดด จึงทำให้สีย้อมมีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมสูง และเกิดการย่อยสลายได้ยาก (Nigam et al., 2000) นอกจากนี้สีย้อมยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์อีกด้วย ซึ่งจากการสำรวจสีย้อมจำนวน 4461 สี พบว่ามีเพียง 44 สีเท่านั้นที่มีค่า LD_{50} (Lethal dose) < 250 มิลลิกรัมต่อลิตร อีก 3669 สีมีค่า LD_{50} > 59 มิลลิกรัมต่อลิตร (Zollinger, 1991) ปกติสีย้อมทั่วไปจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์จะทำให้พิษของสีย้อมเพิ่มขึ้น สารบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สีย้อมมีความเป็นพิษสูงและบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dye) เป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม สีประเภทนี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีจึงบำบัดได้ยากโดยกระบวนการทางเคมี อีกทั้งสีย้อมรีแอคทีฟมีความคงทนในสภาวะแวดล้อมสูง และมีโครงสร้างพื้นฐานในกลุ่มของ Aromatic และ Heterocyclic (Lin and Lai, 1999) จึงยากที่จะบำบัดโดยระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ส่วนระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศสามารถลดความเข้มข้นของสีได้ดีกว่าระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศ

แต่จะให้ผลผลิตระหว่างทางของกระบวนการ ได้แก่ อะโรมาติกเอมีน (Aromatic Amines) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง

ปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายวิธี เช่น การโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี การออกซิเดชันด้วยโอโซน กระบวนการใช้เยื่อกรอง และกระบวนการทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิดที่ไม่ละลายน้ำได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ วิธีออกซิเดชันด้วยโอโซนและกระบวนการใช้เยื่อกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่มีต้นทุนค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสากรรมฟอกย้อมด้วยวิธีทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีต่ำ สำหรับน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟเป็นน้ำเสียที่ทำการบำบัดได้ยากกว่าน้ำเสียสีย้อมชนิดอื่น ๆ เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนทำให้ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลชีพ นอกจากนั้นสีย้อมรีแอคทีฟยังสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ยากต่อการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (วรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยระบบบำบัดแบบกายภาพ–เคมีมีความสามารถกำจัดสีได้ดี แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำ (Allegre et al., 2004) ส่วนระบบบำบัดทางชีวภาพมีสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำมาก (Allegre et al., 2004; Bes-Pia et al., 2002) ปัจจุบันจึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและสารอินทรีย์ไปพร้อมกัน ดังนั้นกระบวนการดูดซับจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุมและมีความทนทานต่อความเป็นพิษของสีย้อม (Karaca et al., 2008) อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี (รัตนา รุจิรวนิช, 2543) สารดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพงเพราะต้องผ่านกระบวนการในการกระตุ้น จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำสารดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้ในการดูดซับสี เช่น เถ้าลอยชานอ้อย (Rachakornkij et al., 2004) กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Gulnaz et al., 2006) และเศษผงเหล็ก (วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547) เป็นต้น

หินดินดาน (Shale) เป็นหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมี ซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา ดาวไธสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004) แหล่งหินดินดานในประเทศไทยพบมากในจังหวัดสระบุรี นครศรีธรรมราชและเพชรบุรี (มยุรี ปาลวงศ์, 2547) หินดินดานส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

นอกจากอุตสาหกรรม 2 ประเภทนี้แล้วหินดินดานยังถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานสิ่งแวดล้อมโดยใช้เป็นสารดูดซับ เนื่องจากหินดินดานมีความสามารถในกำจัดสารอินทรีย์ได้ จากการศึกษาของ Drizo et al. (1999) พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสได้ 650-700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากหินดินดานมีองค์ประกอบเป็นอลูมิเนียม ซิลิกอนและแมกนีเซียม ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสได้และได้มีการนำหินดินดานไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 40-75 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 45-75 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 98-100 นอกจากนี้ยังพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ และสามารถพัฒนาลำต้นใต้ดินและรากได้ดี (Drizo et al., 1997; 2000) จากการศึกษาของ Al-Qodah (2000) พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของเถ้าหินน้ำมัน (oil shale ash) ซึ่งเป็นหินดินดานชนิดหนึ่งมีค่าเท่ากับ 160 140 และ 100 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมชนิด (1) Drim yellow k4G (2) Drim blue-KBL และ(3) Drim red-K4BL ตามลำดับ มีการศึกษาพบว่าสารดูดซับที่มีองค์ประกอบของซิลิกอน และอลูมิเนียมสามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้ (Rao, B. V. V., and Rao, M. S., 2006; Albanis et al., 2000; เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์, 2544)

ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม การศึกษาครั้งนี้ได้นำหินดินดานที่มีอยู่ตามธรรมชาติในประเทศไทย มาศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของหินดินดาน ระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ และ Breakthrough curve เพื่อนำมาใช้เป็นสารดูดซับที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม และนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีอยู่แล้ว เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ใช้เป็นสารดูดซับในกระบวนการดูดซับหรือใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งทำให้มีความสามารถในการกำจัดสีย้อมและสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นหรือการนำไปใช้บำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาความสามารถในการดูดซับตัวอย่างสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Remazol Deep Red RGB (Red) (2) Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) และ (3) Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) ของหินดินดานที่มีขนาดแตกต่างกัน 5 ขนาด

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับตัวอย่างสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดาน ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ

1.2.3 ศึกษาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้หินดินดานในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้ในการศึกษามาจาก 3 จุด ได้แก่ (1) น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี (2) น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ และ (3) น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

1.3 ขอบเขตในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติขิงหินดินดาน และศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานซึ่งมีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของหินดินดานจากอำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี โดยได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ได้แก่ การจำแนกขนาด (Sieve Analysis) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) ค่าความหนาแน่น (Bulk Density) ค่าความพรุน (Porosity) ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และองค์ประกอบของแร่ธาตุ

1.3.2 ในการศึกษาใช้ตัวอย่างสีย้อมชนิดสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ซึ่งได้จากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี โดยสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง3 ชนิด จะมีโทนสีที่แตกต่างกัน คือ สีย้อม Red จะเป็นสีโทนสีแดง สีย้อม Blue จะเป็นสีโทนสีน้ำเงิน และสีย้อม Yellow จะเป็นสีโทนสีเหลือง

1.3.3 ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานที่มีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ 0.15-2.00 มิลลิเมตร

1.3.4 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.5 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.6 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด ได้แก่

1.3.6.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 100-700 แพลตินัมโคบอลต์ต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.6.2 ศึกษาผลของความเป็นกรด–ด่างตั้งแต่ 2.0-12.0 ต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.6.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 30-45 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.7 ศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

1.3.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดาน

1.3.9 ประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสีของหินดินดานแต่ละขนาดกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่ใช้ในการศึกษาสุ่มตัวอย่างมาจาก 3 จุด ได้แก่ (1) น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี (2) น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ (ก่อนเข้าถังเติมอากาศของระบบตะกอนเร่ง) และ (3) น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ (หลังผ่านถังตกตะกอนของระบบตะกอนเร่ง)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปใช้เป็นสารดูดซับที่มีราคาถูก โดยมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

1.4.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เช่น ใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้น หรือการนำไปใช้บำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนนำไปบำบัดด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

อุตสาหกรรมสิ่งทอประกอบด้วยอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่าง ๆ มากมาย โดยอุตสาหกรรมขั้นต้นในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้แก่ การผลิตเส้นใย อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปที่ยังเป็นวัตถุดิบ คือ เส้นด้ายหรือผ้าดิบ ให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือนำไปใช้ทำเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขั้นปลาย ซึ่งได้แก่ อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของเส้นใยด้วยสารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง กระบวนการฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ 3 กระบวนการ (ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์, 2546; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

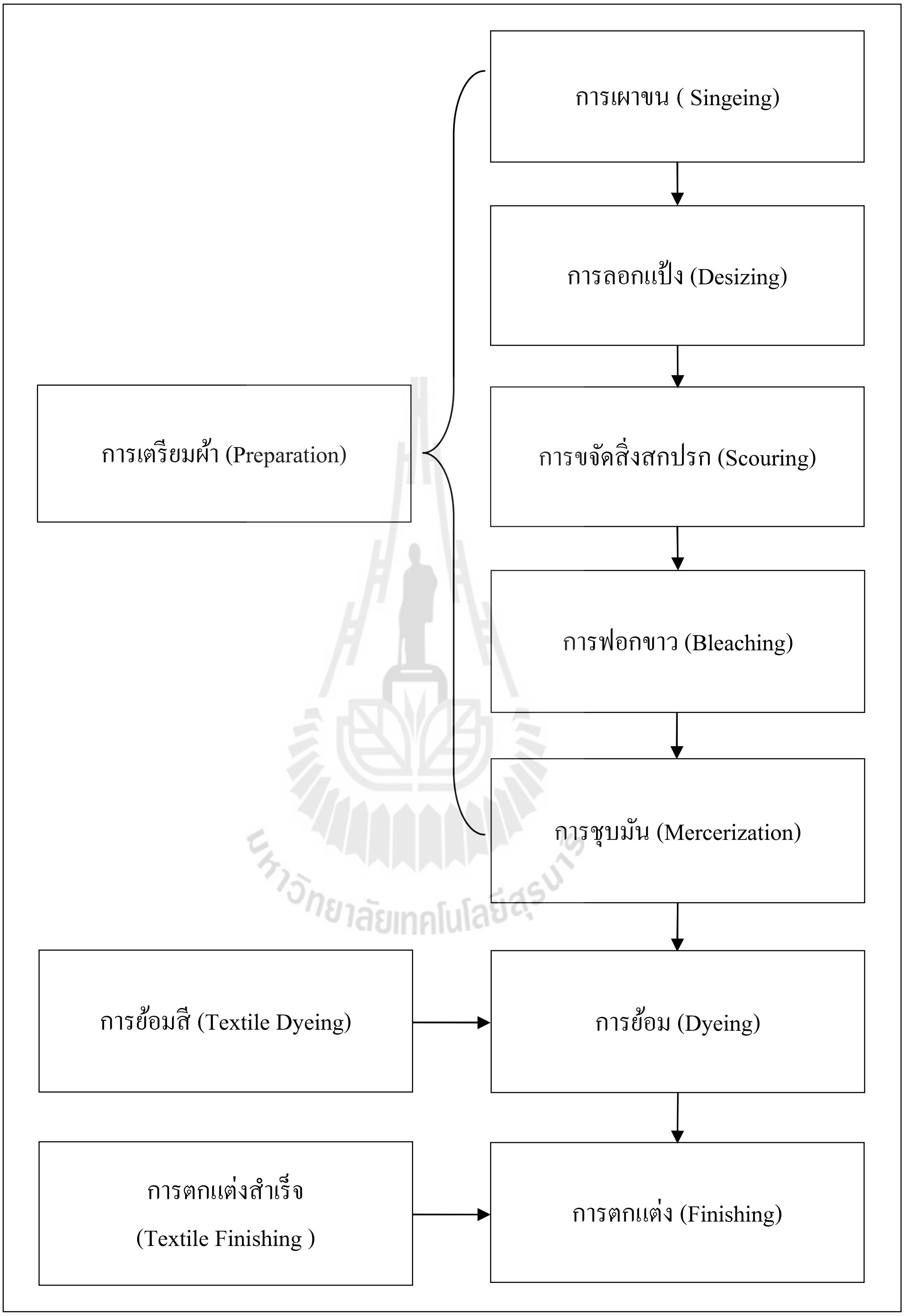
กระบวนการเตรียมผ้าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของสิ่งทอโดยขั้นตอนการเตรียมผ้าจะช่วยขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยสะอาดสามารถดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ ได้อย่างสม่ำเสมอ ช่วยให้การย้อมสีและการตกแต่งผ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการเตรียมผ้าแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1.1 การเผาขน (Singeing)

เป็นขั้นตอนการกำจัดปลายเส้นใยที่โผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายหรือผ้าผืนด้วยการใช้ความร้อนเผาทำลาย ส่วนมากกระทำกับผ้าผืนชนิดผ้าฝ้าย ผ้าใยผสมที่มีฝ้ายเป็นส่วนผสมและเส้นด้ายที่จะนำไปชุบมัน ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการเผาขนโดยใช้เปลวแก๊ส

2.1.1.2 การลอกแป้ง (Desizing)

การลงแป้งให้กับเส้นด้ายยืนเพื่อให้มีความแข็งแรงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทอแป้งที่เคลือบบนเส้นใยจะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำและสารเคมีของเส้นใย ดังนั้นก่อนนำผ้าที่ทอสำเร็จไปทำการฟอกย้อมจึงต้องทำการลอกแป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายออกให้หมด เพื่อให้ผ้าสามารถเปียกน้ำได้ดีและสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.1.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

เป็นการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่าง ๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากการขจัดสิ่งสกปรกจะทำให้เส้นใยสามารถดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีย้อมและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ

2.1.1.4 การฟอกขาว (Bleaching)

เป็นการกำจัดสารที่มีสีในธรรมชาติที่ติดมากับสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนการฟอกขาวนี้เป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อนเพื่อให้ได้สีที่สดใสและไม่ผิดไปจากสีย้อมที่ใช้

2.1.1.5 การชุบมัน (Mercerization)

เป็นขั้นตอนที่ช่วยกำจัดขี้ผึ้ง ไขมัน และแป้งที่เหลือจากการลอกแป้ง ทำให้เส้นใยพองตัว มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีขึ้น เพิ่มความเงามัน และความสามารถในการดูดติดสีย้อม

2.1.2 การย้อมสี (Dyeing)

การย้อมสีเป็นการใช้สารประกอบเคมีที่มีความสามารถละลายเป็นสารละลายหรือกระจายตัวอยู่ในสารละลายไปทำให้เกิดสีบนวัตถุที่ย้อมอย่างถาวร โดยทั่วไปสีย้อมจะอยู่ในรูปของสารละลายที่สามารถดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยด้วยแรงหรือพันธะทางเคมี รวมทั้งแรงดึงดูดทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และความสม่ำเสมอของสีย้อมได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาในการย้อม และสารช่วยย้อม

2.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนในการปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับสิ่งทอ เช่น ความเงามัน และความนุ่มของสิ่งทอ เป็นต้น

2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดจากเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม โดยคุณสมบัติและปริมาณของน้ำเสียจะแตกต่างกันตามปริมาณน้ำ และสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนของการฟอกย้อม ดังนี้

2.2.1 แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ที่สำคัญ 5 แหล่งด้วยกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) คือ

2.2.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในกระบวนการการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังกระบวนการผลิตน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม ซึ่งน้ำส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนที่ค่อนข้างสูง
2) น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม ซึ่งน้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย สีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการย้อม และชนิดของกระบวนการย้อม แหล่งกำเนิดและลักษณะของเสียจากขั้นตอนกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม และภาระการปล่อยมลพิษจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตผ้าคอทตอน (Cotton) แสดงดังรูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.1

2.2.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อมมักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลง และกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรงก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อมและถูกรวบรวมเป็นน้ำเสียที่สกปรกที่สุด

2.2.1.3 น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

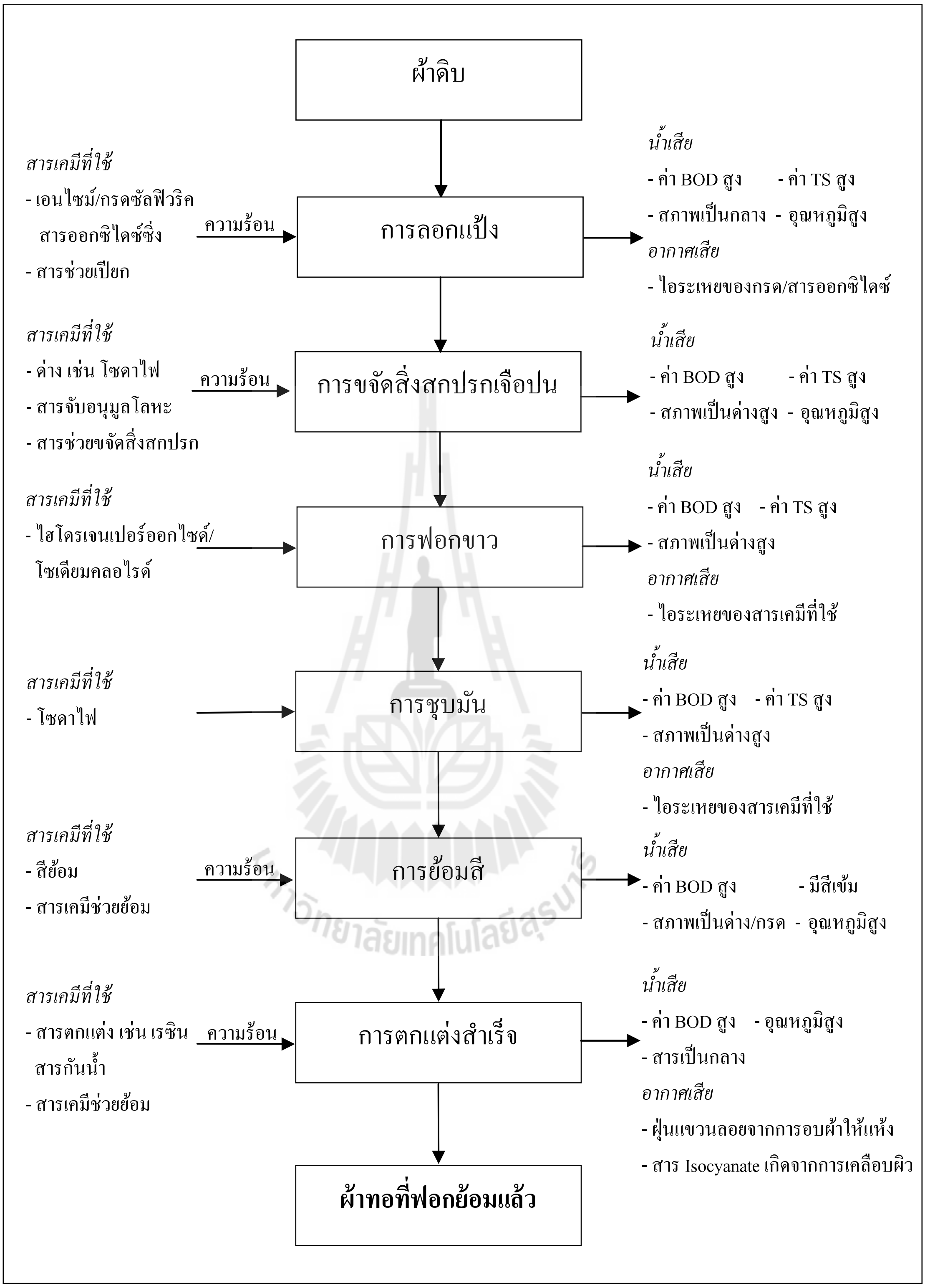
ในกระบวนการฟอกย้อมมีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจะทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม บางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม

2.2.1.5 น้ำที่ใช้จากแหล่งอื่น ๆ

นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ดังที่มากล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานอุตสาหกรรม ฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่น ๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงานหรือน้ำฝน เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดและลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ตารางที่ 2.1 ภาระการปล่อยมลพิษจากกระบวนการผลิตผ้าคอทตอน

ขั้นตอนการผลิต	pH	BOD	COD	TSS	TDS
		กิโลกรัมต่อ 1000 กิโลกรัมผ้าคอทตอน			
การลอกแป้ง					
- แป้งเอนไซม์	6.00-8.00	45.50	91.00	89.00	5.00
- แป้งกรด	6.00-8.00	45.50	91.00	89.50	7.50
- โพลีไวนิลแอลกอฮอล์	6.00-8.00	2.50	5.00	5.00	48.00
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	6.00-8.00	4.00	8.00	5.00	45.00
การขจัดสิ่งสกปรก					
- ผ้าที่ไม่ได้ชุบมัน	12.50	21.50	64.50	5.00	50.00
- ผ้าที่ชุบมัน	12.50	16.50	49.50	5.00	50.00
การฟอกขาว					
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	9.00-12.00	0.50	2.00	4.00	22.00
- โซเดียมไฮโปรคลอไรด์	9.00-12.00	1.00	4.00	4.00	5.00
การชุบมัน					
- ผ้าดิบ	12.00	13.00	39.00	5.00	148.00
- ผ้าที่ขจัดสิ่งสกปรก	12.00	4.00	12.00	5.00	148.00
- ผ้าที่ฟอกขาว	12.00	2.00	6.00	5.00	148.00
การย้อม					
- สีย้อมรีแอคทีฟ	12.00	6.00	24.00	-	180.00
- สีย้อมเบสิค	6.00-7.50	-	-	-	-
- สีย้อมไดเรกท์	6.50-7.60	-	-	-	-
- สีย้อมซัลเฟอร์	5.00-10.00	-	-	-	-
- สีย้อมแวต	8.00-10.00	-	-	-	-

หมายเหตุ : Barclay and Buckley (2000)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสีย

ในแต่ละขั้นตอนของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำและสารเคมีต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน น้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนจะกลายเป็นน้ำเสีย น้ำเสียที่ได้จะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.2.2.1 สีย้อม

ในขั้นตอนการย้อมสีเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย โดยปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2.2.2.2 สารเคมีที่ใช้ช่วยในการฟอกย้อม และสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมและการตกแต่งสำเร็จมีอยู่หลายประเภทสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

1) สารช่วยย้อม ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก สารช่วยเปียก และสารที่ช่วยในการย้อมให้สม่ำเสมอ
2) สารเคมีพื้นฐาน เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง
3) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา และสารกันไฟ

สารเคมีต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

2.2.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใยผ้า

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตก็ยังมีการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยืน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และหลุดออกมาในน้ำเสีย

2.2.2.4 เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีเศษใยผ้าที่หลุดออกมาซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสาร โอลิโกเมอร์ที่อาจจะหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนมากับน้ำเสียด้วย

2.2.2.5 สิ่งสกปรกอื่น ๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่น ๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปรอะเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบพวกคลอริเนตเตทเบนซีน และสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรเป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจมีผลอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสียในภายหลัง

2.2.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย สีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม และชนิดของกระบวนการย้อม โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีดังนี้ คือ

2.2.3.1 บีโอดี (BOD)

บีโอดีส่วนใหญ่จะเกิดจากขั้นตอนการลอกแป้ง ซึ่งหากเป็นแป้งธรรมชาติจะมีความสกปรกในน้ำเสียสูงมากเมื่อเทียบกับแป้งสังเคราะห์ ในส่วนของบีโอดีที่เกิดจากขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรก เช่น น้ำมัน ไขมันและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ออกจากเนื้อผ้า โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 50 ของบีโอดีทั้งหมดของกระบวนการฟอกย้อม ความสกปรกจากขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกนี้จะประกอบด้วยน้ำมันสังเคราะห์ กรดไขมัน เกลือบางตัว และสารที่ใช้ทำความสะอาด ส่วนบีโอดีที่เกิดจากขั้นตอนการฟอกขาวมีไม่มากนัก โดยทั่วไปมีน้อยกว่าร้อยละ 5 ของบีโอดีทั้งหมดของกระบวนการฟอกย้อม โดยวัสดุที่เป็นเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยผสมแทบจะไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการฟอกขาวเมื่อเทียบกับเส้นใยฝ้ายหรือขนสัตว์ ซึ่งจำเป็นต้องทำการฟอกขาวก่อนที่จะทำการย้อมสี ดังนั้นในส่วนของบีโอดีจากขั้นตอนการฟอกขาวจึงมีผลกระทบไม่มากนัก บีโอดีในส่วนที่เหลือนอกจากที่กล่าวมาข้างต้นจะมาจากขั้นตอนการย้อมสีและขั้นตอนการชุบมันซึ่งจะมีปริมาณบีโอดีน้อย ในส่วนของขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จจะมีน้ำเสียน้อยมาก ซึ่งจะมาจากน้ำหล่อเย็นและน้ำจากการซักล้างครั้งสุดท้าย (ประเสริฐ ตปนียางกูล, 2536) บีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตจะมีค่าแตกต่างกัน โดยในขั้นตอนการลอกแป้งมีค่าบีโอดีสูงที่สุดประมาณ 4.00-45.50 กิโลกรัมต่อ 1000 กิโลกรัมผ้าคอทตอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารลอกแป้งที่เลือกใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3.2 ซีโอดี (COD)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีค่าซีโอดีสูงอยู่ในช่วง 500-1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกิดจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย สบู่ ไขมัน และตัวทำละลายต่าง ๆ เป็นต้น (จารุทัศน์ มิลินทะเลข, 2537)

2.2.3.3 โลหะหนัก (Heavy Metal)

จากการสำรวจสีย้อมทั้งหมดพบว่าจะมีสารโลหะหนักเจือปนอยู่ ซึ่งสารโลหะหนักเหล่านั้นจะช่วยให้สีของสิ่งทอมีความสดใสขึ้น สารโลหะหนักเหล่านั้น ได้แก่ โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีสและเหล็ก เป็นต้น (Buckley, 1992; วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547) โดยโลหะหนักที่กล่าวมานี้พบในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำและส่วนใหญ่จะติดอยู่กับเนื้อผ้า แต่ยังมีสีย้อมบางตัวที่เจือปนมากับน้ำเสียหลังการย้อมร้อยละ 5-50 (Moussavi and Mahmoudi, 2009; Dizge et al., 2008; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ได้แก่ สีย้อมไดเรกท์ สีย้อมรีแอคทีฟ และสีย้อมดิสเพอร์ส เป็นต้น ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่ต้องระวังในการใช้สีย้อมที่มีโลหะหนักเหล่านี้ เพราะหากมีอยู่ในน้ำทิ้งในปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำหรือพืชน้ำ และท้ายที่สุดจะเข้ามาอยู่ในห่วงโซ่อาหารซึ่งมีผลกระทบต่อมนุษย์โดยตรงนั่นเอง การย้อมบางลักษณะต้องใช้สารออกซิไดซ์หรือสารรีดิวซ์ซึ่งทำให้สารเหล่านี้เจือปนมากับน้ำเสียหลังการย้อม โดยเฉพาะกับสีย้อมแวตและสีย้อมซัลเฟอร์ที่ต้องทำการออกซิไดซ์ด้วยไดโครเมต แต่ปัจจุบันอาจใช้สารอื่นแทน เช่น โบรเมตหรือเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น และการย้อมประเภทที่ต้องใช้ซิงค์ซัลฟอกซิเลตหรือฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมอาจมีโลหะหนักปนออกมาด้วยหากเลือกใช้สีย้อมที่มีคุณภาพต่ำ หรือสีย้อมที่มีปริมาณโลหะหนักเป็นส่วนผสมอยู่

สารลดความตึงผิวและสารอื่น ๆ ในกระบวนการฟอกย้อม เช่น อิมัลซิไฟเออร์ และสารช่วยกระจายตัวเป็นสิ่งจำเป็นในการผลิต แต่สารเคมีเหล่านี้มีความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำ

2.2.3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

คือความเป็นกรดหรือด่างของน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตหากสำรวจและวิเคราะห์โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะพบว่ามีการใช้สารเคมีที่มีความเป็นกรดและด่างเป็นปริมาณมาก ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ ได้แก่ กรดอะซิติก (CH_3COOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) กรดซัลฟูริค (H_2SO_4) เป็นต้น

หากทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมจะพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างจะแปรผันไปตามสภาพของโรงงานแต่ละโรงงาน (ประเสริฐ ตปนียางกูล, 2536) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.00-12.50 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3.5 อุณหภูมิ (Temperature)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีอุณหภูมิสูงประมาณ 50 องศาเซลเซียส (จารุทัศน์ มิลินทะเลข, 2537)

2.2.3.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีปริมาณแตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต เช่น ในขั้นตอนการลอกแป้งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 50-97 กิโลกรัมต่อ 1000 กิโลกรัมผ้าคอทตอน ส่วนในขั้นตอนการฟอกขาวมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณ 9-26 กิโลกรัมต่อ 1000 กิโลกรัมผ้าคอทตอน เป็นต้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมขึ้นอยู่กับชนิดของผ้า และสารเคมีที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของแต่ละกระบวนการผลิตแสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3.7 สี (Color)

ปริมาณสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใย ชนิดของกระบวนการย้อม ปริมาณสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อมและชนิดของสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อม โดยสีย้อมแต่ละชนิดมีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยแตกต่างกัน ทำให้ปริมาณสีในน้ำเสียมีปริมาณแตกต่างกัน โดยสีที่มีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยสูงจะมีปริมาณสีในน้ำเสียต่ำกว่าสีที่มีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยต่ำกว่า ความสามารถในการผนึกกับเส้นใยและปริมาณสีในน้ำเสียของสีย้อมแต่ละชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสีย้อมรีแอคทีฟมีความสามารถในการผนึกสีกับเส้นใยร้อยละ 50-80 และทำให้เกิดการปนเปื้อนของสีในน้ำเสียร้อยละ 10-50

มลสารในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะแตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต เนื่องจากมีการใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน มลสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการผนึกกับเส้นใยของสีย้อม

ชนิดของสีย้อม	ความสามารถในการผนึกของสีกับเส้นใย (ร้อยละ)	สีในน้ำเสีย (ร้อยละ)
สีย้อมไดเรกท์	70-95	5-30
สีย้อมซัลเฟอร์	60-70	30-40
สีย้อมแวต	80-95	5-20
สีย้อมเอโซอิก	90-95	5-10
สีย้อมรีแอคทีฟ	50-80	10-50
สีย้อมแอสิด	80-93	7-20
สีย้อมเมทัลคอมเพล็ก	95-98	2-5
สีย้อมเบสิค	97-98	2-3
สีย้อมดิสเพอร์ส	80-92	8-20

หมายเหตุ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542); Kyzas and Lazaridis (2009)

2.3 การวัดความเข้มข้นสี

หน่วยของสีที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายหน่วย เช่น หน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Platinum-Cobalt unit) และหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit) หน่วยโลวิบอนด์ (Lovibond unit) เป็นต้น แต่ที่นิยมใช้ ได้แก่ หน่วยแพลตินัมโคบอลต์และหน่วยเอดีเอ็มไอ ซึ่งจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.3.1 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Pt-Co)

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์เป็นการวัดสีของน้ำตัวอย่างเทียบกับสารละลายสีมาตรฐานซึ่งเตรียมจาก K_2PtCl_6 และ $CoCl_2.6H_2O$ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งสีของสารละลายมาตรฐานนี้มีสีเหลืองคล้ายกับสีของน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป โดยสารละลายมาตรฐาน 1 หน่วยสี (แพลตินัมโคบอลต์) หมายถึง ความเข้มข้นสีของสารละลายมาตรฐานแพลตินัมโคบอลต์ซึ่งมีความเข้มข้นของแพลตินัมเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของคลอโรแพลติเนตการวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์มักใช้ในการวัดสีของน้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ได้แก่ น้ำธรรมชาติและน้ำดื่ม วิธีนี้ไม่เหมาะที่จะใช้วัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีความเข้มข้นของสีสูง และเกิดจากสารอนินทรีย์ต่าง ๆ (APHA, AWWA, and WEF, 2005) แต่เนื่องจากเป็นหน่วยวัดสีที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้หน่วยวัดสีนี้ในการวัดคุณภาพน้ำ

ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดและประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา

มลสาร	ชนิดของสารเคมี	แหล่งกำเนิดมลพิษ	ผลกระทบที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา
ภาระบรรทุกสารอินทรีย์	- แป้ง - เอนไซม์ - ไขมัน - สารเคลือบสี - น้ำมัน - สารลดแรงตึงผิว - กรดอะซิติก	- การลอกแป้ง - การขจัดสิ่งสกปรก - การซักล้าง - การย้อมสี	- มีความต้องการออกซิเจนสูง - เกิดปัญหาตะกอนลอย
สารอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส	- เกลือแอมโมเนียม - ยูเรีย - สารซีเควสแทรนต์	- การย้อมสี	- ไม่สามารถกำจัดด้วยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน - เพิ่มความซับซ้อนและความไวต่อปฏิกิริยาของระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	- โซเดียมไฮดรอกไซด์ - กรดอินทรีย์ - โซเดียมคลอไรด์ - ซิลิเกต - คาร์บอเนต - ซัลเฟต - ไฮโดรซัลไฟด์ - ซัลไฟด์	- การลอกแป้ง - การฟอกขาว - การชุบมัน - การย้อมสี	- ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในถังหมัก
ซัลเฟอร์	- กรดซัลฟิวริค - เกลือ	- การย้อมสี	- เกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

หมายเหตุ : นิตยา ผาสุกพันธุ์ (2545); ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดและประเภทของมลสารหลักในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ และผลกระทบของสมบัติน้ำเสียต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา (ต่อ)

มลสาร	ชนิดของสารเคมี	แหล่งกำเนิดมลพิษ	ผลกระทบที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา
สารพิษ	- โลหะหนัก - สารรีดิวซ์ (ซัลไฟด์) - เกลือของเอมีน - สารกันจุลินทรีย์ - สารออกซิไดซิง (คลอไรด์ ไดโคเมท เปอร์ออกไซด์ เปอร์ซัลเฟต)	- การลอกแป้ง - การฟอกขาว - การย้อมสี - การตกแต่งสำเร็จ	- ยับยั้งความไวต่อปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในกลุ่มไนตริฟายเออร์ (Nitrifier) และเมทาโนเจน (Methanogen) ภายในถังหมัก
ซัลเฟอร์	- กรดซัลฟิวริค - เกลือ	- การย้อมสี	- เกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน
สี	- สีย้อม - น้ำล้างขนแกะ	- การย้อม - การขจัดสิ่งสกปรก	- กำจัดได้น้อยในถังหมัก
สารอินทรีย์ทนไฟ	- สารลดแรงตึงผิว - ตัวทำละลายอินทรีย์ - สารประกอบอินทรีย์ของคลอรีน - สีย้อม - เรซิ่น	- การลอกแป้ง - การขจัดสิ่งสกปรก - การฟอกขาว - การย้อมสี - การตกแต่งสำเร็จ	- กำจัดได้น้อยในถังหมัก - มีความเป็นไปได้ที่จะสะสมอยู่ในฟิล์มชีวภาพ

หมายเหตุ : นิตยา ผาสุกพันธุ์ (2545); ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546)

2.3.2 การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอถูกพัฒนาขึ้นในปี 1970 โดยสถาบันผู้ผลิตสีแห่งอเมริกา (American Dye Manufacturers Institute : ADMI) เพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของสีย้อมผ้าต่อสิ่งแวดล้อม โดยการวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอถูกพัฒนาขึ้น โดยมีบรรทัดฐาน 4 ข้อ คือ

1) สามารถใช้ได้กับทุกเฉดสี
2) สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของค่าสีที่มีปริมาณน้อย ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3) สัมพันธ์กับค่าวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์
4) เครื่องมือที่ใช้ราคาไม่สูงมากนัก

การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอจะทำการวัดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิสชัน (%Transmission) ของน้ำตัวอย่างทุก ๆ 10 นาโนเมตร โดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร หลักการที่ใช้วัดจะยึดตามสูตรของ Adams-Nickerson Chromatic Value คือ ถ้ามีสีอยู่ 2 สี คือ A และ B เมื่อมองด้วยตาเปล่าแล้วเห็นความแตกต่างของสีทั้งสองจากสภาวะไร้สีในระดับที่เท่ากัน ค่าสีทั้งสองสีนี้จะมีค่าเอดีเอ็มไอเท่ากัน การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยเอดีเอ็มไอสามารถวัดสีในน้ำที่มีความเข้มสีสูง ๆ ได้ เหมาะสำหรับใช้ในการวัดความเข้มข้นสีของน้ำเสียอุตสาหกรรม (APHA, AWWA and WEF, 2005) แต่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน รายละเอียดวิธีการวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ และหน่วยเอดีเอ็มไอแสดงในภาคผนวก ก.

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการวัดความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งเพื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยรายละเอียดวิธีการวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์และหน่วยเอดีเอ็มไอแสดงในภาคผนวก ก. และได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดสีแบบแพลตินัมโคบอลต์ เอดีเอ็มไอ และความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้สำหรับการแปลงหน่วยความเข้มข้นสี

2.4 สีย้อม

สีเป็นพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม กล่าวคือในปัจจุบันสีย้อมส่วนใหญ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความคงทนสูง ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้นจึงไม่สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพที่ใช้โดยทั่วไป ทำให้น้ำที่ผ่านออกจากระบบบำบัดดังกล่าวยังคงมีความเข้มสีที่ยังสูงอยู่ จึงจำเป็นที่

จะต้องพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีออกจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม (ปวีณา ธนะสังข์, 2539)

สีย้อม (Dye) คือ เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างมาเพื่อดูดกลืนหรือดูดซับแสงโดยการทำให้อยู่บนหรือในผิวหน้าของวัตถุเพื่อที่จะทำให้วัตถุนั้นมีสีขึ้นมา ซึ่งความทนทานจะมีต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของสีย้อม และพันธะในการยึดติดกับวัตถุนั้น ๆ (เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์, 2544; สกล ศิริรัตน์, 2546) การทำให้สีย้อมมีความคงทนและเพิ่มความสดใสของสีจึงมีการใช้สารโลหะหนักเข้ามาช่วย ได้แก่ แมงกานีส ทองแดง อาร์เซนิค แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว โคบอลต์ ปรอท และสังกะสี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงมีการปนเปื้อนของโลหะหนักและก่อให้เกิดปัญหาจากความเป็นพิษของโลหะหนัก (สุกานดา กาสังข์, 2548)

2.4.1 โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (สกล ศิริรัตน์, 2546; เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์, 2544; Buckly, 1992) ได้แก่

2.4.1.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye Chromophore Group)

องค์ประกอบของโมเลกุลส่วนนี้จะประกอบไปด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อม โดยเมื่อโมเลกุลของสีย้อมถูกแสงกระทบโครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมจะเกิดการสั่นเนื่องจากมีการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไป เป็นผลทำให้เกิดการเห็นสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์ของสีย้อมมีอยู่ประมาณ 20 กลุ่มด้วยกัน ตัวอย่างของโครโมฟอร์ ได้แก่

- N = N กลุ่มเอโซ (Azo Group)
- C = O หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group)
- NO_2 หมู่ไนโทร (Nitro Group)

2.4.1.2 หมู่ออโซโครมของสีย้อม (Auxochrom Group)

ออโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาที่อิ่มตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ โครงสร้างส่วนนี้มักจะเป็นวงเบนซีน (Benzene Aromatic) ที่มีหมู่อะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Group) ติดอยู่ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ออโซโครมยังมีคุณสมบัติการละลายน้ำและเป็นส่วนที่ก่อพันธะระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดการยึดติดของสีย้อมกับเส้นใย โดยการยึดติดโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใยอาจเป็นพันธะโควาเลนท์ พันธะไอออนิค แรงวันเดอร์วาลส์ หรือโดยการแทรกซึมของอนุภาคเข้าไปในส้นใย ตัวอย่างของออโซโครม ได้แก่

- COOH กลุ่มหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic Group)
- OH กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group)
- NH_2 กลุ่มเอมีน (Amino Group)

โครโมฟอร์และออโซโครมจะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ โดยทั้ง 3 ส่วนนี้รวมกันเรียกว่า โครโมเจน การรวมกันของพันธะคู่สลับกับโคโมฟอร์ทำให้เกิดสีขึ้น แต่ความเข้มและความสว่างของสีขึ้นอยู่กับออโซโครม

2.4.2 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกชนิดของสีย้อม (Dye Classification) มีด้วยกันหลายระบบ เช่น จำแนกตามแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมีภายในโครงสร้าง หรือจำแนกตามการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบดัชนีสี (Color Index) ที่แบ่งตามการใช้งาน (ลิลี่ โกศัยยานนท์, 2541) ได้ดังต่อไปนี้

2.4.2.1 สีย้อมแอซิด (Acid Dyes)

สีย้อมชนิดนี้รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Anionic Dyes โดยส่วนมากสีย้อมชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุลบ

2.4.2.2 สีย้อมเอโซ (Azo Dyes)

สีย้อมชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แนปทอล ซึ่งเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดจากการรวมตัวของสารประกอบ 2 ชนิด คือ (1) แนปทอล หรือ Coupling Component และ (2) เกลือไดเอโซเนียม (Diazonium) ที่ต่างก็ละลายน้ำได้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นที่ไม่ละลายน้ำ

2.4.2.3 สีย้อมเบสิค (Basic Dyes)

สีย้อมชนิดนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Cationic Dyes เนื่องจากสีย้อมชนิดนี้จะให้ประจุบวกเมื่อแตกตัวในน้ำ ลักษณะเด่นของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ เป็นสีย้อมที่มีความสว่างสดใสและมีความเข้มสูง แต่มีความทนต่อแสงต่ำ สามารถละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์ แต่ละลายน้ำได้ยาก

2.4.2.4 สีย้อมไดเรกท์ (Direct Dyes)

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย มีแรงยึดกับเส้นใยเซลลูโลส วิธีการย้อมทำได้ง่าย และต้องการสารช่วยย้อม คือ เกลือต่าง ๆ

2.4.2.5 สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dyes)

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถกระจายตัวในน้ำได้ การละลายของสีย้อมชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

2.4.2.6 สารสี (Pigments)

สารสีประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ยึดติดกับผิวเส้นใยโดยมีกาวโพลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม

2.4.2.7 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dye)

เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ ทำให้เกิดการสูญเสียสีย้อมบางส่วนไป

2.4.2.8 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes)

เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ โดยในสภาพปกติจะไม่ละลายน้ำ แต่สามารถใช้สารรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำในสภาวะด่างได้

2.4.2.9 สีย้อมแวต (Vat Dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ ในการย้อมต้องทำการรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปลิวโคที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นรูปที่ยึดเกาะกับเส้นใยได้ จากนั้นทำการออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายน้ำกลับคืนมา

สีย้อมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.4 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมแอซิด	- ประจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.0-5.0 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบ ที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส
สีย้อมรีแอคทีฟ	- ประจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสคอส	- พันธะโควาเลนท์	- แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใย
สีย้อมไดเรกท์	- ประจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายด่างอ่อน - เติมอิเลคโตรไลท์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส
สีย้อมเบสิค	- ประจุบวก - ละลายน้ำน้อย	- อะคริริค	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-6.0 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส
สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด	- ประจุลบ - ละลายน้ำได้น้อย - สีติดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.0-7.0 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ : อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539); เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544); สกล ศิริรัตน์ (2546)

ตารางที่ 2.4 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมดิสเพอร์ส	- ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี	- อะครีริค - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	- คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	- แช่เส้นใยในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-5.0 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105 องศาเซลเซียส
สีย้อมซัลเฟอร์	- เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์
สีย้อมแวต	- เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์

หมายเหตุ : อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539); เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544); สกล ศิริรัตน์ (2546)

ตารางที่ 2.4 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมเอโซอิก	- เป็นคอลลอยด์หลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น	- ฝ้าย -วิสคอส	- ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมในสารละลายด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็คโตรไลท์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก

หมายเหตุ : อภิชาติ หิรัญจิตต์ (2539); เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544); สกล ศิริรัตน์ (2546)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.3 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ทำให้สีย้อมมีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันมีสีย้อมและสารสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีอยู่ประมาณ 10000 ชนิด โดยสีย้อมที่มีโครงสร้างของหมู่เอโซถูกนำมาใช้ประมาณร้อยละ 60-70 ของสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Davies et al., 2006; Dos Santos et al., 2007; Moussavi and Mahmoudi, 2009) โดยสีย้อมในกลุ่มเอโซจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่ของไนโตรเจน (N = N) อย่างน้อย 1 กลุ่ม เชื่อมอยู่กับโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก (Davies et al., 2006; Osma et al., 2007; Sismanoglu et al., 2010) ซึ่งสีย้อมรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มโครโมฟอร์ชนิดเอโซ ได้แก่ Unmetallised azo และ Metal-complex azo โดยคิดเป็นร้อยละ 81 ของสีย้อมรีแอคทีฟทั้งหมด (บุษรา ประชุมญาติ, 2545) สีย้อมสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 3 ทางคือ (1) ทางการหายใจโดยการสูดดมสีย้อมที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ (2) ทางผิวหนังโดยการสัมผัสทางผิวหนัง และ (3) ทางการกินโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน โดยเมื่อสีย้อมสัมผัสถูกผิวหนังหรือตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง (Rai et al., 2005; Christie, 2007) และหากมนุษย์ได้รับสีย้อมเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ เนื่องจากสารประกอบบางตัวในสีย้อมมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็งเมื่อเข้าสู่ร่างกายสามารถทำให้เกิดโรคมะเร็งที่กระเพาะปัสสาวะ ลำไส้ และตับได้ (Myslak et al., 1991) ดังนั้นประเทศไทยจึงได้มีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3993 (พ.ศ. 2552) กำหนดห้ามใช้สีย้อมเอโซที่ก่อให้เกิดสารจำพวกอะโรมาติกเอมีนเกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.5 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่มีประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ดี และสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลส เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงจึงมีความคงทนต่อการซัก สีย้อมรีแอคทีฟนอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยเซลลูโลสได้แล้วยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียสีย้อมรีแอคทีฟบางส่วนไป (ลิลี่ โกศัยยานนท์, 2541)

2.5.1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ

กลุ่มเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้

S-D-T-X

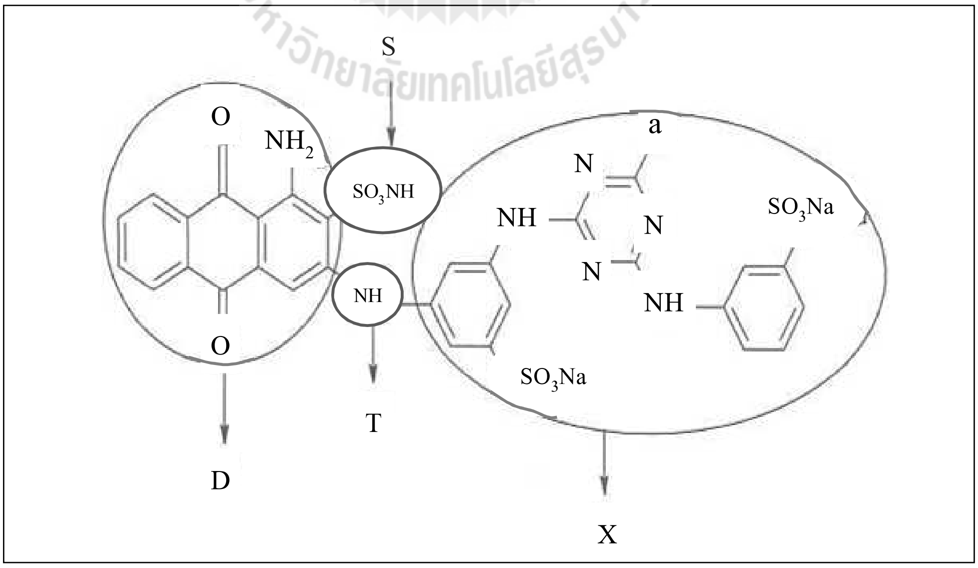
โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิก ($-SO_3Na$) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่า กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ (Bridging Group) เช่น กลุ่ม –NH- -NHCO- $-SO_2-$ และ $-NCH_3-$ เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจจะติดกับกลุ่มโครโมฟอร์โดยตรง โดยไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่เป็นเฮตเตอโรไซคลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic) ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของเฮตเตอโรไซคลิกอะโรมาติกมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่น ๆ ของสีย้อม จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญ คือ (1) กลุ่มที่ทำให้เกิดสี และ (2) กลุ่มรีแอคทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกันไป (ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์, 2546; วรรษวรรณ เที่ยงวรรณกานต์, 2546; วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547) ตัวอย่างโครงสร้างสีย้อมรีแอคทีฟ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 (วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547)

2.5.2 ประเภทของสีย้อมรีแอคทีฟ

การแบ่งประเภทสีย้อมรีแอคทีฟสามารถแบ่งตามลักษณะของตัวแปรที่ใช้ควบคุมการย้อมได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

2.5.2.1 สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ด่างเป็นตัวควบคุม

สีย้อมในกลุ่มนี้ต้องการอุณหภูมิในการย้อมประมาณ 40-60 องศาเซลเซียส สีย้อมกลุ่มนี้จะหลงเหลืออยู่ในน้ำหลังการย้อมในปริมาณน้อย สีย้อมเหล่านี้จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อมีการเติมด่าง แต่ถ้าเติมด่างจนค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 11.0 จะทำให้การดูดซึมของสีย้อมลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ในทางปฏิบัติจึงควรเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำที่สุด แต่มีค่าสูงพอที่จะทำให้ตัวสีทำปฏิกิริยาได้หมดพอดีเมื่อกระบวนการฟอกย้อมสิ้นสุด ตัวอย่างของสีย้อมในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีที่มีกลุ่มรีแอคทีฟพวก Dichlorotriazine Dichloroquino xaline และ Vinylsulphone เป็นต้น

2.5.2.2 สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้เกลือเป็นตัวควบคุม

สีย้อมในกลุ่มนี้ต้องการอุณหภูมิในการย้อมประมาณ 80 องศาเซลเซียสจนถึงน้ำเดือด สีย้อมกลุ่มนี้จะมีหลงเหลืออยู่ในน้ำหลังการย้อมในปริมาณมากในสภาวะที่เป็นกลาง ดังนั้นระดับเกลือที่เติมให้จึงมีความสำคัญมากต่อระดับการทำปฏิกิริยาของสีในการย้อม และสามารถใช้เป็นตัวควบคุมการย้อมสีได้ สีย้อมประเภทนี้มักมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาต่ำ ตัวอย่างของสีย้อมในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีย้อมที่มีกลุ่มรีแอคทีฟแบบ Trichloropyrumidine และ Aminochlorotriazine เป็นต้น ส่วนสีย้อม Aminochlo rotriazine มีลักษณะที่จัดอยู่ในสีย้อมประเภทนี้ แต่ในการย้อมสีกลุ่ม Aminochlo rotriazine มีประสิทธิภาพดีเมื่อย้อมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า โดยใช้กระบวนการย้อมแบบเท (Batchwise)

2.5.2.3 สีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุม

สีย้อมกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดในสภาวะที่ไม่มีด่าง แม้ว่าในการใช้งานจริงสามารถใช้สภาวะการย้อมเดียวกับสีในกลุ่มที่ใช้เกลือเป็นตัวควบคุมร่วมกับการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส สีย้อมประเภทนี้มีระดับการทำปฏิกิริยาของแต่ละสีด้วยตัวของมันเอง สารช่วยย้อมอื่น ๆ จึงไม่มีความจำเป็นเท่าใดนัก การย้อมให้ได้ผลดีทำได้โดยการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่านั้นก็พอ ตัวอย่างของสีย้อมในกลุ่มนี้ ได้แก่ สีย้อมในกลุ่ม Kayacelon React ซึ่งมีโครงสร้างกลุ่มรีแอคทีฟเป็น Bis (Aminochlorotriazine) เป็นองค์ประกอบ (นิตยา ผาสุกพันธุ์, 2545; ปิยะชน สันดุษฎี, 2545)

น้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟเป็นน้ำเสียที่ทำการบำบัดได้ยากกว่าน้ำเสียสีชนิดอื่น ๆ เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้ยากต่อการย่อยสลายโดย

จุลชีพและสีย้อมรีแอคทีฟยังสามารถละลายน้ำได้ดีทำให้ยากต่อการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี (วรรษวรรณ เที่ยงวรรณกานต์, 2546) นอกจากนี้การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโครโมฟอร์เป็นกลุ่มเอโซโดยระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศจะทำให้พันธะคู่ของไนโตรเจนแตกพันธะเกิดเป็นอะโรมาติกเอมีน (Aromatic Amines) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (Panswad and Luangdilok, 2000; Sen and Demirer, 2003; Gupta and Suhas, 2009)

2.6 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียแต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม และการเลือกใช้วิธีการกำจัดที่เหมาะสม (ตารางที่ 2.5) และข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกำจัด (ตารางที่ 2.6) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนการบำบัดทางชีวภาพหรือวิธีการบำบัดอื่น ๆ สารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอออนของอลูมิเนียม (Al^{3+}) แคลเซียม (Ca^{2+}) และเฟอร์ริค (Fe^{3+}) (Mishra and Bajpai, 2006; Yue et al., 2008) เป็นต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสารช่วยสร้างตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542; Lee et al., 2006) โดยหากค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมอาจไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยสร้างตะกอนมากเกินไป

นภา ศิวรังสรรค์ (2542) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารช่วยสร้างตะกอนชนิดโพลีเมอร์ประจุบวก 2 ชนิด ได้แก่ Lamfloc 1525 และ Zentrifloc 95 โดยใช้สารละลายสีย้อมสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ (1) สีย้อมแวต และ (2) สีย้อมรีแอคทีฟ ซึ่งมีโทนสีเหลือง และสีน้ำเงิน ในการศึกษาใช้โพลีเมอร์ประจุบวกที่เหมาะสมร่วมกับโพลิเมอร์ชนิดประจุลบ คือ Lamfloc 7985 และได้ทำการเปรียบเทียบกับการใช้สารส้มเป็นสารช่วยสร้างตะกอน จากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณที่เหมาะสมของ Lamfloc 1525 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีกว่า Zentrifloc 95 และการกำจัดสีจากน้ำทิ้งพบว่า Lamfloc 7985 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีเพียงเล็กน้อย และพบว่า Lamfloc 1525 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่าร้อยละ 90 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Dye Type	Solubility	Ozone	Activated Carbon	Biological	Physicochemical Biological	Coagulation by Alum	Sludge Adsorption
สีย้อมแอซิด	+	+	+	-	+	-	-
สีย้อมเบสิค	+	+	++	+	+	-	+
สีย้อมไดเรกท์	+	N	N	N	+	N	+
สีย้อมรีแอคทีฟ	+	++	+	-	+	-	-
สีย้อมแวต	-	+	-	-	+	+	N
สีย้อมซัลเฟอร์	-	+	-	-	+	+	N
สีย้อมดิสเพอร์ส	-	+	-	-	+	+	-

หมายเหตุ : ++ ให้ผลดีมาก + ให้ผลดี -ใช้ไม่ได้ N ไม่มีข้อมูล

สกล ศิริรัตน์ (2546); กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา (2548)

Hai et al. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมกลุ่มเอโซ ได้แก่ สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมแอซิด และสีย้อมเบสิคด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จากการศึกษาพบว่ากระบวนการตกตะกอนทางเคมีไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง และพบว่าการเกิดตะกอนของสีย้อมในกลุ่มเอโซโดยใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอนไม่สามารถทำได้ เนื่องจากสีย้อมในกลุ่มเอโซมีโมเลกุลขนาดเล็ก

Shi et al. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมไดเรกท์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยสารช่วยสร้างตะกอนที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al_{13}) และสีย้อมไดเรกท์ที่ใช้ ได้แก่ (1) Direct Black 19 (2) Direct Red 28 และ (3) Direct Blue 86 จากการศึกษาพบว่าอลูมิเนียมบริสุทธิ์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไดเรกท์ได้ดีกว่าอลูมิเนียมคลอไรด์ และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีย้อมไดเรกท์มีค่าเท่ากับ 6.0

El-Gohary and Tawfik (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมไดเรกท์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารช่วยสร้างตะกอนที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ (1) สารส้ม และ (2) ปูนขาว จากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีย้อมไดเรกท์ของสารส้มมีค่าเท่ากับเท่ากับ 6.0 และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีย้อมไดเรกท์ของปูนขาวมีค่าเท่ากับ 11.7 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างดังกล่าวประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมไดเรกท์คิดเป็นร้อยละ 90.00 และ78.90 ตามลำดับ สำหรับสารส้มและปูนขาวมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 58.60 และ 50.00 ตามลำดับ สำหรับสารส้มและปูนขาว

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีมีข้อดี คือ สามารถกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดี แต่ก็มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจากการบำบัด (Allegre et al., 2004)

2.6.2 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation and Reduction)

การออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสี สารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชัน-รีดักชันจะเลือกจากศักยภาพในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ทางเคมี ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถ ในการเกิดการออกซิเดชัน จากการศึกษาที่ผ่านมาสารที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ คลอรีน โอโซน และเฟนตันรีเอเจนต์ เป็นต้น

2.6.2.1 คลอริเนชัน (Chlorination)

การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนสามารถกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมแอซิด และสีย้อมไดเรกท์ แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้

(Namboodri et al., 1994a; 1994b) ถึงแม้ว่าการใช้คลอรีนในการบำบัดสีย้อมจะเป็นวิธีการที่มีราคาถูกแต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ (Banat et al., 1999)

2.6.2.2 โอโซนเนชัน (Ozonation)

การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากการที่โอโซนไปออกซิไดซ์พันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลของสีย้อม แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์ จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม แต่มีข้อดี คือ สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย

แสวง เกิดประทุม ชนากานต์ อาษาสุจริต และ อธิษฐาน ทิมแย้มประเสริฐ (2551) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียที่ได้จากขั้นตอนการย้อมด้วยสีย้อมรีแอคทีฟ จากการศึกษาพบว่าสามารถลดความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียจาก 1080 เอดีเอ็มไอ เหลือ 119 เอดีเอ็มไอ

Lin and Lui (1994) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการร่วมระหว่างการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนและกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้ระบบการไหลแบบต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนสามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์ในเวลาไม่เกิน 10 นาที ในขณะที่กระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียได้ไม่เกินร้อยละ 66

Sundrarajan et al. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซน จากการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟได้ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที โดยสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟได้ถึงร้อยละ 90 และสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 50

ตารางที่ 2.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกำจัดสีย้อม

กระบวนการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
การดูดซับด้วย ถ่านกัมมันต์	อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์ (2538); ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546); Kadirvelu et al. (2000); Allegre et al. (2004); Garg et al.(2004)	- ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูง - ประสิทธิภาพในการกำจัดสีชนิดต่าง ๆ สูง	- ถ่านกัมมันต์มีราคาสูง - เกิดการอุดตันจากสารแขวนลอย - ไม่เหมาะที่จะนำไปกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ - มีต้นทุนในการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์สูง
การโคแอกกูเลชัน ด้วยสารเคมี	Sheng and Wen (1994); Allegre et al. (2004); Mishra and Bajpai (2006); Hai et al. (2007); Yue et al. (2008)	- สามารถกำจัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดี - ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย และสีย้อมร้อยละ 90-98 - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์	- ทำให้เกิดกากตะกอนทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในกำจัดกากตะกอนจากการบำบัด - มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีและซีโอดีเพียงร้อยละ 20-50 - ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีสูง - ไม่สามารถใช้สารส้มกำจัดสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้
การย่อยสลาย ทางชีวภาพ เช่น ระบบตะกอนเร่ง	Bes-Pia et al. (2002); Allegre et al. (2004)	- ประสิทธิภาพการกำจัดสารที่ออกซิไดซ์ได้ร้อยละ 90	- ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำ - ในการเดินระบบจะเกิดปัญหาตะกอนไม่จมตัวบ่อย

ตารางที่ 2.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกำจัดสีย้อม (ต่อ)

กระบวนการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ปวีณา ธนะสังข์ (2539); Gregor (1993); Namboodri et al. (1994a; 1994b); Banat et al. (1999); Bes-Pia et al. (2002); Allegre et al. (2004); Shi et al. (2007); Sundrarajan et al. (2007)	- สามารถกำจัดสีย้อมได้ดี - ใช้พื้นที่บำบัดน้อย - ไม่มีกากตะกอน - สามารถกำจัดได้ทั้งสีย้อมที่ละลายน้ำ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมไดเรกท์ และสารสีได้ดี เมื่อใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ - เป็นวิธีที่มีราคาถูก เมื่อใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ - สามารถบำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้ เมื่อใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ - ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย เมื่อใช้โอโซน เป็นตัวออกซิไดซ์ - สามารถกำจัดได้ทั้งสีย้อมที่ละลายน้ำ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมไดเรกท์ และสารสีได้ดี เมื่อใช้เฟนตันรีเอเจนต์เป็นตัวออกซิไดซ์	- ต้นทุนค่าก่อสร้างสูง - มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง - ไม่สามารถกำจัด COD ได้ - สามารถกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สีย้อมแวต และสีย้อมดิสเพอร์สได้น้อย เมื่อใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ - ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ เมื่อใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์ - เกิดสารประกอบใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้น เมื่อใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ - สามารถกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ เช่น สีย้อม C.I. Vat Red (ร้อยละ 50) และสีย้อม C.I. Disperse Blue (ร้อยละ0.50) ได้น้อย

ตารางที่ 2.6 ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการกำจัดสีย้อม (ต่อ)

กระบวนการบำบัด	อ้างอิง	ข้อดี	ข้อเสีย
เทคโนโลยีเยื่อกรอง	ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546); Dhale and Mahajani (2000); Tang and Chen (2001); Petrinic et al. (2007); Qin et al. (2007)	- มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์สูง - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงถึง ร้อยละ 99.40-99.90	- การกำจัดกากตะกอนที่เหลือจากการแยก ออกจากน้ำเสีย - ต้นทุนค่าก่อสร้างสูง - อาจเกิดการอุดตัน - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ ร้อยละ 20.00-50.00
ไฟฟ้าเคมี	ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2546); ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์ (2546); อังคณา ปัญญาอ่อง และคณะ (2550); Allegre et al. (2004); Garg et al. (2004)	- ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่เป็นอันตราย - สามารถกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 80 - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง - ใช้สารเคมีน้อยหรืออาจไม่ใช้สารเคมี - สามารถปรับใช้ได้กับภาระมลพิษและ อัตราการไหลของน้ำเสียที่แตกต่างกัน	- ทำให้เกิดตะกอนเหล็กออกไซด์ - ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าสูง
พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	สำอาง หอมชื่น และ หอมชื่น เอกอำพน (2529); ประนัดดา เจริญราช (2548); U.S. EPA (2000)	- ต้นทุนค่าก่อสร้างต่ำ - ไม่ต้องการการดูแลมาก - ผลตอบแทนเชิงเศรษฐศาสตร์จากพืชที่เลือกใช้ - สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 85	- มีปัญหาการอุดตัน - ความเป็นพิษต่อพืชและจุลินทรีย์ - ความเป็นกรด-ด่าง

2.6.2.3 เฟนตันรีเอเจนต์ (Fenton's Reagent)

เฟนตันรีเอเจนต์เป็นสารเคมีที่เกิดจากการผสมกันระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) การกำจัดสีย้อมโดยเฟนตันรีเอเจนต์เกิดจากการที่เฟนตันรีเอเจนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เมื่อทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (OH·) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก (Meric et al., 2003; Wang, 2008)

Kim et al. (2004) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมดิสเพอร์ส และซีโอดีในน้ำเสียโดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ จากการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและซีโอดีได้ร้อยละ 92.00-95.80 และร้อยละ 70.00-80.30 ตามลำดับ และพบว่าสามารถกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส และซีโอดีร้อยละ 83.30-85.00 และร้อยละ 48.00-56.20 ตามลำดับ

การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันมีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดี แต่ก็มีข้อเสียคือ มีต้นทุนค่าก่อสร้างและการเดินระบบสูง (Allegre et al., 2004)

2.6.3 เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรองสามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้ (Cheremisinoff, 2002; Avlonitis et al., 2008) อีกทั้งสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสีและสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรอง เช่น ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) รีเวอสออสโมซิส (Reverse Osmosis) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการกำจัดสีย้อมโดยใช้เยื่อกรองนี้จะเป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเยื่อกรองในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อกรองไปได้ ซึ่งสามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น

Dhale and Mahajani (2000) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อมดิสเพอร์สด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน จากการศึกษาพบว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสีย้อมดิสเพอร์สได้ร้อยละ 98 และกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 97

Tang and Chen (2001) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Black 5 ด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน จากการศึกษาพบว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Black 5 ได้ร้อยละ 98

Petrinic et al. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ 4 ชนิดด้วยกระบวนการนาโนฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อกรองชนิด NET-50 และสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ (1) Reactive Orange 12 (2) Reactive Red 24 (3) Reactive Blue 19 และ (4) Reactive Black 5

ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถแยกสีย้อมและสารอิเล็กโตรไลต์ได้ร้อยละ 99.40-99.90 และ 63.00-73.00 ตามลำดับ

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการเยื่อกรอง มีข้อดี คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง (Qin et al., 2007) แต่ก็มีข้อเสีย คือ มีต้นทุนค่าก่อสร้างสูง ปัญหาการอุดตันและการกำจัดกากตะกอนที่เหลือจากการแยกออกจากน้ำเสีย (ณัฐพันธุ์ ศุภกา, 2546)

2.6.4 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical)

วิธีไฟฟ้าเคมีหรืออิเล็คโตรเคมิคัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีอีกวิธีหนึ่งแต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม เดิมทีการบำบัดด้วยวิธีนี้ถูกใช้เพื่อกำจัดโลหะหนัก ต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อในการนำมากำจัดบีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และสีในน้ำทิ้ง องค์ประกอบหลักของวิธีไฟฟ้าเคมี คือ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ขั้วไฟฟ้า (Electrode) อย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte Solution) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมีผ่านแผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าที่ขั้วบวก (Anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก เกิดการสึกกร่อนและละลายออกมาในรูปของเฟอร์รัสไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของเฟอร์รัสไอออนจะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (Cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน(H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออนซึ่งจะดูดติดและช่วยตกตะกอนของโลหะหนักสีย้อม หรือสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำเสีย

ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์ (2546) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟโทนสีต่าง ๆ 4 โทน ได้แก่ (1) สีดำ (2) สีน้ำเงิน (3) สีแดง และ (4) สีเหลือง โดยทำการศึกษาผลของปริมาณไอออนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนด และความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมทั้ง 4 โทน จากการศึกษาพบว่าปริมาณไอออนของเหล็กที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมโทนสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง เมื่อใช้ความเข้มข้นสี 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ในช่วง 120-187 177-186 95 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยเฉลี่ยร้อยละ 92.00 97.50 89.50 และ 87.50 ตามลำดับ สำหรับสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง

Ling (1994) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียฟอกย้อมด้วยวิธีอิเล็กโตรโฟลตเตชัน จากการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมดิสเพอร์ส และสีย้อมดิสเพอร์สผสมกับสีย้อมแวตได้มากกว่าร้อยละ 92 และสามารถกำจัดซีโอดีได้ร้อยละ 85

การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีข้อดี คือ มีความสามารถกำจัดสีได้มากกว่าร้อยละ 80 (ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์, 2546; อังคณา ปัญญาอ่อง และคณะ, 2550) แต่ก็มีข้อเสีย ได้แก่ ทำให้เกิดตะกอนเหล็กออกไซด์ (Allegre et al., 2004) และเสียค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าสูง (Garg et al., 2004)

2.6.5 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถกำจัดมลพิษที่หลากหลายจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมซึ่งประกอบด้วยโลหะหนัก เช่น ทองแดงและสังกะสี ของแข็งแขวนลอย สีย้อม สารอินทรีย์ และสารพิษบางชนิดได้ กลไกที่ใช้ในการกำจัดประกอบด้วยการดูดซับโดยตัวกลางการแลกเปลี่ยนไอออน การกรอง การตกตะกอนทางเคมีและการดูดซึมโดยพืชและการย่อยสลายโดยแบคทีเรียแบบใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ ดังนั้นระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

สำอาง หอมชื่น และกิตติ เอกอำพน (2529) ได้ศึกษาการการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืช 2 ชนิด ได้แก่ (1) ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) และ (2) กกกลม (*Scirpus macronotus*) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง คือ *ชุดแรก* เป็นชุดควบคุมซึ่งไม่ได้ปลูกผักตบชวาและกกกลม *ชุดที่ 2* เป็นชุดที่ปลูกผักตบชวา และ *ชุดที่ 3* เป็นชุดที่ปลูกกกกลม ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกผักตบชวาและกกกลม จากการศึกษาพบว่าผักตบชวาและกกกลมสามารถลดความเข้มข้นสีในน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษได้ โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกกกกลมมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นสีสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 34.60 และมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงกว่าผักตบชวาถึงประมาณ 3 เท่า

ประนัดดา เจริญราช (2548) ได้ศึกษาการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมไหม โดยในการศึกษาใช้หน่วยการทดลอง 3 แบบ คือ *แบบที่ 1* เป็นบ่อที่ไม่ปลูกพืชใช้เป็นชุดควบคุม *แบบที่ 2* เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกธูปฤาษี และ*แบบที่ 3* เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกกกกลม น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียที่ได้จากการย้อมไหม 6 สี ได้แก่ (1) สีแดงสด (2) สีแดง (3) สีเปลือกมังคุด (4) สีเขียวก้านมะลิ (5) สีน้ำเงิน (6) สีบานเย็น และ (7) สีเหลืองทอง จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการลดสีในน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าสูงกว่าบ่อควบคุม และพบว่ากกกลมมีประสิทธิภาพในการลดสีในน้ำเสียสูงกว่าธูปฤาษี โดยมีประสิทธิภาพในการลดสีร้อยละ 72.50

Davies et al. (2005) ได้ศึกษาการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม โดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว โดยตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ sandy-clay Soil และได้ทำการปลูกต้นอ้อในระบบด้วย จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 74 และ 64 ตามลำดับ

Davies et al. (2007) ได้ศึกษาการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ VFCW โดยได้ทำการศึกษาในชุดทดลอง 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมีระดับน้ำ (Flooding level) และอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบ (Pulse feed) ที่แตกต่างกัน โดยชุดทดลอง A B และ C มีค่า Flooding level เท่ากับร้อยละ 21 42 และ 21 ตามลำดับ และมีค่า Pulse feed เท่ากับ 13 13 และ 26 นาที ตามลำดับ โดยในการศึกษาใช้สีย้อมชนิด Acid Orange 7 จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แต่ละชุดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Acid Orange 7 ของชุดทดลอง A B และ C คิดเป็นร้อยละ 68 62 และ 32 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของ A B และ C คิดเป็นร้อยละ 69 61 และ 35 ตามลำดับ

Ojstrsek et al. (2007) ซึ่งได้ศึกษาการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 22 (2) Vat Red 13 และ (3) Reactive Black 5 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 2 แบบ คือ *แบบที่ 1* ใช้ตัวกลาง 3 ชนิด คือ (1) Tuf (ขนาด 9.00-12.00 มิลลิเมตร) (2) Sand (ขนาด 0.00-4.00 มิลลิเมตร) และ (3) Gravel (ขนาด 8.00-12.00 มิลลิเมตร) ส่วน*แบบที่ 2* ใช้ตัวกลาง 4 ชนิด คือ (1) Peat (2) Tuf (3) Sand และ (4) Gravel จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดสีได้ร้อยละ 70 ของน้ำเสียจากสีย้อมทั้ง 3 ชนิด และสามารถลดทีโอซีและซีโอดีได้ร้อยละ 88 ค่าความนำไฟฟ้าลดลงร้อยละ 60 ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 12.00 เหลือ 7.60 การบำบัดสีย้อมในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง ระยะเวลาในการบำบัด และองค์ประกอบทางเคมีของสีย้อม

Bulc and Ojstrsek (2008) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Black 5 (2) Vat Yellow 46 และ (3) Disperse Yellow 211 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยตัวกลางของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Tuf Sand และ Gravel จากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ได้มากกว่าร้อยละ 70 สามารถลดทีโอซี และซีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 45 ในการศึกษาได้ทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วย โดยจากการศึกษาพบว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถลดซีโอดี บีโอดี และทีโอซีได้เท่ากับร้อยละ 84 66 และ 89 ตามลำดับ

Ong et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดน้ำเสียสีย้อมชนิด Acid Orange 7 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลาง (up-flow constructed wetland) ในการศึกษาได้ทำการปลูกพืช 2 ชนิด ได้แก่ (1) ต้นอ้อ (*Phragmites communis*) และ (2) หน่อไม้น้ำ (*Manchurian wild rice*) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกพืชที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าในระบบที่ปลูกต้นอ้อมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Acid Orange 7 และซีโอดีเท่ากับร้อยละ 96 และ 82 ตามลำดับ ส่วนในระบบที่ปลูกหน่อไม้น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Acid Orange 7 และซีโอดีเท่ากับร้อยละ 96 และ 79 ตามลำดับ

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีข้อดี คือ ต้นทุนค่าก่อสร้างต่ำ ไม่ต้องการการดูแลมาก ผลตอบแทนเชิงเศรษฐศาสตร์จากพืชที่เลือกใช้ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ได้ร้อยละ 85 (ดวงรัตน์ อินทร, 2546) แต่ก็มีข้อเสีย ได้แก่ เกิดปัญหาการอุดตันและความเป็นพิษของสีย้อมต่อพืชและจุลินทรีย์ (U.S. EPA, 2000)

2.6.6 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Adsorption on active carbon powder)

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นเทคนิคการดูดซับสีไว้บนผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของราคาของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีราคาสูง ทำให้ไม่เป็นที่นิยม ปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาสารดูดซับชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้สารดูดซับทีมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ

ชนิตา เสมรัตน์ (2543) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ชานอ้อยและกะลามะพร้าว จากการศึกษาพบว่าถ่านที่ผลิตจากชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการลดสีประมาณร้อยละ 51-95 ส่วนถ่านที่ผลิตจากกะลามะพร้าวไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม เนื่องจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich พบว่าค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวมีค่าน้อยมากหรือเป็นค่าติดลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวไม่มีความสามารถเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการดูดซับสีย้อม

ชัชวาล สิงหกันต์ (2543) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟของหญ้าแขมปรับสภาพ จากการศึกษาพบว่าหญ้าแขมปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Basilen Red M-5B Basilen Red E-B และ Procion Red H-E7B ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ร้อยละ 99 98 และ 99 ตามลำดับ

Kadirvelu et al. (2000) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าว จากการศึกษาพบว่าขี้เลื่อยจากต้นมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีเท่ากับร้อยละ 95 และ 56 ตามลำดับ

Malik (2003) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 36 ของถ่านที่ผลิตจากขี้เลื่อยและแกลบ จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 36 เท่ากับ 183.80 และ 86.90 มิลลิกรัมต่อกรัม

Walker et al. (2003) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งได้แก่ dolomite ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันโดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Levafix Brilliant Red E-4BA จากการศึกษาพบว่า dolomite มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟคิดเป็นร้อยละ 40-90

Hameed et al. (2007) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่ จากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูเท่ากับ 454.20 มิลลิกรัมต่อกรัม

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีข้อดี คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และประสิทธิภาพในการกำจัดสีชนิดต่าง ๆ สูง (Garg et al., 2004) แต่มีข้อเสีย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์มีราคาสูง (ณัฐพันธุ์ ศุภกา, 2546; Garg et al., 2004) และปัญหาการอุดตันจากสารแขวนลอย (Allegre et al., 2004)

2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยสีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ มากมาย เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศของแหล่งน้ำและมนุษย์ โดยผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ผลของน้ำเสีย	ผลกระทบที่เกิดขึ้น
ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำลดลง	- สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน - ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถฟอกตัวเอง (Self Purification) - ทำให้เกิดกลิ่น - ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นเพื่อประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้
สารเคมีบางตัวอาจเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต	- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ - เกิดการสะสมในระบบนิเวศน์ (Bioaccumulation) หากสารนั้นเป็นเป็นสารที่ย่อยสลายตัวยาก - เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ในกรณีที่ได้รับสารโดยตรง หากบริโภคสัตว์น้ำที่ได้รับพิษเข้าไป และได้รับทางอ้อม
ค่าความเป็นด่าง	- น้ำเสียที่มีความเป็นด่างสูงหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตสามารถดำรงชีพอยู่ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกลาง
อุณหภูมิ	- เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ - ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง - เพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพวกจุลินทรีย์
ของแข็งที่ละลายน้ำ	- ของแข็งที่ละลายน้ำได้บางตัว จะทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเป็นโรคได้ - ทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจได้
สี	- ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ - ทำให้ปริมาณแสงที่จะผ่านลงสู่แหล่งน้ำมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง
โลหะหนัก	- ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเกิดโรค - โลหะหนักจะสะสมอยู่ในระบบนิเวศน์ - เป็นอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์
ของแข็งแขวนลอย	- เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ - สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินได้ - ทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

หมายเหตุ : ชนิตา เสมรัตน์ (2543); ปฏิเวธ ชินเชษฐ (2543); Sun et al. (2010)

2.8 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบของสารที่ถูกดูดซับออกจากสารละลายของเหลวโดยให้สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดูดซับได้ต่างกัน การดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อนของสารดูดซับ คุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ จำนวนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ และขนาดของรูพรุนที่ทำหน้าที่ดูดซับได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกสารดูดซับให้เหมาะกับสารที่ถูกดูดซับ สำหรับการดูดซับหรือการเคลื่อนย้ายสารของสารที่ถูกดูดซับมายังผิวของสารดูดซับเกิดขึ้น 2 ลักษณะ ได้แก่

1) การไม่ชอบของเหลวของตัวถูกละลาย (Hyophobic of solute)

ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำ สารที่ไม่ชอบน้ำ (Hyophobic) จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับสารดูดซับและดูดซับที่ผิวของสารดูดซับในที่สุด

2) ความชอบของสารที่ถูกดูดซับที่จะไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดซับ (High affinity of solute to solid)

2.8.1 ประเภทของการดูดซับ

ธรรมชาติของแรงระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและผิวของสารดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงยึดเหนี่ยวชนิดแวนเดอร์วาลส์จะเกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และถ้าแรงยึดเหนี่ยวเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับจะเรียกว่าการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

2.8.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวแบบแวนเดอร์วาลส์ เป็นการจับกันที่อ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนในการดูดซับประมาณ 20 กิโลจูลต่อโมลหรือน้อยกว่า เป็นกระบวนการคายความร้อนที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำ ไม่มีการแตกหักของพันธะและไม่ทำให้โครงสร้างของผิวของสารดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการดูดซับ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับทางกายภาพจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก การดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะทำให้เกิดการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถศึกษาได้ทั้งกระบวนการดูดซับและคายซับ (Desorption) การดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เฉพาะเจาะจง สารที่ถูกดูดซับสามารถที่จะเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลาย ๆ ชั้น (Multilayer)

2.8.1.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของสารดูดซับกับอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีพันธะเคมีเกิดขึ้นจึงเป็นการจับที่แข็งแรง เป็นการดูดซับที่มีค่าความร้อนในการดูดซับประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับแบบนี้เป็นแบบเฉพาะเจาะจงและดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ เนื่องจากการดูดซับโดยปฏิกิริยาทางเคมีจะไม่สามารถเกิดการคายซับได้ พบว่าสารประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ ซึ่งการดูดซับทางเคมีและกายภาพมีข้อแตกต่างกันหลายประการดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนในการดูดซับ	$\leq$ 20 (กิโลจูลต่อโมล)	$\geq$ 50 (กิโลจูลต่อโมล)
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ชั้นเดียว และ/หรือ หลายชั้น	ชั้นเดียว

หมายเหตุ : ธานี สิทธิไพโรจน์สกุล (2547); กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา (2548)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

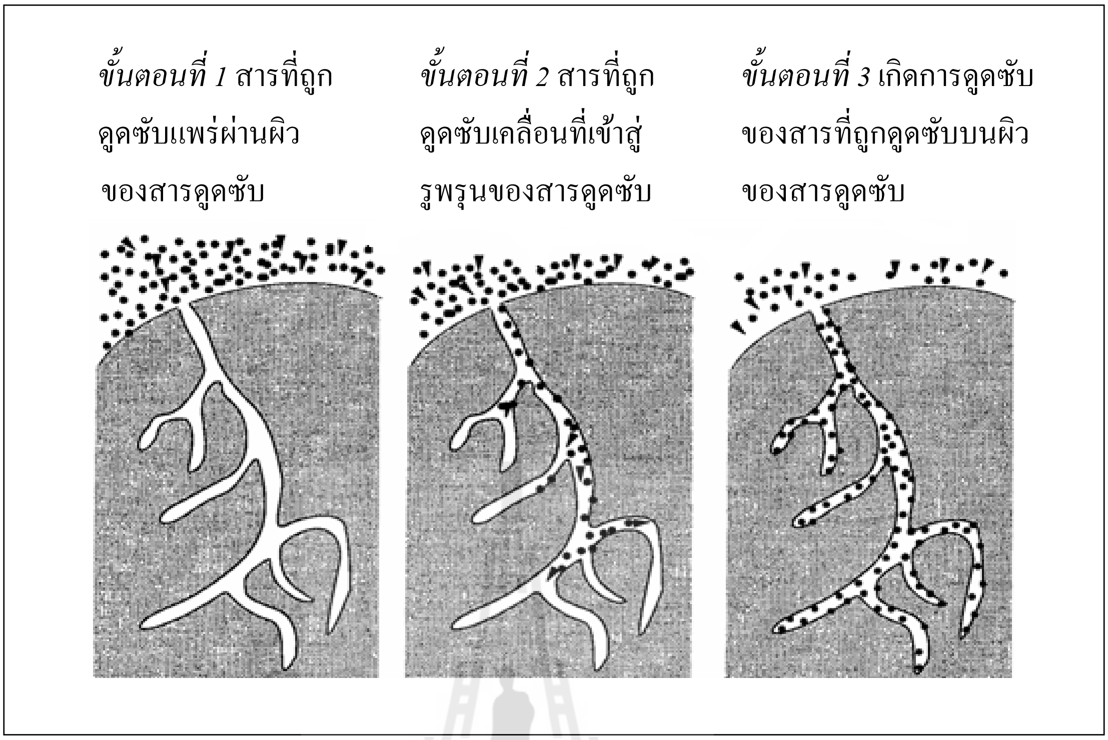
2.8.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.8.2.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเข้าหาสารดูดซับ

2.8.2.2 อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film Diffusion) ซึ่งตามปกติสารดูดซับจะมีฟิล์มบาง ๆ ของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายกับเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนหรือช่องว่างภายในของสารดูดซับ

2.8.2.3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับพื้นผิวภายในช่องว่างภายในของสารดูดซับ



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดติดของอนุภาคบนสารดูดซับ (กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, 2548)

2.8.3 ประเภทของสารดูดซับ

สารดูดซับ หมายถึง สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่าง ๆ มาติดผิวได้ (Adsorbent) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) มีหลายชนิดซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

2.8.3.1 ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone Char) และแอ็คติเว้ตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2.8.3.2 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.3.3 ถ่านกัมมันต์ คาร์บอนชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นสารดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้นอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำจะไปเกาะติดอยู่บนผิวของสารดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ในโพรงและบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ การถ่ายเทโมเลกุลสารจากน้ำไปยังสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุล ณ จุดสมดุล ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดซับมีดังต่อไปนี้

2.8.4.1 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับอาจขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับหรือการแพร่ผ่านรูพรุนซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเพราะไม่ถูกรบกวน และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงจะทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเข้าหาสารดูดซับเร็วกว่ากรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

Al-Qodah (2000) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของเถ้าหินน้ำมัน (shale oil ash) สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Drim yellow-k4G (2) Drim blue-KBL และ (3) Drim red-K4BL พบว่าความสามารถการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในการเขย่าเพิ่มขึ้นจาก 200-600 รอบต่อนาที

2.8.4.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของสารดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ โดยขนาดของสารดูดซับจะเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับอัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคือสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการเร็วในการดูดซับสูง ส่วนพื้นที่ผิวจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ ซึ่งหมายความว่าสารที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าสารที่มีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีหลายวิธี เช่น การกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือการใช้ความร้อน

Al-Qodah (2000) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของเถ้าหินน้ำมัน สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Drim yellow-k4G (2) Drim blue-KBL และ (3) Drim red-K4BL พบว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 100-300 ไมโครเมตร

El Qada et al. (2006) ได้ศึกษาการดูดซับเมทิลลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal) โดยได้ทำการคัดขนาดถ่านหินบิทูมินัสออกเป็น 4 ขนาด คือ (1) 250-500 (2) 180-250 (3) 106-180 และ (4) เล็กกว่า 106 ไมโครเมตร พบว่าเมื่อสารดูดซับมีขนาดเล็กลงความจุการดูดซับจะเพิ่มขึ้น โดยค่าความจุการดูดซับมีค่าเท่ากับ 253-325 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อตัวดูดซับมีขนาด 106-180 ไมโครเมตร และเล็กกว่า 106 ไมโครเมตร ตามลำดับ

2.8.4.3 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายของสารที่ถูกดูดซับด้วย โดยสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยสารดูดซับได้มากขึ้น แต่ในกรณีที่สารดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่ถูกดูดซับที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย

เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยในศึกษาใช้ได้ใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิดที่มีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน โดยเรียงลำดับตามขนาดของโมเลกุลจากเล็กไปหาใหญ่ได้ดังนี้ (1) Reactive Red 2 (2) Reactive Red 120 และ (3) Reactive Red 141 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อขนาดโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดใหญ่ขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Netpradit et al. (2004) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในกลุ่มเอโซโดยกระบวนการดูดซับด้วย metal hydroxide sludge โดยในการศึกษาใช้สีย้อมในกลุ่มเอโซ 3 ชนิดซึ่งมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกัน โดยเรียงลำดับตามขนาดของโมเลกุลจากเล็กไปหาใหญ่ได้ดังนี้ (1) Reactive Red 2 (2) Reactive Red 120 และ (3) Reactive Red 141 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อขนาดโมเลกุลของสีย้อมมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.8.4.4 ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของสารจะถูกดึงออกจากน้ำแล้วจึงไปเกาะติดอยู่บนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามเหตุผลนี้ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป เพราะยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่เกาะติดบนผิวของสารดูดซับ

ได้ยาก ดังนั้นจึงไม่อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

2.8.4.5 อุณหภูมิของระบบ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีเร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่สารที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของสารดูดซับได้มากขึ้น

เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 2 (2) Reactive Red 120 และ (3) Reactive Red 141 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 30-60 องศาเซลเซียส

Al-Qodah (2000) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของเถ้าหินน้ำมัน โดยสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Drim yellow-k4G (2) Drim blue-KBLและ (3) Drim red-K4BL พบว่าความสามารถการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 20-45 องศาเซลเซียส

Gulnaz et al. (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของ Dried Activated Sludge โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Black 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 20 35 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความจุการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 74.00 62.00 และ 47.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.8.4.6 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและสารดูดซับมีตำแหน่งดูดซับ ที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการแย่งกันจับกับตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่จะให้ผลในทางตรงกันข้ามเมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณ

ของไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มมากขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับกับตำแหน่งการดูดซับของสารดูดซับ และในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลในทางตรงกันข้ามกับที่ได้กล่าวมา

สกล ศิริรัตน์ (2546) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิค 2 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 141 และ (2) Basic Red 14 ด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซานเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบธรรมดา พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0 7.0 และ 9.0 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าลดลงเท่ากับ 5.0 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 1.18 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7.0 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.0 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 0.88 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7.0

Rao, B. V. V., and Rao, M. S (2006) ได้ใช้เถ้าลอยในการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูและคองโกเรดเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อใช้สารดูดซับชนิดเถ้าลอยประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 25.50 และ 43.80 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 3.00 และ 10.20 ตามลำดับ สำหรับสีย้อมคองโกเรด และประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมีค่าเท่ากับร้อยละ 29 และ 40 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 3.00 และ 10.20 ตามลำดับ สำหรับสีย้อมเมทิลลีนบลู

Reddy et al. (2006) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Procion Brilliant Blue M-R (2) Procion Brilliant Red H-8G และ (3) Procion Turquoise Blue M-G ด้วยถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนน้ำเสีย และถ่านกัมมันต์ที่มีขายในท้องตลาด พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลง มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มมากขึ้นโดยความสามารถในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.20 มิลลิกรัมต่อกรัมเป็น 11.30 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลงจาก 11.0 เป็น 3.0 สำหรับถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนน้ำเสีย และความสามารถในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.28 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 11.88 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลงจาก 11.0 เป็น 3.0 สำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีขายในท้องตลาด

2.8.4.7 ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งถึงเวลาที่ระบบเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นเวลาที่อัตราการดูดซับ (Rate of Adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Rate of Desorption) ความสามารถในการดูดซับจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นจะมีค่าคงที่เมื่อเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้น

Rao, B. V. V., and Rao, M. S (2006) ได้ใช้เถ้าลอยในการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลูและคองโกเรดเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 15-60 นาที

Leechart et al. (2009) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Red 141 จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจาก 0-24 ชั่วโมง

2.8.4.8 ตัวทำละลาย

อิทธิพลของตัวทำละลายมีผลต่อการดูดซับ อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก

1) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวถูกละลายในสารละลาย
2) แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับตัวดูดซับ ซึ่งเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของตัวทำละลายและตัวดูดซับ
3) แรงกระทำระหว่างตัวถูกละลายกับผิวของตัวดูดซับ

2.8.5 สมการไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับในรูปสมการเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ใด ๆ สำหรับไอโซเทอมของการดูดซับในรูปสมการทั่วไปมีอยู่หลายสมการ เช่น สมการแบบ Langmuir สมการแบบ Freudlich หรือสมการแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) แต่สมการแบบ Langmuir และสมการแบบ Freudlich เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547)

2.8.5.1 ไอโซเทอมแบบ Langmuir Isotherm

เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุดสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Irving Langmuir) (1916) ซึ่งมีสมมุติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption Site) ที่แน่นอน โดยในแต่ละตำแหน่งของโมเลกุลของสารดูดซับจะบรรจุโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กัน

$$\frac{x}{m} = X = \frac{X_m K C_e}{1 + K C_e} \tag{2.1}$$

โดย x คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัม)

m คือ ปริมาณสารดูดซับ (กรัม)

X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

X_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับสูงสุดบนผิวของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K คือ ค่าคงที่ของระบบ (Adsorption Binding Constant)

จากสมการที่ 2.1 เมื่อ X_e เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้อินฟินิตี้สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

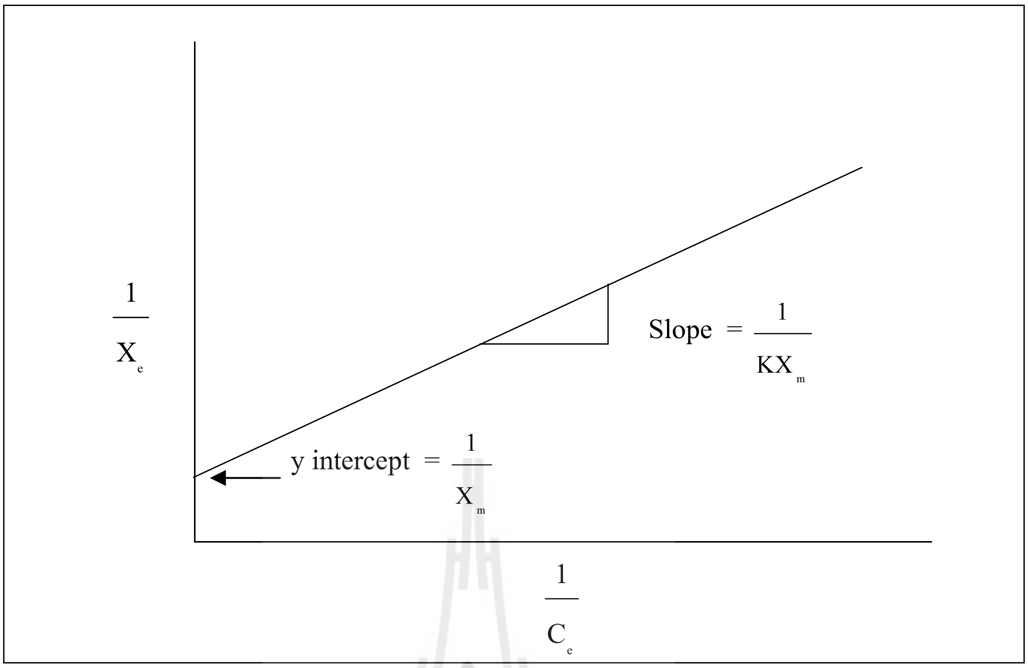
$$\frac{C_e}{X} = \frac{C_e}{X_m} + \frac{1}{K X_m} \tag{2.2}$$

$$\frac{1}{X_e} = \frac{1}{X_m K C_e} + \frac{1}{X_m} \tag{2.3}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{1}{X_m}$ กับ $\frac{1}{C_e}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยจุดตัดบนแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m}$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{K X_m}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้

2.8.5.2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich

เป็นไอโซเทอมที่ใช้ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว สมการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้กับสารละลายที่ค่อนข้างเจือจางและมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีสมการดังแสดงในสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.5 กราฟไอโซเทอมแบบ Langmuir

$$\frac{x}{m} = X = K_f C_e^{1/n} \qquad (2.4)$$

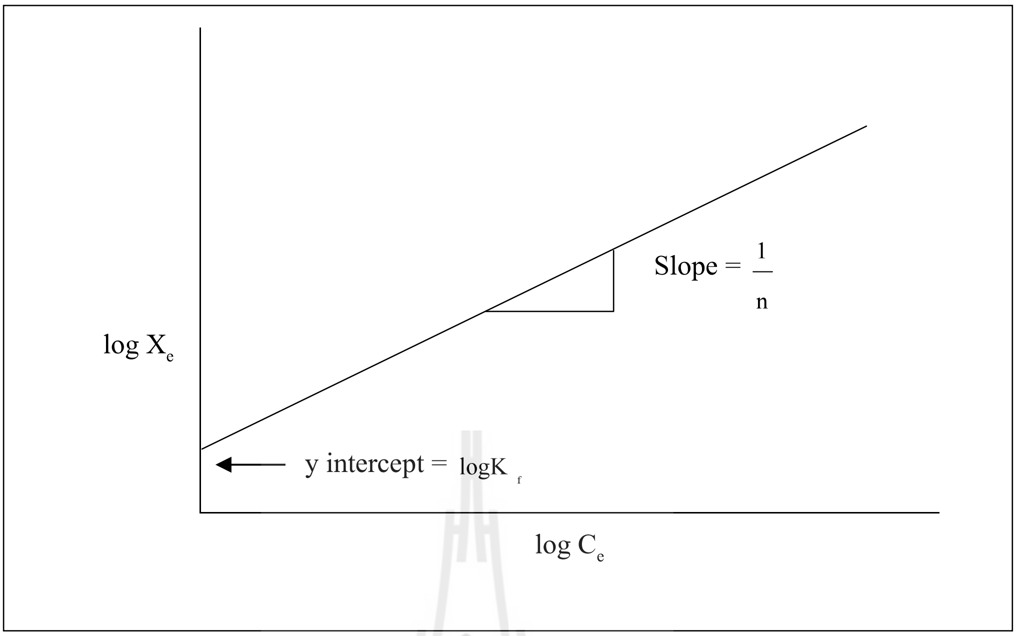
โดย K_f คือ ค่าคงที่ของระบบ

n คือ ค่าความหนาแน่นการดูดซับ

จากสมการที่ 2.4 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.5

$$\log X = \log K_f + \frac{1}{n}\log C_e \qquad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log X กับ log C_e จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.6 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดบนแกน y เท่ากับ log K_f ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า n และ K_f ได้



รูปที่ 2.6 กราฟไอโซเทอมแบบ Freundlich

2.8.5.3 ไอโซเทอมแบบ BET (Brunauer-Emmerett-Teller Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ โดยไอโซเทอมแบบเบทใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งมีสมมุติฐานพื้นฐาน คือ แต่ละโมเลกุลในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่เกิดการดูดซับของโมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อ ๆ ไป โดยมีเงื่อนไขว่าโมเลกุลของสารดูดซับไม่มีการเคลื่อนที่อิสระบนผิว และการดูดซับมีระดับคงที่สำหรับทุก ๆ โมเลกุล ซึ่งมีสมการดังที่แสดงในสมการที่ 2.6 และค่า C_s ในสมการที่ 2.6 สามารถอ่านได้จากรูปที่ 2.7

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)\left[1 + (B-1)(C_e/C_s)\right]} \qquad (2.6)$$

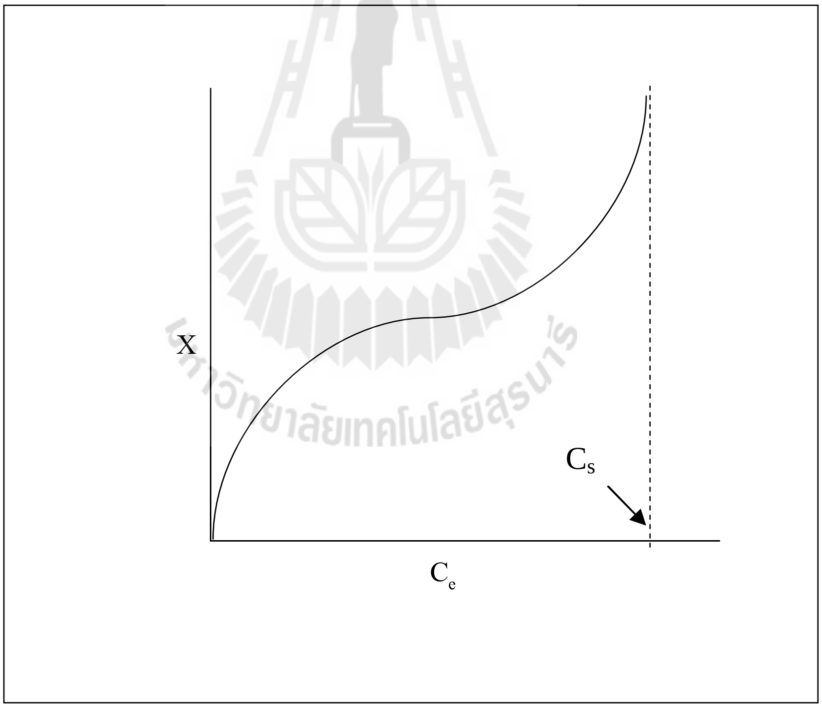
โดย C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับในน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่าคงที่ของระบบ

จากสมการ 2.6 สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ ดังสมการที่ 2.7

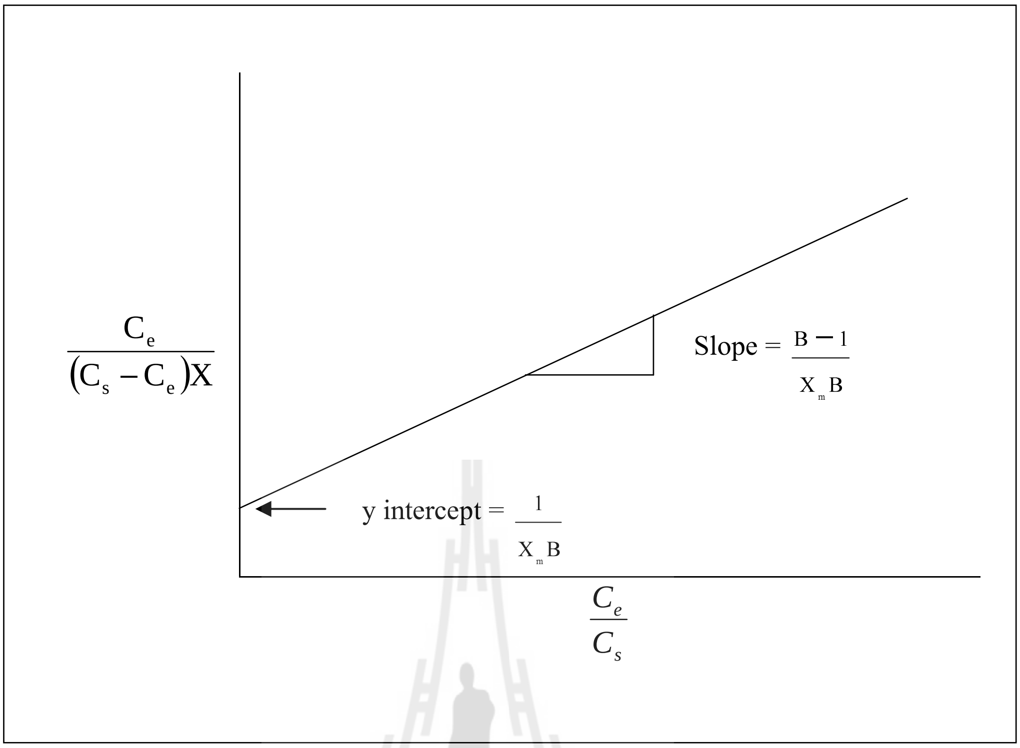
$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \left[\frac{B-1}{X_m B}\right]\left[\frac{C_e}{C_s}\right] \qquad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(C_s - C_e)X}$ กับ $\frac{C_e}{C_s}$ จะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.8 ความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{B-1}{X_m B}$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{1}{X_m B}$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า B และ X_m ได้



รูปที่ 2.7 กราฟสำหรับหาค่า C_s ของสมการไอโซเทอมแบบ BET

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

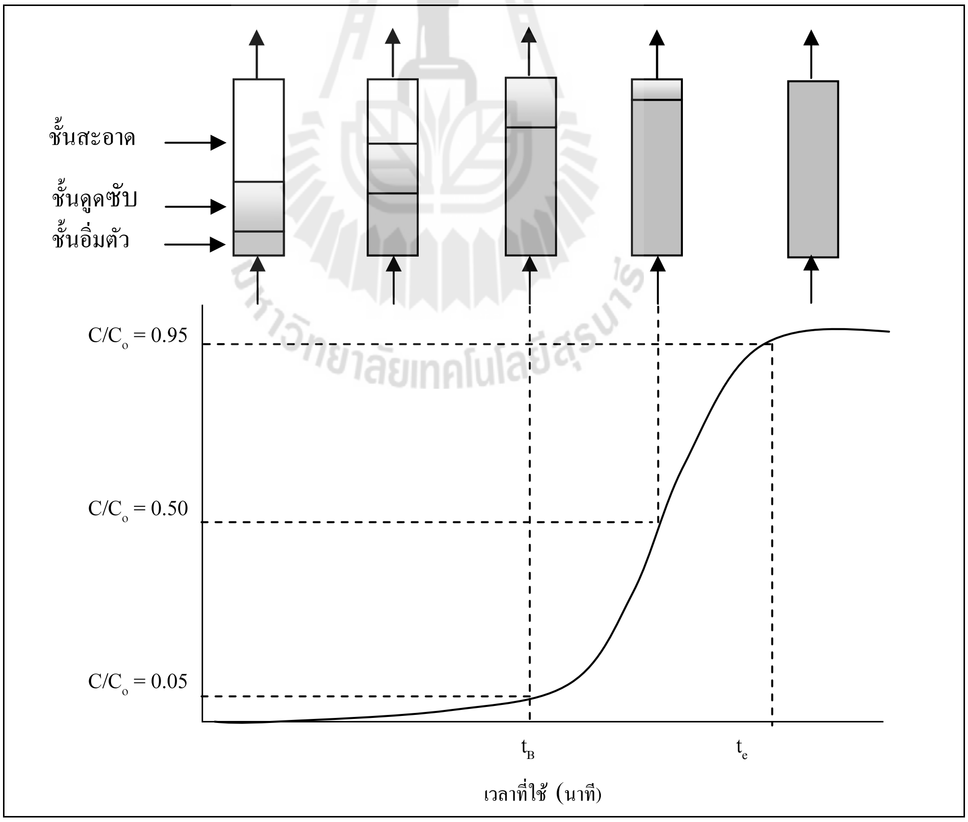


รูปที่ 2.8 กราฟไอโซเทอมแบบ BET

2.9 การดูดซับแบบต่อเนื่องในชุดทดลองคอลัมน์

ในการนำกระบวนการดูดซับไปประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียมักใช้การดูดซับแบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow) มากกว่าแบบกะ (Batch) การดูดซับแบบต่อเนื่อง โดยบรรจุสารดูดซับลงในคอลัมน์และปล่อยให้สารละลายของสารที่ถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ โดยสารดูดซับที่บริเวณจุดที่ป้อนสารละลายเข้าสู่ระบบจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่เข้าระบบอย่างต่อเนื่อง การดูดซับแบบ Fixed bed สามารถออกแบบการไหลผ่านสารดูดซับได้ 2 แบบ คือ (1) การไหลผ่านสารดูดซับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (Upflow) และ (2) การไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง (Downflow) โดยที่การไหลแบบ Downflow จะใช้สารดูดซับเป็นทั้งตัวดูดซับและตัวกรอง แต่ถ้าระบบเป็นการดูดซับที่ไม่ต้องการการกรองการไหลผ่านแบบ Upflow จะมีความเหมาะสมกว่าการไหลแบบ Downflow เนื่องจากสามารถลดผลของ Pressure drop ทำให้สารละลายไหลผ่านช่องแคบได้ดีขึ้น ช่วยลดการอุดตันของสารดูดซับ สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ดีขึ้น และมีความเหมาะสมสำหรับสารดูดซับที่มีขนาดเล็ก ทำให้สามารถลดขนาดของสารดูดซับลงได้

เมื่อพิจารณาการดูดซับแบบ Fixed Bed โดยการป้อนสารที่ถูกดูดซับน้ำเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุสารดูดซับด้วยอัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ที่ส่วนล่างเท่ากับอัตราการดึง สารที่ถูกดูดซับออกจากคอลัมน์ที่ส่วนบนอย่างต่อเนื่อง พบว่าเมื่อป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์สารดูดซับในส่วนล่างของคอลัมน์จะสัมผัสกับสารที่ถูกดูดซับก่อน และเกิดการดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับจนสารดูดซับอิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาจนกระทั่งสารดูดซับทั้งหมดในคอลัมน์อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่ง Breakthrough Carve ส่วนใหญ่จะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) (กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, 2548) โดยจุดเบรคทรู คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ และจุดหมดสภาพ คือ จุดที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ผ่านออกจากคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 95 ของความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (Metcalf and Eddy, 2004)



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับสำหรับชั้นสารดูดซับแบบ Fixed Bed ซึ่งมีการไหลแบบ Upflow (Metcalf and Eddy, 2004)

จากการศึกษา Breakthrough curve สามารถคำนวณหาความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในระบบ และทำการประเมินอายุการใช้งานของระบบได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของ Breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราเร็วของกลไกการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ความลึกหรือความสูงของสารดูดซับและอัตราเร็วในการป้อนสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่คอลัมน์ แต่โดยส่วนใหญ่ค่าที่จุดเบรคทรูจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ คือ ค่าที่จุดเบรคทรูจะลดลงเมื่อสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นหรือลดระดับความสูงของสารดูดซับ หรือมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546; ธิดารัตน์ บุญศรี, 2543)

จากรูปที่ 2.9 สามารถแบ่งชั้นของสารดูดซับออกเป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ ได้แก่ *ชั้นแรก* เป็นชั้นของสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ (Saturated zone) *ชั้นที่ 2* เป็นชั้นที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ซึ่งมีความยาวเท่ากับ L_{MTZ} *ชั้นที่ 3* เป็นชั้นที่สารดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เรียกว่า ชั้นสะอาด (Clean zone) โดยความยาวของชั้นการดูดซับหาได้จากสมการที่ 2.8 หรือ 2.9

$$L_{MTZ} = L\left(1 - \frac{t_b}{t_s}\right) \tag{2.8}$$

โดย L_{MTZ} คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)

L คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)

t_b คือ เวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (นาที)

t_s คือ เวลาจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)

$$Z_S = L\left(\frac{V_Z}{V_T - 0.5V_Z}\right) \tag{2.9}$$

โดย Z_S คือ ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)

Z คือ ความสูงทั้งหมดของชั้นสารดูดซับ (เซนติเมตร)

V_B คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)

V_T คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)

V_Z คือ ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดระหว่างจุดเบรคทรูจนถึงจุดหมดสภาพ(มิลลิลิตร)

2.9.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (Empty Bed Contact Time : EBCT)

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบและพัฒนาชุดทดลองคอลัมน์จากขนาดทดลองเป็นขนาดที่ใหญ่ขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบและอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

$$\text{EBCT} = \frac{\text{BV}}{\text{Q}} \quad (2.10)$$

$$\text{Usage rate} = \frac{\text{W}}{\text{V}_{\text{B}}} \quad (2.11)$$

โดย BV คือ ปริมาตรของสารดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Q คือ อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)

W คือ น้ำหนักตัวดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์ (กรัม)

2.10 หินดินดาน (Shale)

หินดินดาน หมายถึง หินชั้นซึ่งประกอบด้วยแร่ดิน (clay minerals) เป็นส่วนใหญ่ แร่ดินนี้เป็นสารผสมของอลูมิเนียมซิลิเกตกับแมกนีเซียมในสัดส่วนต่าง ๆ กัน คุณสมบัติของหินดินดานคือมีความละเอียดมากเมื่อบี้กับน้ำแล้วจะเหนียวติดมือ หินดินดานบางชนิดย่างไฟแล้วให้น้ำมัน ซึ่งเมื่อนำมากลั่นจะได้น้ำมันคุณภาพต่าง ๆ กัน จึงเรียกหินดินดานนั้นว่า หินน้ำมัน (oil shale) โดยทั่วไปสภาพทางธรณีวิทยาของแหล่งหินดินดานซึ่งปกติเกิดเป็นชั้น ๆ มักจะมีชั้นของหินประเภทอื่น ๆ แทรกสลับอยู่ด้วย เช่น มีชั้นหินทราย หรือหินทรายแป้ง หรือบางครั้งอาจจะมีชั้นหินปูนบาง ๆ หรือเกิดเป็นเลนซ์แทรกอยู่ด้วย หินดินดานมีส่วนประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 4-5 (เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา, 2538; อมรา ดาวไธสง, 2550; Martin Marietta Material, 2004) และจากการศึกษาของอมรา ดาวไธสง (2550); Daothaisong and Yimrattanabavorn (2008) ซึ่งได้นำหินดินดานมาศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ โดยผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.9 ส่วนประกอบทางเคมีของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)		
	Martin Marietta Material (2004)	เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา (2538)	อมรา ดาวไธสง (2550)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	58-60	58.10	54.42
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	14-16	15.40	11.49
แคลซีมออกไซด์ (CaO)	3-4	3.11	10.97
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	4-5	4.02	4.68
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	3-4	3.24	1.79
แมงกานีสออกไซด์ (MgO)	2-3	2.44	2.00
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1-2	1.30	0.38

ตารางที่ 2.10 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

หินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความพรุน (ร้อยละ)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เมตรต่อวัน)
A	4.00-8.00	5.53	1.88	33	875.16
B	2.00-4.00	5.99	1.87	34	664.44
C	1.00-2.00	6.06	1.86	35	391.44
D	0.50-1.00	6.23	1.86	35	208.12
E	0.25-0.50	6.97	1.86	35	97.64

หมายเหตุ : อมรา ดาวไธสง (2550)

2.10.1 แหล่งผลิตและปริมาณหินดินดานในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีแหล่งผลิตหินดินดานในภาคกลางที่จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี และราชบุรี ส่วนในภาคใต้มีแหล่งผลิตที่จังหวัดนครศรีธรรมราชและสงขลา การผลิตหินดินดานเป็นการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ภายในประเทศเท่านั้นดังนั้น ปริมาณการผลิตหินดินดานจึงสอดคล้องกับปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ภายในประเทศ (มยุรี ปาลวงศ์, 2547) ปริมาณและมูลค่าการผลิตการใช้หินดินดานในปี 2544-2550 แสดงในตารางที่ 2.11 โดยในปี

2544-2550 การใช้หินดินดานมีปริมาณโดยรวม 31.1 ล้านเมตริกตัน มูลค่าโดยรวม 2834.5 ล้านบาท โดยในปี 2545 มีปริมาณการใช้หินดินดานมากที่สุดถึง 6.2 ล้านเมตริกตัน มูลค่า 556.1 ล้านบาท

ตารางที่ 2.11 ปริมาณและมูลค่าการผลิตการใช้หินดินดานตั้งแต่ปี 2544-2550

ปี	การผลิต		การใช้	
	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ปริมาณ (เมตริกตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2544	3364211	302.80	3183096	286.50
2545	5016774	451.50	6179167	556.10
2546	2981504	268.30	2641279	237.70
2547	3621631	326.00	3631565	326.80
2548	3695000	332.60	3905637	351.50
2549	5589794	503.10	5486302	493.80
2550	4768673	429.20	4545900	409.10

หมายเหตุ : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่; (2549ก); (2549ข); (2551ก); (2551ข)

2.10.2 การใช้ประโยชน์หินดินดาน

การนำหินดินดานไปใช้ประโยชน์แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

2.10.2.1 อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

หินดินดานเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการผลิตปูนซีเมนต์โดยมีสัดส่วนการใช้ประมาณร้อยละ 15.18 ของวัตถุดิบทั้งหมด จึงนับได้ว่าหินดินดานที่ผลิตได้ในประเทศเป็นการผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศเท่านั้น ปริมาณหินดินดานสำรองสำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์ประมาณ 706.20 ล้านเมตริกตัน จากประทานบัตรรวม 27 แปลง (มยุรี ปาลวงศ์, 2547)

2.10.2.2 อุตสาหกรรมปิโตรเลียม

หินน้ำมัน (Oil Shale) เป็นหินดินดานชนิดหนึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถกลั่นให้ปิโตรเลียมเหลวและแก๊สได้ หินน้ำมันมีสีน้ำตาลไหม้ถึงดำ แข็งและเหนียว และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีอัตราส่วนของสารอินทรีย์ต่อสารอนินทรีย์ไม่เกิน 1 : 4 และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนต่ำกว่าถ่านหิน สีของหินน้ำมันอาจมีสีเขียวออกน้ำตาล เมื่อเอาไฟรนจะได้กลิ่นน้ำมันระเหยออกมา ตัวอย่างที่พบจากการสำรวจหินน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.60-2.80 ยิ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำจะมีคุณภาพดี หินน้ำมันที่น่าสนใจในเชิงพาณิชย์นั้นควรมีค่าน้ำมันมากกว่า 10-15 แกลอนต่อหนึ่งตันหิน (น้ำมันที่สกัดได้มีคุณสมบัติและลักษณะเช่นเดียวกับน้ำมันดิบ) ทั้งนี้

ยังขึ้นอยู่กับสภาวะเศรษฐกิจและเชื้อเพลิงสำรองอื่น ๆ ของแต่ละประเทศด้วย หินน้ำมันเกิดจากการสะสมตัวของสารอินทรีย์จำพวกพืชและสัตว์ ในบริเวณที่เหมาะสมด้วยระยะเวลานับล้านปีโดยอินทรีย์สารเหล่านั้นถูกเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่เรียกว่า เคอโรเจน ซึ่งผสมคลุกเคล้ากับตะกอนกลายเป็นหินน้ำมัน (วิวัฒน์ โตธิรกุล, 2548)

2.10.2.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

นอกจากอุตสาหกรรม 2 ประเภทข้างต้น ยังมีการนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อมด้วย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหินน้ำมันและเถ้าหินน้ำมันมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม เช่น สีย้อมเบสิคและสีย้อมรีแอคทีฟได้ (Abu-EI-Sha’r et al., 1999; Al-Qodah, 2000) อีกทั้งยังมีความสามารถในการกำจัดยาปราบศัตรูพืช เช่น Deltamethrin และ Lambda-Cyhalothrin ได้ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชสูงสุดของหินน้ำมันมีค่าเท่ากับ 11.40 และ 8.60 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับยาปราบศัตรูพืชชนิด Deltamethrin และ Lambda-Cyhalothrin ตามลำดับ (Al-Qodah et al., 2007) หินดินดานและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของหินน้ำมันยังสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น อาร์เซนิก โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสีและทองแดงได้ โดยมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.071-1.349 70.800 95.600 50.000 และ 100.000 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับอาร์เซนิก แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ (Al-Asheh and Banat, 2000; Shawabkeh et al., 2004a; 2004b; Paikary et al., 2005) นอกจากนี้หินดินดานยังมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ด้วย (อมรา ดาวไธสง, 2550; Drizo et al., 1999; Daothaisong and Yimratanabavorn, 2008) และเมื่อนำหินดินดานไปใช้ในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ และมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและรากได้ดี (Drizo et al., 1997; 2000) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหินดินดานมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ยาปราบศัตรูพืช และสารอินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส นอกจากนี้หินดินดานยังมีแนวโน้มที่จะสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้อีกด้วย

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำหินดินดานมาใช้ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

อมรา ดาวไธสง (2550) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ และประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานในชุดจำลองระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดกรวดและทราย ซึ่งจากการศึกษาความสามารถในการดูดซับและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อสารดูดซับมีขนาดเล็กลง โดยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดสำหรับไนเตรทไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.029-0.143 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 0.042-0.166 มิลลิกรัมต่อกรัม และสำหรับออร์โธฟอสเฟตมีค่าอยู่ในช่วง 0.051-0.485 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ในสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนสูงสุดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.0 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนสูงสุด และที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.0 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าความสามารถในการดูดซับไนเตรทไนโตรเจนสูงสุด และจากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานในชุดจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เปรียบเทียบกับตัวกลางชนิดกรวดและทราย พบว่าหินดินดานทุกขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนและออร์โธฟอสเฟตได้ดีกว่าตัวกลางชนิดกรวดและทราย

Drizo et al. (1997; 2000) ได้ศึกษาการนำหินดินดานไปใช้ในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดระหว่างระบบที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืช พบว่าระบบที่ปลูกพืชสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้อย่างสมบูรณ์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 85-95 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 98-100 ส่วนระบบที่ไม่ปลูกพืชมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ร้อยละ 40-75 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ร้อยละ 45-75 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตได้ร้อยละ 98-100 นอกจากนี้ยังพบว่าพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้และมีการพัฒนาของลำต้นใต้ดินและรากได้ดี

Gharaibeh et al. (1998) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในสารละลายด้วยหินน้ำมัน โดยสารละลายโลหะหนักประกอบไปด้วยโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง โครเมียม นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี จากการศึกษาพบว่าหินน้ำมันมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และนิเกิล มีค่าเท่ากับ 1.530×10^5 8.120×10^3 2.080×10^4 และ 1.340×10^4 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Drizo et al. (1999) ได้ศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ได้แก่ Buxite Light expanded clay aggregate (LECA) หินปูน ขี้เถ้าลอย หินน้ำมันที่ผ่านการเผาไหม้แล้ว และซีโอไลต์ พบว่าหินดินดานและ Buxite มีความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุด โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 730 และ 350 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และยังได้คาดการณ์อายุของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง พบว่าอายุของระบบจะสูงถึง 20 ปี

Abu-El-Sha'r et al. (1999) ได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีย้อมของสารดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ (1) หินน้ำมัน (2) olive-mill waste (JEFT) และ(3) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำ โดยสีย้อมที่นำมาใช้ในการศึกษามี 2 ประเภท คือ (1) สีย้อมประจุบวก ได้แก่ เมทิลลีนบลู และ (2) สีย้อมประจุลบ ได้แก่ เมทิลออเรนจ์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าหินน้ำมันสามารถกำจัดสีย้อมประจุบวกได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมประจุลบได้

Al-Asheh and Banat (2000) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับทองแดงและสังกะสีด้วยหินน้ำมัน จากการศึกษาพบว่าหินน้ำมันสามารถกำจัดทองแดงและสังกะสีออกจากสารละลายได้มากกว่าร้อยละ 97 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงและสังกะสีเท่ากับ 60 และ 100 พีพีเอ็ม (ppm) ตามลำดับ

Al-Qodah (2000) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมของเถ้าหินน้ำมัน (shale oil ash) โดยสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Drim yellow-k4G (2) Drim blue-KBL และ (3) Drim red-K4BL พบว่าอัตราการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของเถ้าหินน้ำมันจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงเริ่มต้นแล้วลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีในช่วงตั้งแต่ 50-380 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มปริมาณสารดูดซับในช่วงตั้งแต่ 0.50-2.00 กรัมต่อลิตร เพิ่มความเร็วในการเขย่าในช่วง 250-600 รอบต่อนาที และเพิ่มอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 20-45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ความสามารถการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วงตั้งแต่ 100-300 ไมโครเมตร

Shawabkeh et al. (2004a; 2004b) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยของหินน้ำมัน โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก กรดซัลฟูริค และกรดฟอสฟอริกเป็นตัวสกัด พบว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ด้วยกรดไนตริกมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง เท่ากับ 70.80 95.60 50.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Shawabkeh (2006) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโครเมียมในสารละลายด้วย carbo-aluminosilicate ที่ทำจากหินน้ำมันด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี จากการศึกษาพบว่า carbo-aluminosilicate ที่ทำจากหินน้ำมันมีความสามารถในการดูดซับไอออนของโครเมียมเท่ากับ 92 มิลลิกรัมต่อกรัม

Al-Qodah et al. (2007) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชด้วยเถ้าหินน้ำมัน โดยยาปราบศัตรูพืชที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ (1) Lambda-Cyhalothrin และ (2) Deltamethrin ในการศึกษาใช้ความเข้มข้นของยาปราบศัตรูพืชเท่ากับ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิของระบบเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่ากับ 3.0 และความเร็วรอบในการเขย่าเท่ากับ 400 รอบต่อนาที เถ้าหินน้ำมันที่ใช้ในการดูดซับมีขนาด 202.25 ไมโครเมตร พบว่าความสามารถในการดูดซับยาปราบศัตรูพืชสูงสุดของเถ้าหินน้ำมันมีค่าเท่ากับ 11.40 และ 8.60 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับยาปราบศัตรูพืชชนิด Deltamethrin และ Lambda-Cyhalothrin ตามลำดับ

2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและปัจจัยการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 2 (2) Reactive Red 120 และ (3) Reactive Red 141 จาการศึกษาพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.0-10.0 การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมีประสิทธิภาพดี โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าร้อยละ 82 89 และ 98 สำหรับสีย้อม Reactive Red 2 Reactive Red 120 และ Reactive Red 141 ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีค่าต่ำกว่า 5.0 แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบมีค่าสูงกว่า 5.0 และเมื่อขนาดของสารดูดซับมีขนาดตั้งแต่ 75-250 ไมโครเมตร พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสารดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 30-60 องศาเซลเซียส

สกล ศิริรัตน์ (2546) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิคด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซานเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์แบบธรรมดาโดยสีย้อมที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Red 141 และ Basic Red 14 พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้ร้อยละ 83 ซึ่งมากกว่าถ่านกัมมันต์แบบธรรมดาซึ่งมีความสามารถในการดูดซับร้อยละ 75 และพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบไคโตซาน โดยเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0 7.0 และ 9.0 จากการศึกษาพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าลดลงเท่ากับ 5.0 ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 1.18 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 7.0 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.0 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้น 0.88 เท่าของการดูดซับที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 7.0

วรรณวิภา ผลาหาญ (2547) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 5 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Blue 5 (2) Reactive Blue (3) Reactive Black (4) Reactive Red และ (5) Reactive Yellow ด้วยเศษผงเหล็ก พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 5 ชนิดของเศษผงเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.006 0.011 0.007 0.050 และ 0.012 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อม Reactive Blue 5 Reactive Blue Reactive Black Reactive Red และ Reactive Yellow ตามลำดับ

Annadurai et al. (1999) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยไคติน โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Verofix red โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณของไคติน ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิและขนาดของอนุภาคไคติน พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของไคติน ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ แต่การดูดซับจะลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคไคตินเพิ่มขึ้น

Ozacar and Sengil (2003) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Blue 114 (2) Reactive Yellow 64 และ (3) Reactive Red 124 ด้วย calcined alunite จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของ calcined alunite มีค่าเท่ากับ 170.70 236.00 และ 153.00 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อม Reactive Blue 114 Reactive Yellow 64 และ Reactive Red 124 ตามลำดับ

Armagan et al. (2004) ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชกลุ่มเอโซ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Everzol Black B (2) Everzol Red 3RS และ (3) Everzol Yellow 3RS ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้น จากการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการดูดซับ

สีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด แต่ซีโอไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิด Everzol Black B Everzol Red 3RS และ Everzol Yellow 3RS เท่ากับ 2.90 3.70 และ 7.60 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Rachakornkij et al. (2004) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากสารละลาย โดยในการศึกษาใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue R และ (3) Remazol Brilliant Red F3B และเถ้าลอยชานอ้อยที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเสียจากโรงงานน้ำตาลในจังหวัดสระบุรี จากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายซึ่งมีค่าตั้งแต่ 5.0-9.0 ไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้งสามชนิด และค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมจะลดลงจากร้อยละ 58.91-97.05 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมตั้งแต่ 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าร้อยละในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 96.66-99.10 93.52-97.83 และ 94.32-98.18 สำหรับสีย้อม Remazol Black B Remazol Brilliant Blue R และ Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ เมื่อปริมาณสารดูดซับเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20.00-120.00 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่ให้ค่าร้อยละการกำจัดสีย้อมสูงที่สุด คือ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายประมาณ 5.0 และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 240 300 และ 240 นาที สำหรับสีย้อม (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue R และ (3) Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ โดยพบว่าค่าร้อยละในการกำจัดมีค่าเท่ากับร้อยละ58.48-98.03 46.15-93.47 และ 46.03-94.60 สำหรับสีย้อม (1) Remazol Black B (2) Remazol Brilliant Blue R และ (3) Remazol Brilliant Red F3B ตามลำดับ

Gulnaz et al. (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของ Dried Activated Sludge โดยสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Reactive Black 5 พบว่าระยะเวลาสัมผัสมีผลต่อการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 ของ Dried Activated Sludge ซึ่งการดูดซับจะเกิดได้ดี ในช่วงแรก โดยในช่วง 15 นาทีแรกสามารถกำจัดสีย้อม Reactive Black 5 ได้ร้อยละ 50 และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 2.0 4.0 และ 6.0 ค่าความจุในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 74.00 52.00 และ 14.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 20 35 และ 50 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 74.00 62.00 และ 47.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 มีค่าเท่ากับ 5.00 100.00 และ 200.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ความจุการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเท่ากับ 34.00 74.00 และ 104.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

Khraisheh et al. (2005) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 2 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Black และ (2) Reactive Yellow ด้วย diatomite และ calcined diatomite จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black และ Reactive Yellow มีค่าเท่ากับ 28.35 และ 16.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับสารดูดซับชนิด calcined diatomite และมีค่าเท่ากับ 25.78 และ 20.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับสารดูดซับชนิด diatomite

Eren and Acar (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Black 5 ด้วยขี้เถ้าลอย (fly ash) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 ของขี้เถ้าลอยและถ่านมันต์ชนิดผงมีค่าเท่ากับ 7.936 และ 58.823 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Reactive Black 5 สำหรับสารดูดซับทั้ง 2 ชนิด

Karadag et al. (2007) ได้ศึกษาการนำซีโอไลต์ธรรมชาติและซีโอไลต์ผ่านการกระตุ้นมาใช้กำจัดสีย้อมเบสิคและสีย้อมรีแอคทีฟ โดยสีย้อมเบสิคที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Basic Red 46 และสีย้อมสีรีแอคทีฟที่ใช้ ได้แก่ Reactive Yellow 176 ส่วนสารลดแรงความตึงผิวที่ใช้ในการกระตุ้นซีโอไลต์ ได้แก่ Cetyltrimethylammonium Bromide และ Hexadecyltrimethylammonium Bromide โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดของซีโอไลต์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีค่าเท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร และอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส หากเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเริ่มต้นในช่วงตั้งแต่ 3.0-11.0 จะมีผลทำให้การดูดซับสีย้อม Basic Red 46 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Reactive Yellow 176 ของสารดูดซับชนิดซีโอไลต์ธรรมชาติ และความจุในการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และอุณหภูมิ

Barka et al. (2010) ได้ศึกษาการนำ hydroxyapatite มาใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Yellow 84 จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟของ hydroxyapatite มีค่าเท่ากับ 50.25 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มจาก 11.48 เป็น 26.19 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มจาก 10 เป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มจาก 24.31 เป็น 26.45 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มจาก 20 เป็น 50 องศาเซลเซียส

Sun et al. (2010) ได้ศึกษาการนำขี้เถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ 2 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Red 23 และ (2) Reactive Blue 171 จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Red 23 และ Reactive Blue 171 มีค่าเท่ากับ 2.10 และ 1.86 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

2.12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำเป็นวัตถุดิบในกระบวนการฟอกย้อมในปริมาณมาก น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีความเข้มข้นของสีสูง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และมีปริมาณสารอินทรีย์สูง เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีหลายระบบแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพการกำจัด ต้นทุนในการก่อสร้าง และเรื่องค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ กระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีความทนทานต่อความเป็นพิษของสีย้อมและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ดี สารดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในระบบที่ต้องใช้สารดูดซับในปริมาณมาก ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อนำสารดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้ในการดูดซับสี เช่น กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และของเสียหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ หินดินดานเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่ง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมีซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 54-60 และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 11-16 เป็นต้น ในปัจจุบันหินดินดานถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรม ผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้หินดินดานยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานด้านสิ่งแวดล้อมโดยใช้เป็นสารดูดซับ ซึ่งหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นต้น และยังมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและสารพิษต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียม อาร์เซนิก และยาปราบศัตรูพืชได้ด้วย อีกทั้งยังได้มีการนำหินน้ำมันและเถ้าหินน้ำมันซึ่งเป็นหินดินดานชนิดหนึ่งมาใช้ในการดูดซับสีย้อม พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมเมทิลลีนบลูและสีย้อมรีแอคทีฟได้ นอกจากนี้ยังได้มีการนำหินดินดานมาใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ อีกทั้งพืชสามารถเจริญเติบโตบนหินดินดานได้ดี โดยอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ขนาดและพื้นผิวของสารดูดซับ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความปั่นป่วน ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส และคุณสมบัติของตัวทำละลาย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยและผลของปัจจัยต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของสารดูดซับต่าง ๆ ดังสรุปในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ปัจจัยและผลของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

ปัจจัย	เอกสารอ้างอิง	สารดูดซับที่ใช้	ชนิดของสีรีแอคทีฟ	ผลของปัจจัยต่อการดูดซับ
อุณหภูมิ	เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544)	ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว	Reactive Red 2	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น
			Reactive Red 120	
			Reactive Red 141	
	Annadurai et al. (1999)	ไคติน	Verofix red	
	Al-Qodah (2000)	เถ้าหินน้ำมัน	Drim yellow-k4G	
			Drim blue-KBL	
			Drim red-K4BL	
	Karadag et al. (2007)	ซีโอไลต์	Reactive Yellow 176	
	Gulnaz et al. (2006)	Dried Activated Sludge	Reactive Black 5	เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง
ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย	Gulnaz et al. (2006)	Dried Activated Sludge	Reactive Black 5	เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น
	เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544)	ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว	Reactive Red 2	ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง
			Reactive Red 120	
			Reactive Red 141	
	สกล ศิริรัตน์ (2546)	ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน	Reactive Red 141	

ตารางที่ 2.12 ปัจจัยและผลของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ (ต่อ)

ปัจจัย	เอกสารอ้างอิง	สารดูดซับที่ใช้	ชนิดของสีรีแอคทีฟ	ผลของปัจจัยต่อการดูดซับ
ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย	Annadurai et al. (1999)	ไคติน	Verofix red	เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น
ความปั่นป่วน	Al-Qodah (2000)	เถ้าหินน้ำมัน	Drim yellow-k4G	เมื่อความเร็วในการกวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น
			Drim blue-KBL	
			Drim red-K4BL	
ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ	Annadurai et al. (1999)	ไคติน	Verofix red	เมื่อขนาดของสารดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลง
	Al-Qodah (2000)	เถ้าหินน้ำมัน	Drim yellow-k4G	
			Drim blue-KBL	
			Drim red-K4BL	
ระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับ	Al-Qodah (2000)	เถ้าหินน้ำมัน	Drim yellow-k4G	เมื่อระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับสารดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น
			Drim blue-KBL	
	Rachakornkij et al. (2004)	เถ้าลอยชานอ้อย	Remazol Black B Remazol	
			Brilliant Blue R Remazol	
			Brilliant Red F3B	
	Karadag et al. (2007)	ซีโอไลต์	Reactive Yellow 176	

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ของหินดินดาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม ขั้นตอนการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

3.2 ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 14 เดือน ตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2551 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2553

3.3 การจำแนกขนาดของหินดินดาน

นำตัวอย่างหินดินดานมาบดและจำแนกขนาด ให้มีขนาดแตกต่างกัน 5 ขนาด โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.15-2.00 มิลลิเมตร อ้างอิงจากผลการศึกษาของ อมรา ดาวไธสง (2550) ซึ่งได้ทำศึกษาการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยใช้หินดินดาน 5 ขนาด ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.25-8.00 มิลลิเมตร พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนกับฟอสฟอรัส ดังนั้นในการศึกษาเบื้องต้นได้นำหินดินดานทั้ง 5 ขนาดจากการศึกษาของอมรา ดาวไธสง มาทำการทดสอบการดูดซับสีย้อมเมทิลลีนบลู ซึ่งเป็นตัวแทนของสารโมเลกุลขนาดกลางและสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ค่าความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ (Shawabkeh, 2004c; Ichcho, 2005; Patnukao and Pavasant, 2008) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าหินดินดานที่มีขนาดตั้งแต่ 2.00-8.00 มิลลิเมตร ให้ค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองต่ำกว่าค่าความสามารถในการดูดซับของหินดินดานขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1 ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จึงใช้หินดินดานขนาด 0.25-2.00 มิลลิเมตร และหินดินดานขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตรลงอีก 2 ขนาดตามขนาดของตะแกรงร่อน เพื่อนำมาทดสอบการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแบ่งออกเป็น*ขนาด A* มีขนาดตั้งแต่ 1.00-2.00 มิลลิเมตร *ขนาด B* มีขนาดตั้งแต่ 0.50-1.00 มิลลิเมตร *ขนาด C* มีขนาดตั้งแต่ 0.25-0.50 มิลลิเมตร *ขนาด D* มีขนาดตั้งแต่ 0.18-0.25 มิลลิเมตร และ*ขนาด E* มีขนาดตั้งแต่ 0.15-0.18 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยใช้วิธี Sieve Analysis (ASTM, 2004)

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับเมทิลลีนบลูของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน (มิลลิเมตร)	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (มิลลิกรัมต่อกรัม)	K (มิลลิกรัมต่อกรัม)	R^2	n	K_f (มิลลิกรัมต่อกรัม)	R^2
4.00-8.00	-0.0862	-3.956×10^{-5}	0.9913	0.0783	6.310×10^{-31}	0.9825
2.00-4.00	-0.1491	-3.941×10^{-3}	0.9110	0.1944	1.430×10^{-12}	0.9300
1.00-2.00	-0.2231	-4.040×10^{-3}	0.9471	0.4032	5.210×10^{-6}	0.9406
0.50-1.00	5.2138	0.317×10^{-1}	0.9954	3.1918	9.170×10^{-1}	0.9233
0.25-0.50	7.2464	1.392×10^{-1}	0.9971	6.0132	0.320 x 10	0.9366

ตารางที่ 3.2 ขนาดของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

ขนาดของหินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)
A	1.00-2.00
B	0.50-1.00
C	0.25-0.50
D	0.18-0.25
E	0.15-0.18

3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดาน

3.4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Coefficient of Permeability) ค่าความพรุน (Porosity) ค่าความหนาแน่น (Density) ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM และค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3.3

3.4.2 ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC) และองค์ประกอบของแร่ธาตุในหินดินดาน โดยอ้างอิงวิธีการและเครื่องมือในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติตัวอย่างหินดินดาน

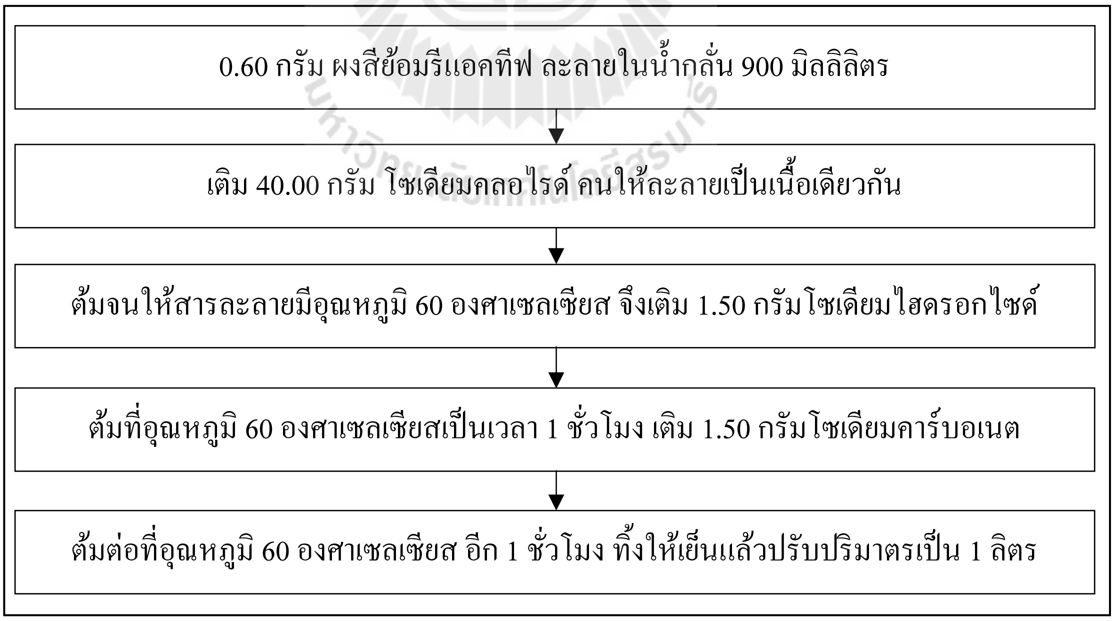
ลักษณะสมบัติ	ปัจจัย	วิธีการวิเคราะห์	อ้างอิง
ทางกายภาพ	ขนาด	Sieve Analysis	ASTM (2004)
	ความพรุน	ASTM D 4612-03	ASTM (2004)
	ความหนาแน่น	ASTM D 6938	ASTM (2004)
	พื้นที่ผิวจำเพาะ	B.E.T Method ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb 1	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543)
	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	Constant Head Method	ASTM (2004)
	ค่าการดูดซับไอโอดีน	ASTM D 4607-94	ASTM (2004)
	ลักษณะพื้นผิวจากภาพถ่าย SEM	Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM6400	Faith et al. (2006)
ทางเคมี	ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium Acetate Method, pH 7	กรมวิชาการเกษตร (2546)
	ความเป็นกรด-ด่าง	pH Meter	กรมวิชาการเกษตร (2546)
	องค์ประกอบของแร่ธาตุ	X-Ray Fluorescence Spectrometry ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED 2000	วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ (2543)

3.5 สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมของหินดินดาน

ในการศึกษาใช้ตัวอย่างสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ (1) Remazol Deep Red RGB (Red) (2) Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) และ (3) Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไดสตาร์ไทย จำกัด โดยสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด จะมีโทนสีที่แตกต่างกัน คือ *สีย้อม Red* จะเป็นสีโทนสีแดง *สีย้อม Blue* จะเป็นสีโทนสีน้ำเงิน และ*สีย้อม Yellow* จะเป็นสีโทนสีเหลือง ซึ่งสีย้อมทั้ง 3 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นแม่สี สำหรับสีย้อมโทนสีต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมเกิดจากการผสมกันของแม่สีในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

3.5.1 การเตรียมสีย้อม

การเตรียมสารละลายสีย้อมที่ใช้ในการศึกษาเตรียมโดยนำผงสีย้อมรีแอคทีฟ 0.60 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร คนจนผงสีย้อมรีแอคทีฟละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 40.00 กรัม คนให้ละลาย แล้วนำไปต้มจนสารละลายมีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 1.50 กรัม ต้มต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 2.00 กรัม แล้วต้มต่อที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อีก 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร จะได้สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟความเข้มข้น 600.00 มิลลิกรัมต่อลิตร (Orfao et al., 2006) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสีย้อม แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมสีย้อม

3.5.2 การวัดความเข้มข้นของสี

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวัดสีในน้ำทิ้งเพื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยรายละเอียดวิธีการวัดสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ และหน่วยเอดีเอ็มไอแสดงในภาคผนวก ก. และในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดสีแบบแพลตินัมโคบอลต์ เอดีเอ็มไอและมิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อใช้สำหรับการแปลงหน่วยความเข้มข้นสี รายละเอียดข้อมูลในการสร้างกราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก. จากการศึกษาพบว่าหน่วยวัดสีแบบแพลตินัมโคบอลต์สัมพันธ์กับหน่วยวัดสีแบบเอดีเอ็มไอและมิลลิกรัมต่อลิตรของสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา โดยตัวอย่างการคำนวณ แสดงดังสมการที่ 3.1-3.5

$$Y_1 = 0.0005Y_2 + 0.0002 \qquad (3.1)$$

$$Y_2 = 31.558Y_3 + 7.375 \qquad (3.2)$$

$$Y_4 = 112.140Y_3 + 141.320 \qquad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 3.4

$$\frac{Y_2 - 7.375}{31.558} = \frac{Y_4 - 141.320}{112.140} \qquad (3.4)$$

สามารถหาค่า Y_2 ได้ จาก

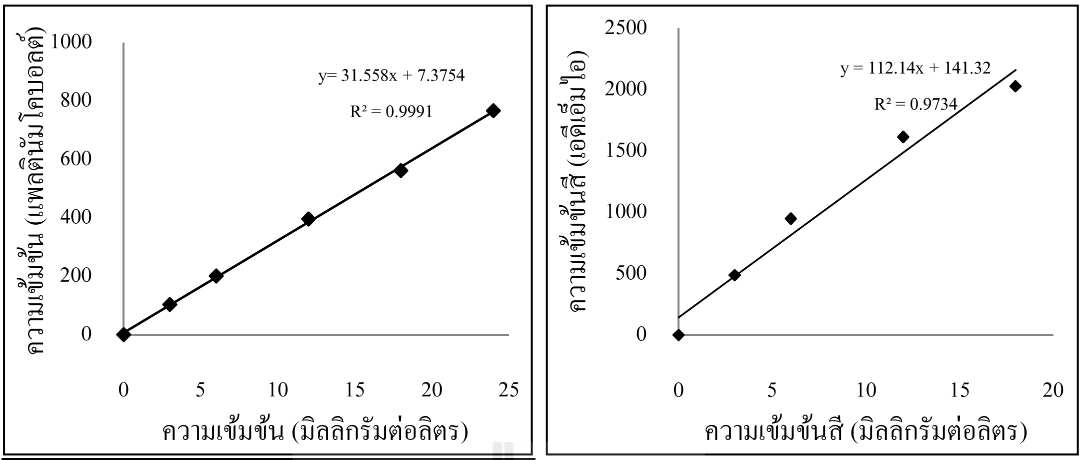
$$Y_2 = 0.281Y_4 + 37.694 \qquad (3.5)$$

โดย Y_1 คือ ค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง

Y_2 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์

Y_3 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Y_4 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ



ก) ความเข้มสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ข) ความเข้มสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Red

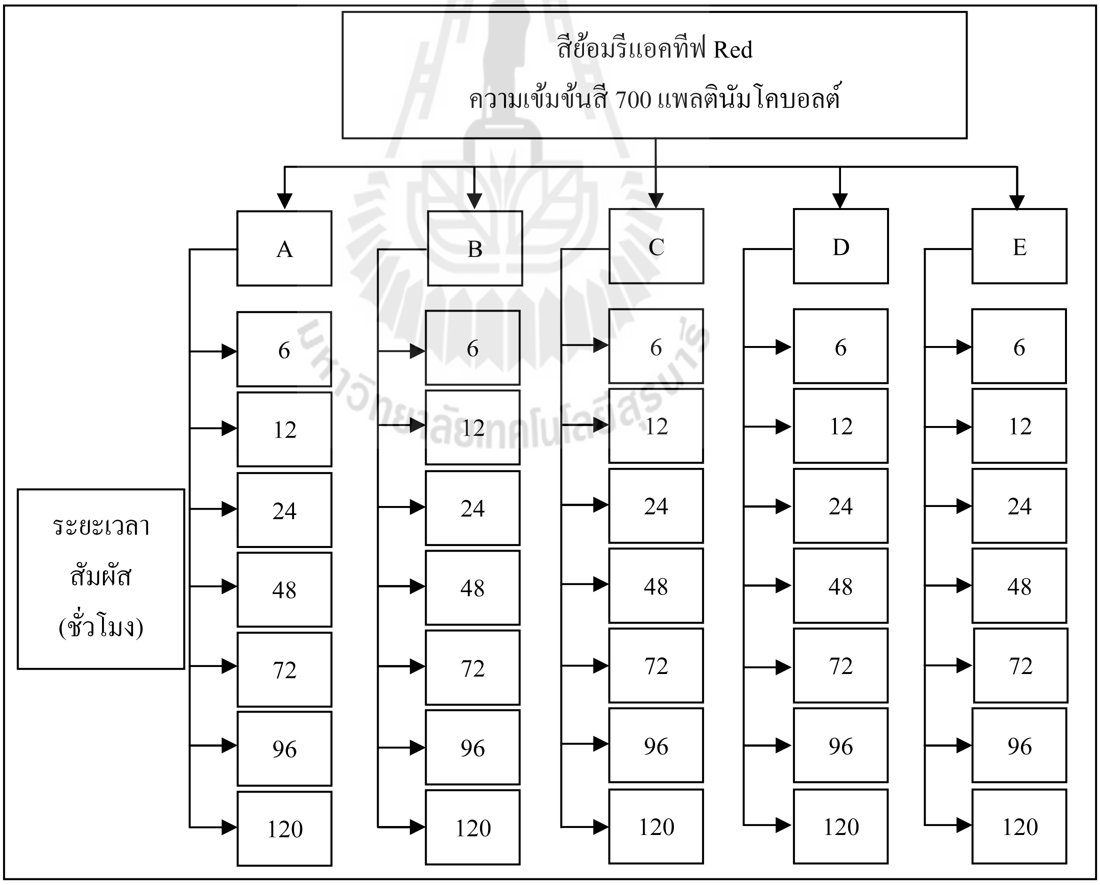
3.6 ศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

นำตัวอย่างหินดินดานที่จำแนกขนาดแล้วมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นจากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส แล้วนำไปศึกษาเพื่อหาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ โดยนำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้น 700 แพลตินัมโคบอลต์ อ้างอิงจากความเข้มข้นสีสูงสุดในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดาน รวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง แยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองสำหรับสีย้อมแต่ละชนิดจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E น้ำหนัก 1.00 กรัม อย่างละ 7 ขวด รวมทั้งหมด 35 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง และควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 10.50$\pm$0.20 ซึ่งอ้างอิงจากค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมที่ใช้สีย้อมรีแอคทีฟ โดยหินดินดานแต่ละขนาดใช้เวลาในการเขย่าแตกต่างกัน 7 ค่า ได้แก่ 6 12 24 48 72 96 และ 120 ชั่วโมงจากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.4 และสรุปในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ความเข้มข้นสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ความเข้มสี (แพลตินัมโคบอลต์) (ค่าสูงสุด-ต่ำสุด)	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	อ้างอิง
119.00-681.96	381.05	90.93	ข้อมูลจากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี (ปี 2550-2552) *
50.00-2500.00	-	-	Turhan and Turgut (2009) Lu et al. (2010)
400.00-670.00	-	-	กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)
286.00-8100.00	2447.00	-	Yigit et al.(2009)

หมายเหตุ : * หมายถึง โรงงานฟอกย้อมที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย
เพื่อใช้สำหรับการศึกษาครั้งนี้ในชุดทดลองคอลัมน์



รูปที่ 3.4 แผนผังการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 3.5 สภาวะในการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน แต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ปริมาณหิน (กรัม)
Red	A	700	200	10.50	6 12 24 48 72 96 120	ห้อง	150	1.00
	B	700	200	10.50	6 12 24 48 72 96 120	ห้อง	150	1.00
	C	700	200	10.50	6 12 24 48 72 96 120	ห้อง	150	1.00
	D	700	200	10.50	6 12 24 48 72 96 120	ห้อง	150	1.00
	E	700	200	10.50	6 12 24 48 72 96 120	ห้อง	150	1.00

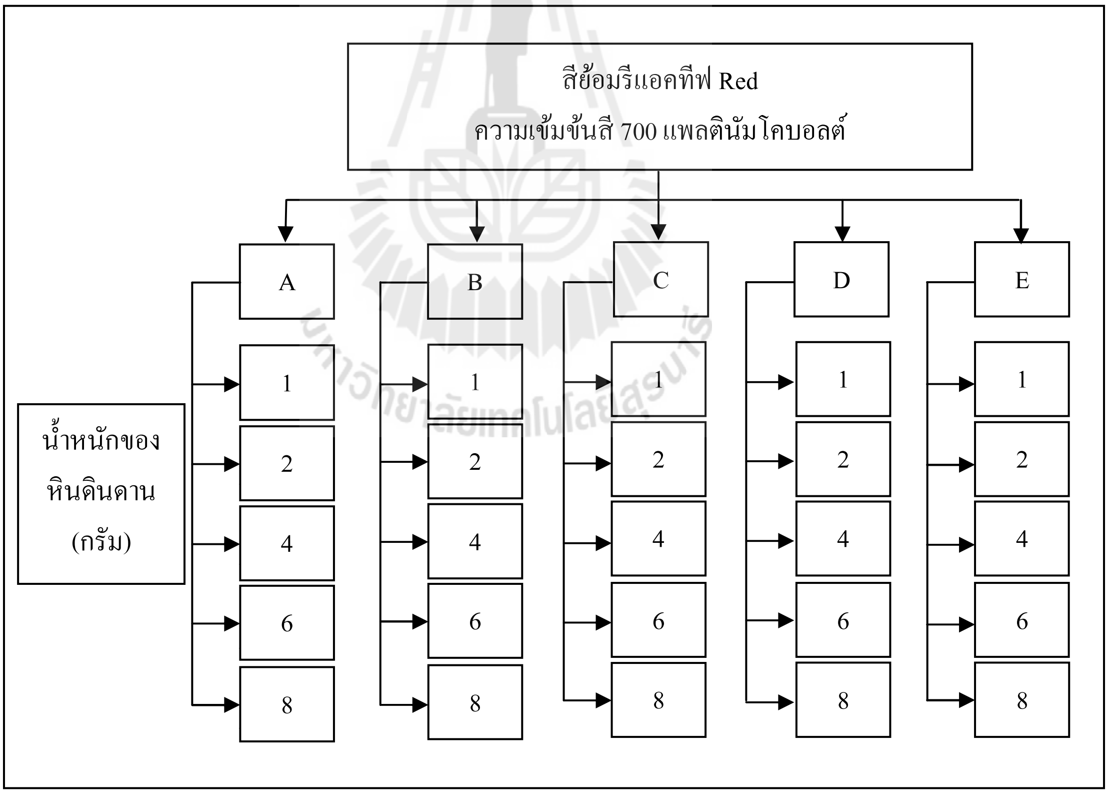
3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

3.7.1 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้น 700 แพลตินัมโคบอลต์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดานรวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลองแยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E ซึ่งมีน้ำหนักแตกต่างขนาดละกัน 5 ค่า ได้แก่ 1.00 2.00 4.00 6.00 และ 8.00 กรัม รวมทั้งหมด 25 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่า 72 ชั่วโมง (ผลจากการศึกษาจากหัวข้อ 3.6) ที่อุณหภูมิห้อง และค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 10.50$\pm$0.20 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ปริมาณหิน (กรัม)
Red	A	700	200	10.50	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	B	700	200	10.50	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	C	700	200	10.50	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	D	700	200	10.50	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	E	700	200	10.50	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8



รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

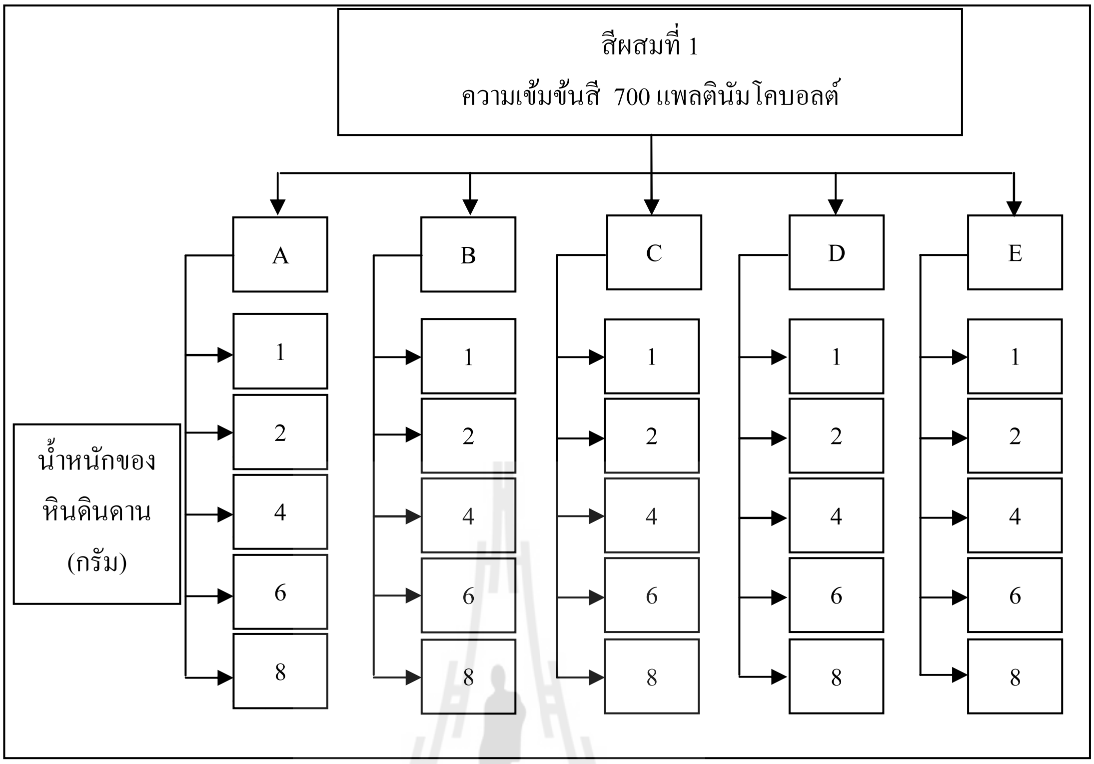
3.7.2 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟของหินดินดาน

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดที่ 1 2 3 และ 4 (นำสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Red (2) Blue และ (3) Yellow มาผสมกันโดยมีอัตราส่วนในการผสมสีดังต่อไปนี้ *สีผสมที่ 1* เป็นสีที่ผสมระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red กับ Blue ในอัตราส่วน 1 : 1 *สีผสมที่ 2* เป็นสีที่ผสมระหว่างสีย้อมชนิด Blue กับ Yellow ในอัตราส่วน 1 : 1 *สีผสมที่ 3* เป็นสีที่ผสมระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red กับ Yellow ในอัตราส่วน 1 : 1 *สีผสมที่ 4* เป็นสีที่ผสมระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 ปรับความเข้มข้นของสีผสมให้ได้ 700 แพลตินัมโคบอลต์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดานรวมทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง แยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E ซึ่งมีน้ำหนักแตกต่างกันขนาดละ 5 ค่า ได้แก่ 1.00 2.00 4.00 6.00 และ 8.00 กรัม รวมทั้งหมด 25 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเขย่า 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องและค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 10.50±0.20 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 สภาวะในการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อ	ปริมาณหิน (กรัม)
สีผสม 1	A	700	200	10.5	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	B	700	200	10.5	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	C	700	200	10.5	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	D	700	200	10.5	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8
	E	700	200	10.5	72	ห้อง	150	1 2 4 6 8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

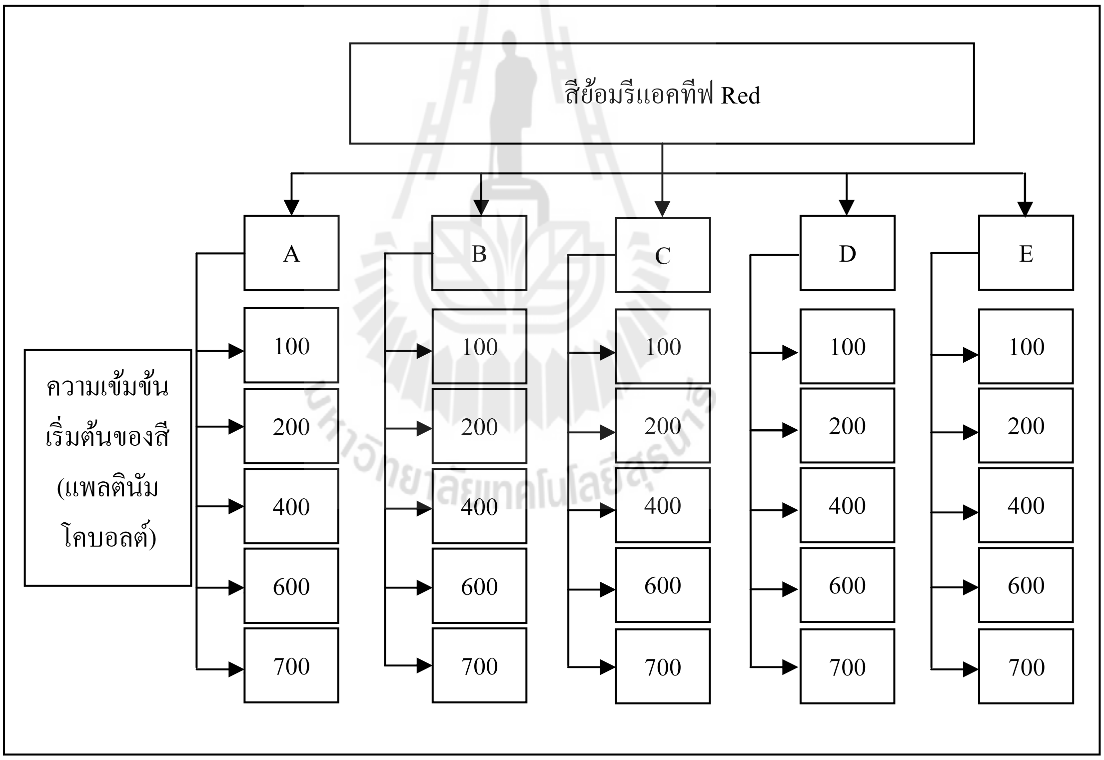
3.8 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

3.8.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับของหินดินดาน

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ที่มีความเข้มข้นของสีแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 100 200 400 600 และ 700 แพลตินัมโคบอลต์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดานรวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง แยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E น้ำหนัก 1.00 กรัมรวมทั้งหมด 25 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องและค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 10.50±0.20 จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.8 สภาวะในการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ปริมาณหิน (กรัม)
Red	A	100 200 400 600 700	200	10.50	72	ห้อง	150	1.00
	B	100 200 400 600 700	200	10.50	72	ห้อง	150	1.00
	C	100 200 400 600 700	200	10.50	72	ห้อง	150	1.00
	D	100 200 400 600 700	200	10.50	72	ห้อง	150	1.00
	E	100 200 400 600 700	200	10.50	72	ห้อง	150	1.00



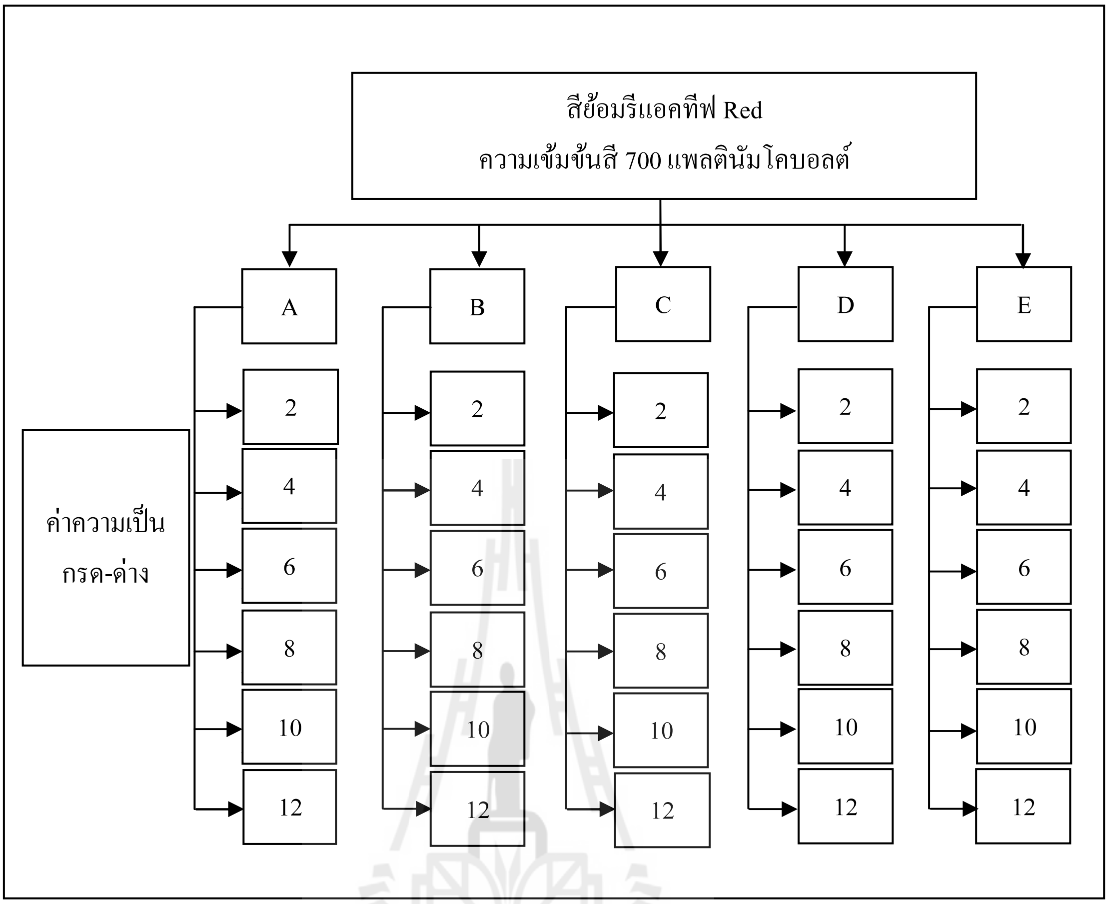
รูปที่ 3.7 แผนผังการศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟต่อการดูดซับของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

3.8.2 ศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้น 700 แพลตินัมโคบอลต์ ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟให้มีค่าแตกต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 ด้วยสารละลาย 0.10 นอร์มัลของกรดไฮโดรคลอริค และ 0.10 นอร์มัลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดานรวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลอง แยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E น้ำหนัก 1.00 กรัม รวมทั้งหมด 30 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.9 สภาวะในการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ปริมาณหิน (กรัม)
Red	A	700	200	2 4 6 8 10 12	72	ห้อง	150	1.00
	B	700	200	2 4 6 8 10 12	72	ห้อง	150	1.00
	C	700	200	2 4 6 8 10 12	72	ห้อง	150	1.00
	D	700	200	2 4 6 8 10 12	72	ห้อง	150	1.00
	E	700	200	2 4 6 8 10 12	72	ห้อง	150	1.00



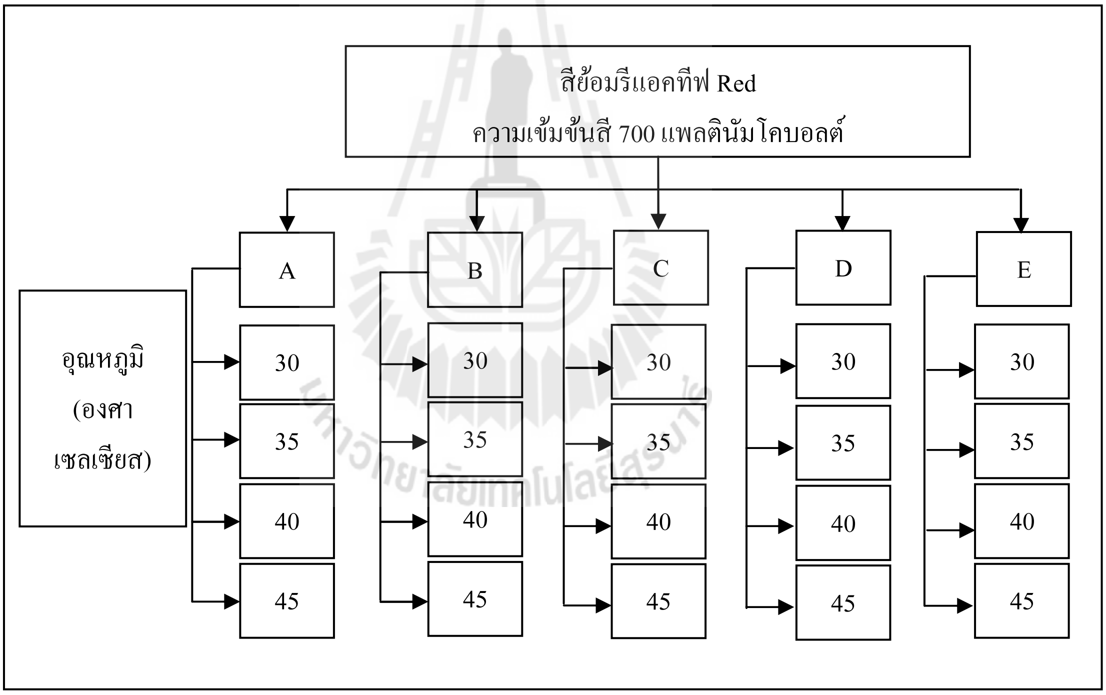
รูปที่ 3.8 แผนผังการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

3.8.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

นำ 200 มิลลิลิตร ของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้น 700 แพลตินัมโคบอลต์ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟให้อยู่ในช่วง 10.50±0.20 ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุหินดินดานรวมทั้งหมด 3 ชุดการทดลองแยกตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ โดยแต่ละชุดการทดลองจะบรรจุหินดินดานขนาด A B C D และ E น้ำหนัก 1.00 กรัม รวมทั้งหมด 20 ขวดต่อ 1 ชุดการทดลอง นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 30 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟที่เหลืออยู่ โดยในแต่ละชุดการทดลองทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายละเอียดของสภาวะในการศึกษาสรุปในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.10 สภาวะในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)	pH	เวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ปริมาณหิน (g)
Red	A	700	200	10.50	72	30 35 40 45	150	1.00
	B	700	200	10.50	72	30 35 40 45	150	1.00
	C	700	200	10.50	72	30 35 40 45	150	1.00
	D	700	200	10.50	72	30 35 40 45	150	1.00
	E	700	200	10.50	72	30 35 40 45	150	1.00



รูปที่ 3.9 แผนผังการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ
ของหินดินดานแต่ละชุดการทดลอง

3.9 การศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟในชุดทดลองคอลัมน์

3.9.1 การศึกษาสารติดตาม (Tracer Study)

การศึกษาสารติดตามโดยใช้วิธี Slug-Feed Test ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 900 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร สูง 0.50 เมตร ทุกๆ 10 นาที และหาความเข้มข้นของคลอไรด์ (Cl^-) ในน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์พลาสติก นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าเวลาเก็บกักที่แท้จริง (t_{Actual}) ดังสมการที่ 3.6 และคำนวณหาค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎี (t_{Theory}) ดังสมการที่ 3.7 (Metcalf and Eddy, 2004) รายละเอียดในการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข. ทำการ Trial and error เพื่อหาอัตราการไหลที่ทำให้ค่าเวลาเก็บกักที่แท้จริงกับค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกันเพื่อนำไปใช้ในการทดลองของชุดคอลัมน์ ผลแสดงดังรูปที่ 3.10 จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหล 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที (อัตราภาระชลศาสตร์ (Hydraulic Loading Rate : HLR) เท่ากับ 2.939ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อตารางเมตร) มีค่าเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงกับค่าเวลาเก็บกักทางทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริงต่อระยะเวลากักเก็บน้ำทางทฤษฎีอยู่ในช่วงร้อยละ 92.424-94.796 ดังแสดงในตารางที่ 3.11

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i} \tag{3.6}$$

$$t_{Theory} = \frac{V}{Q} = \frac{A(d_n n + d_w)}{Q} \tag{3.7}$$

โดย t_{Actual} คือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำที่แท้จริง (นาที)

t_{Theory} คือ ระยะเวลาเก็บกักน้ำทางทฤษฎี (นาที)

t_i คือ ระยะเวลาหนึ่ง ๆ ที่สารละลายออกจากระบบ (นาที)

C_i คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ออกจากระบบ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

Δt_i คือ ช่วงเวลาที่สารละลายออกจากระบบ

V คือ ปริมาตรน้ำในระบบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

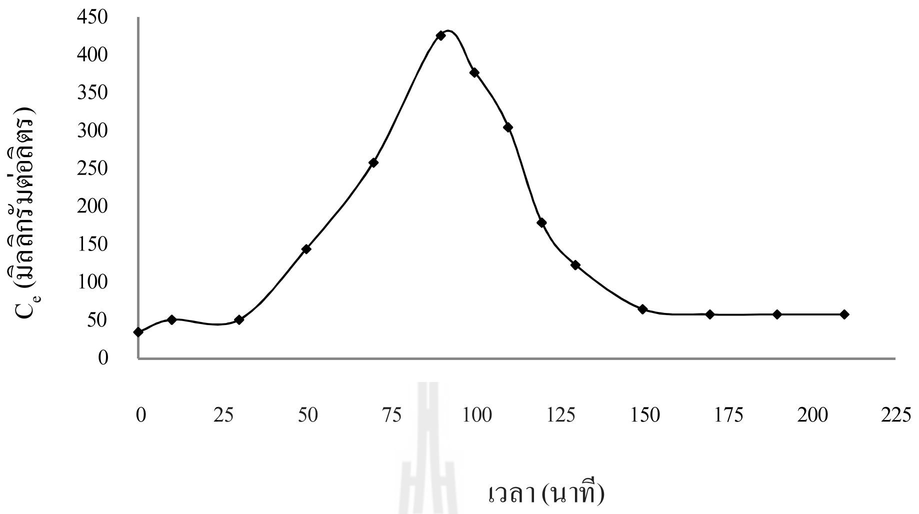
Q คือ อัตราการไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที)

d_n คือ ความลึกของตัวกลาง (เซนติเมตร)

n คือ ความพรุนของตัวกลาง

d_w คือ ความลึกของน้ำ (เซนติเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ของความเข้มข้นคลอไรด์กับเวลาในการศึกษาสารติดตาม

ตารางที่ 3.11 ผลการศึกษาสารติดตาม

ขนาดของหินดินดาน	ระยะเวลาเก็บกักน้ำ (นาที)		ร้อยละของค่า t_{Actual} ต่อ t_{Theory}
	t_{Actual}	t_{Theory}	
A	107.310	99.180	92.424
B	107.310	99.350	92.582
C	105.595	99.720	94.436
D	105.595	100.000	94.701
E	105.595	100.100	94.796

3.9.2 ศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

3.9.2.1 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

ศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยทำการทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 10.50±0.20 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 สีให้อยู่ในช่วง 700 แพลตินัมโคบอลต์ ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที (ผลการศึกษา

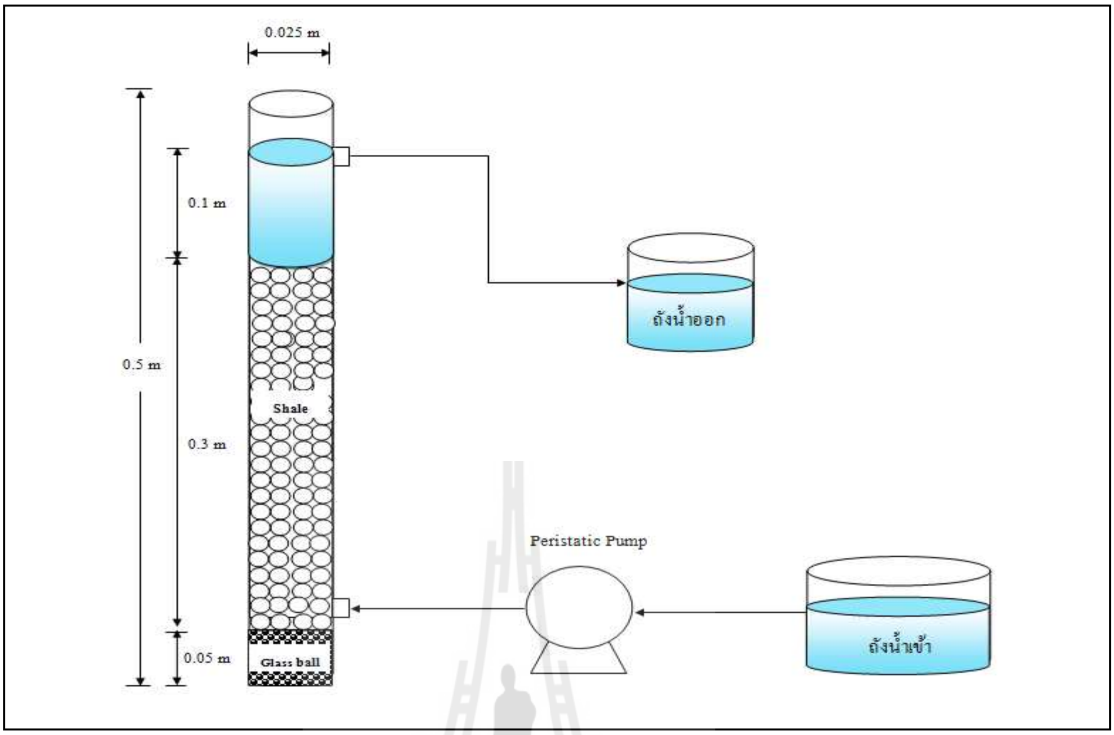
จากหัวข้อ 3.9.1) ทำการทดลองโดยนำหินดินดานขนาด A B C D และ E บรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร สูง 0.500 เมตร แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลองตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟชุดละ 5 คอลัมน์ รวมทั้งหมด 15 คอลัมน์ รายละเอียดของชุดทดลองคอลัมน์ดังแสดงในตารางที่ 3.12 รายละเอียดในการบรรจุหินดังแสดงในรูปที่ 3.11 และชุดทดลองคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.12 วัดปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นสีของสารละลายหลังจากไหลผ่านคอลัมน์มีค่าคงที่

3.9.2.2 สีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

ศึกษา Breakthrough curve ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานขนาด E โดยทำการทดลอง ณ สภาวะอุณหภูมิห้อง ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 10.50$\pm$0.20 และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 สีให้อยู่ในช่วง 700 แพลตินัมโคบอลต์ ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการทดลองโดยนำหินดินดานขนาด E บรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร สูง 0.500 เมตร แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลองตามชนิดของสีย้อมรีแอคทีฟ ชุดละ 1 คอลัมน์ รวมทั้งหมด 4 คอลัมน์ รายละเอียดชุดทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.13 และรายละเอียดในการบรรจุหินดังแสดงในรูปที่ 3.11 วัดปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 10 นาที จนกระทั่งความเข้มข้นสีของสารละลายหลังจากไหลผ่านคอลัมน์มีค่าคงที่

ตารางที่ 3.12 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง

สี	ขนาดหิน	อัตราภาระชลศาสตร์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อตารางเมตร)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	pH
Red	A	2.939	1.00	700	10.50
	B	2.939	1.00	700	10.50
	C	2.939	1.00	700	10.50
	D	2.939	1.00	700	10.50
	E	2.939	1.00	700	10.50



รูปที่ 3.11 แผนภาพจำลองชุดคอลัมน์

รูปที่ 3.12 ชุดทดลองคอลัมน์ที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 3.13 สภาวะในการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์

สี	ขนาดหิน	อัตราภาระชลศาสตร์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อตารางเมตร)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	pH
สีผสมที่ 1	E	2.393	1.00	700	10.50
สีผสมที่ 2	E	2.393	1.00	700	10.50
สีผสมที่ 3	E	2.393	1.00	700	10.50
สีผสมที่ 4	E	2.393	1.00	700	10.50

3.9.3 ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด โดยนำตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเลือกจากจุดเก็บ 3 จุด เพื่อนำมาพิจารณาในการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟในโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรี ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

1) น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี เป็นตัวแทนของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสีสูงและมีสารอินทรีย์เจือปนอยู่มากกว่าน้ำเสียอีก 2 จุด

2) น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ เป็นตัวแทนของน้ำเสียรวมของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีความเข้มข้นสี และมีสารอินทรีย์เจือปนอยู่ แต่ความเข้มข้นสีในน้ำเสียก่อนเข้าถังเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งจะมีความเข้มข้นสีต่ำกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

3) น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยทำการสุ่มตัวอย่างของน้ำทิ้งหลังผ่านถังตกตะกอนของระบบตะกอนเร่ง ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสีและสารอินทรีย์บางส่วนเหลืออยู่ ซึ่งน้ำเสียจากจุดนี้คาดว่าจะมีความเข้มข้นสีต่ำกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีและน้ำเสียก่อนเข้าถังเติมอากาศของระบบตะกอนเร่ง และมีปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์ต่ำกว่าน้ำเสียอีก 2 จุด เนื่องจากสารอินทรีย์และสีได้ถูกกำจัดไปบางส่วนด้วยระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง

ทำการทดลองโดยนำหินดินดานขนาด A B C D และ E บรรจุในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร สูง 0.500 เมตร แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลองตามจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ชุดละ 5 คอลัมน์ รวมทั้งหมด 15 คอลัมน์ รายละเอียดสภาวะของแต่ละชุดทดลองแสดงในตารางที่ 3.14 และรายละเอียดในการบรรจุหินแสดงดังรูปที่ 3.11 วัดความเข้มข้น

ของสีในน้ำเสียที่เหลืออยู่หลังจากไหลผ่านคอลัมน์ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นสีของน้ำหลังจากไหลผ่านคอลัมน์มีค่าคงที่

ตารางที่ 3.14 สภาวะในการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์แต่ละชุดการทดลอง

ตัวอย่างน้ำเสีย	ขนาดหิน	อัตราภาระชลศาสตร์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อตารางเมตร)	อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)
น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี	A	2. 939	1.00
	B	2. 939	1.00
	C	2. 939	1.00
	D	2. 939	1.00
	E	2. 939	1.00

3.10 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่ใช้ในการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์
ซีโอดี	Close Reflux Method
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	ทำให้แห้งที่ 103-105 องศาเซลเซียส
ของแข็งละลายทั้งหมด	ทำให้แห้งที่ 180 องศาเซลเซียส
สี	Platinum-Cobalt Method
ความเป็นกรด-ด่าง	pH meter
อุณหภูมิ	Thermometer

หมายเหตุ : อ้างอิง APHA AWWA and WEF (2005)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.11 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.11.1 วิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่ต่าง ๆ ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้สมการไอโซเทอมแบบ Langmuir ไอโซเทอมแบบ Freundlich และไอโซเทอมแบบ BET เพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับและเปรียบเทียบสมการแบบต่าง ๆ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษา

3.11.2 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.11.2.1 วิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาลักษณะสมบัติของหินดินดานเพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำไปเปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของวัสดุอื่น ๆ ที่ระบุในมาตรฐานต่าง ๆ

3.11.2.2 วิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาการเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำไปเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟว่าสอดคล้องกันหรือไม่

3.11.2.3 วิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow และสีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำไปเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟว่าสอดคล้องกันหรือไม่

3.11.2.4 วิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด เพื่อหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน นำไปเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟว่าสอดคล้องกันหรือไม่

3.11.2.5 วิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด โดยน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษามี 3 ตัวอย่าง คือ (1) น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี (2) น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ และ (3) น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำมาพิจารณาความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ลักษณะสมบัติของหินดินดาน

4.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

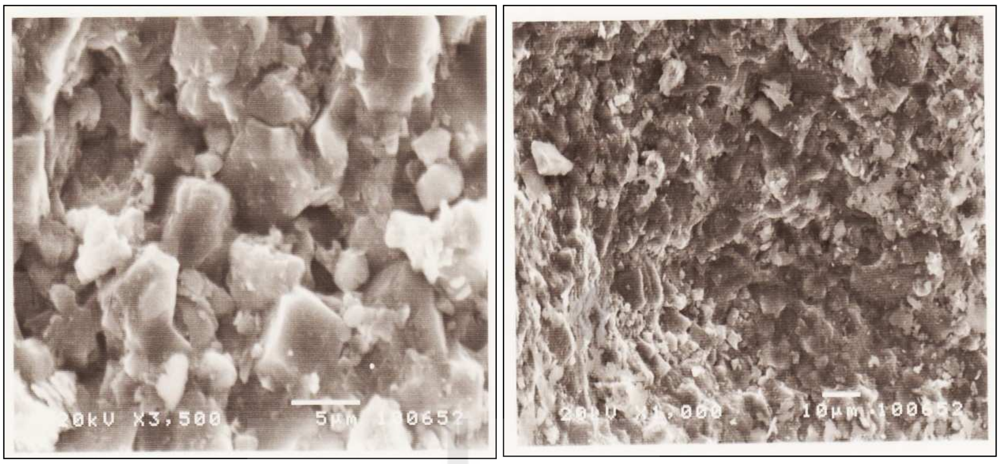
จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพสามารถจำแนกขนาดของตัวอย่างหินดินดานออกเป็น 5 ขนาด ได้แก่ (1) หินดินดาน A มีขนาด 1.00-2.00 มิลลิเมตร (2) หินดินดาน B มีขนาด 0.50-1.00 มิลลิเมตร (3) หินดินดาน C มีขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร (4) หินดินดาน D มีขนาด 0.18-0.25 มิลลิเมตร และ (5) หินดินดาน E มีขนาด 0.15-0.18 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และพบว่ามีพื้นที่ผิวจำเพาะเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 3.063 3.742 3.787 4.200 และ 5.117 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความสามารถในการดูดซับ โดยสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากย่อมมีค่าความสามารถในการดูดซับมาก (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะของหินดินดานทั้ง 5 ขนาด เปรียบเทียบกับสารดูดซับที่ไม่ผ่านการกระตุ้นที่นำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเช่นเดียวกัน พบว่าไคติน ไคโตซาน และเศษผงเหล็กขนาด 80-100 เมช (0.15-0.18 มิลลิเมตร) มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 10.14 6.86 และ 5.28 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ (วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547; Dolphen, 2005; Sakkayawong, 2005) ซึ่งใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของหินดินดานที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ และนอกจากนี้หินดินดานยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วงเดียวกับกรวดและทรายซึ่งใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ (Ojstrsek et al., 2007; Bulc and Ojstrsek, 2008) โดยกรวดและทรายมีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 0.08-11.00 ตารางเมตรต่อกรัม (Tokunaga et al., 2003; Prochaska and Zouboulis, 2005) ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารอาหารและสารมลพิษของตัวกลางเหล่านั้น โดยตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ก็มีความสามารถในการดูดซับสารอาหารไว้มาก เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลาย และพืชในระบบสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; Drizo et al., 1999; Metcalf and Eddy, 2004)

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของหินดินดาน

หินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)	
				ขนาดเล็ก	ขนาดกลางและใหญ่
A	1.00-2.00	3.063	166.10	0.00124 (9.75%)	0.01148 (90.25%)
B	0.50-1.00	3.742	178.60	0.00153 (9.16%)	0.01517 (90.84%)
C	0.25-0.50	3.787	134.20	0.00120 (9.44%)	0.01151 (90.56%)
D	0.18-0.25	4.200	150.10	0.00157 (9.96%)	0.01419 (90.04%)
E	0.15-0.18	5.117	122.30	0.00208 (13.29%)	0.01357 (86.71%)

จากผลการศึกษาพบว่ารูพรุนบนผิวของหินดานเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ตามมาตรฐาน IUPAC โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 122.30-178.60 อังสตรอม ซึ่งสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงเดียวกับหินดินดานซึ่งเป็นรูพรุนขนาดกลางมักถูกนำไปใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สารฟอกสี เป็นต้น (นภารัตน์ จิวาลักษณ์, 2545) โดยปริมาตรรูพรุนของหินดินดานขนาด A-E ส่วนใหญ่จะเป็นปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่คิดเป็นร้อยละ 86.709-90.838 ของปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของอนุภาคหินดินดานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 และ 3500 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าอนุภาคของหินดินดานหนาแน่นมากจนไม่สามารถเห็นลักษณะรูพรุน

เมื่อนำตัวอย่างหินดินดานแต่ละขนาดมาวัดค่าความหนาแน่นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.156-1.253 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าความพรุนอยู่ในช่วงร้อยละ 33-34 (ตารางที่ 4.2) จะเห็นได้ว่าหินดินดานขนาด A-E มีค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนไม่แตกต่างกัน สำหรับความพรุนของตัวกลางที่ใช้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มักมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30.0-54.4 (U.S. EPA, 2000) โดยความพรุนของตัวกลางจะมีผลต่อการไหลของน้ำในระบบ และมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของตัวกลาง (Yang et al., 2001; Kadlec and Knight, 1996)



ก) กำลังขยาย 1000 เท่า　　ข) กำลังขยาย 3500 เท่า

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของอนุภาคหินดินดานด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 3500 เท่า

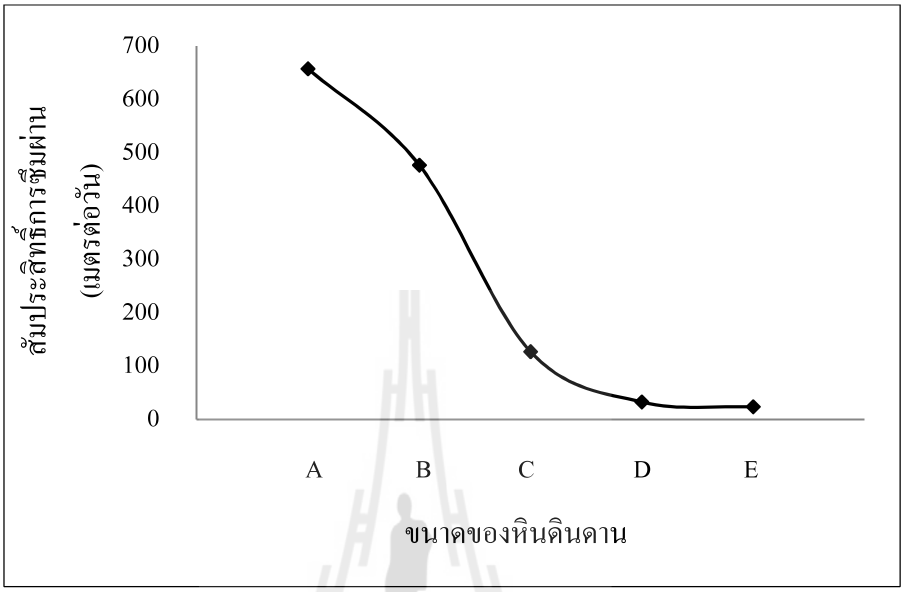
ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของหินดินดาน

หินดินดาน	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความพรุน (ร้อยละ)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (เมตรต่อวัน)
A	1.00-2.00	1.253	34	657.504
B	0.50-1.00	1.236	34	476.978
C	0.25-0.50	1.189	33	127.035
D	0.18-0.25	1.165	33	32.801
E	0.15-0.18	1.156	33	23.634

หินดินดานมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน A > B > C > D > E โดยมีค่าเท่ากับ 657.504 476.978 127.035 32.801 และ 23.634 เมตรต่อวัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าหินดินดานขนาด A-C มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่ากับกรวด ซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้สูง และหินดินดานขนาด D-E มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเทียบเท่ากับทรายหยาบ ซึ่งมีความสามารถในการระบายน้ำได้ปานกลาง (สถาพร คูวิจิตรจารุ, 2542; มณเฑียร กังศศิเทียม, 2539) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่มี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่ามากแสดงให้เห็นถึงการมีคุณสมบัติในการระบายน้ำได้สูง ช่วยลดการอุดตันของระบบกรอง (Metcalf and Eddy, 2004)



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับขนาดของหินดินดาน

4.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีของหินดินดาน

จากผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหินดินดานแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของหินดินดานประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 57.80 อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 17.20 แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 11.80 และเฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 6.40 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อมรา ดาวไธสง (2550) ซึ่งพบว่าหินดินดานมีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ซิลิกอน อลูมิเนียม และแคลเซียม เป็นต้น จากผลการศึกษาของ เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์ (2544); Rao, B. V. V., and Rao, M. S (2006) พบว่าสารดูดซับที่มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกอนและอลูมิเนียมจะมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ดังนั้นหินดินดานจึงมีแนวโน้มที่จะนำมาใช้เป็นสารดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้ผลการตรวจวิเคราะห์พบว่าหินดินดานมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.46-7.46 และมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในช่วง 5.559-5.990 มิลลิอิคิววาเลนซ์ต่อ 100 กรัม โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับสารละลาย โดยค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินทรียวัตถุและค่าความเป็นกรด-ด่างของหินดินดาน (กรมวิชาการเกษตร, 2546) ค่าการดูดซับไอโอดีนของหินดินดานมีค่าเท่ากับ 11.30 มิลลิกรัมต่อกรัม

ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับสารโมเลกุลขนาดเล็กของหินดินดาน (Patnukao and Pavasant, 2008)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของหินดินดาน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	57.8
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	17.2
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	11.8
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	6.4
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	2.9
แมงกานีสออกไซด์ (MgO)	1.9
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.52

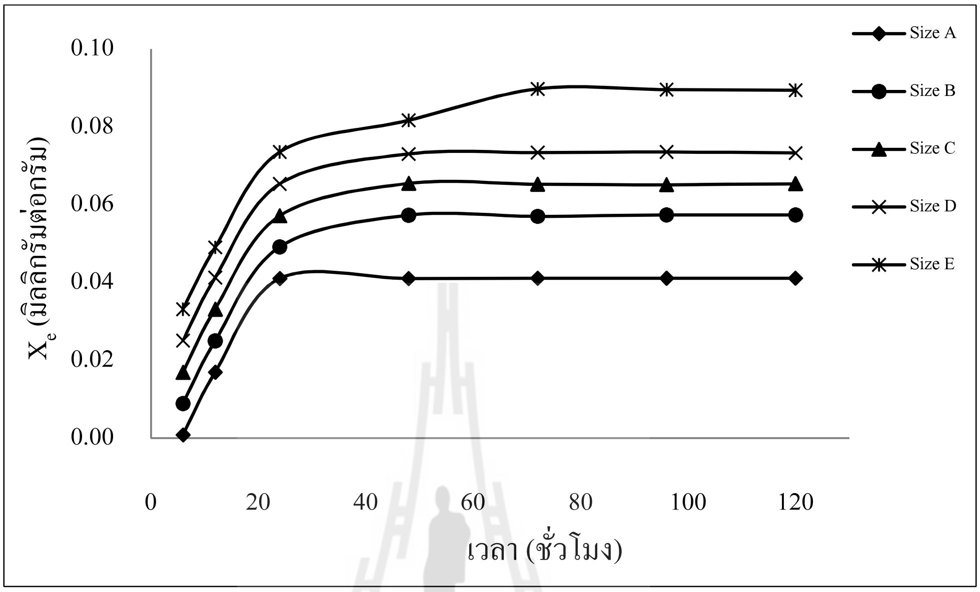
4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

จากการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด ซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 700 แพลตินัมโคบอลต์ โดยมีระยะเวลาสัมผัสอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6-120 ชั่วโมง มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดาน พบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานแต่ละขนาดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมงโดยเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสมากกว่า72 ชั่วโมง พบว่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยสามารถเรียงลำดับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 0.0896 0.0732 0.0654 0.0573 และ 0.0411 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานที่ระยะเวลาสัมผัส72 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่

เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน จึงอยู่ภายในช่วงระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง



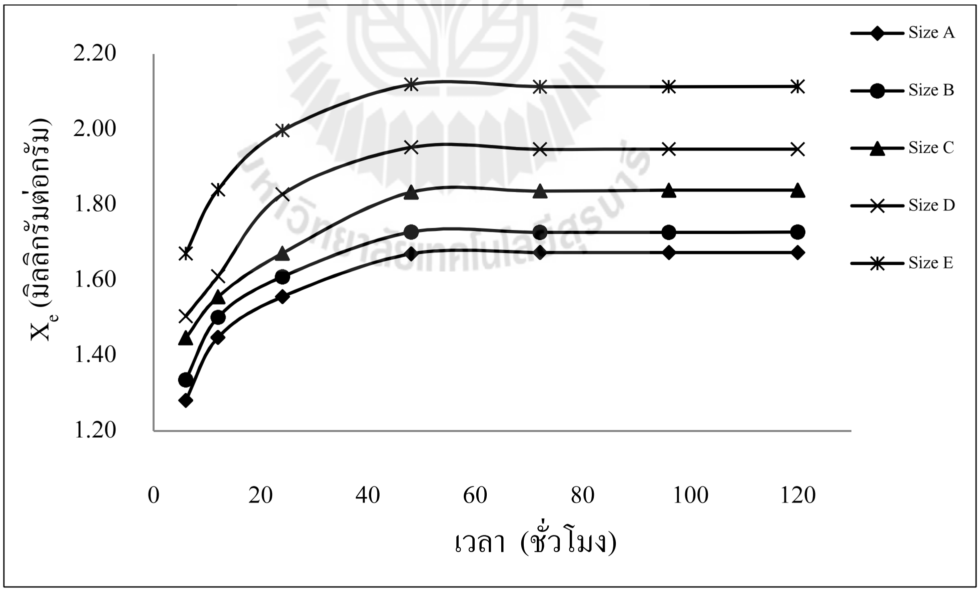
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานขนาด A B C D และ E

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาดที่ระยะเวลาสัมผัส 72 และ 120 ชั่วโมง

หินดินดาน	ปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดาน (มิลลิกรัมต่อกรัม)					
	สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red		สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue		สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow	
	72 ชั่วโมง	120 ชั่วโมง	72 ชั่วโมง	120 ชั่วโมง	72 ชั่วโมง	120 ชั่วโมง
A	0.0411	0.0411	1.6729	1.6729	0.3082	0.3090
B	0.0570	0.0573	1.7259	1.7268	0.3404	0.3404
C	0.0652	0.0654	1.8358	1.8373	0.3569	0.3569
D	0.0730	0.0732	1.9467	1.9469	0.4270	0.4271
E	0.0894	0.0896	2.1127	2.1129	0.4513	0.4513

4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

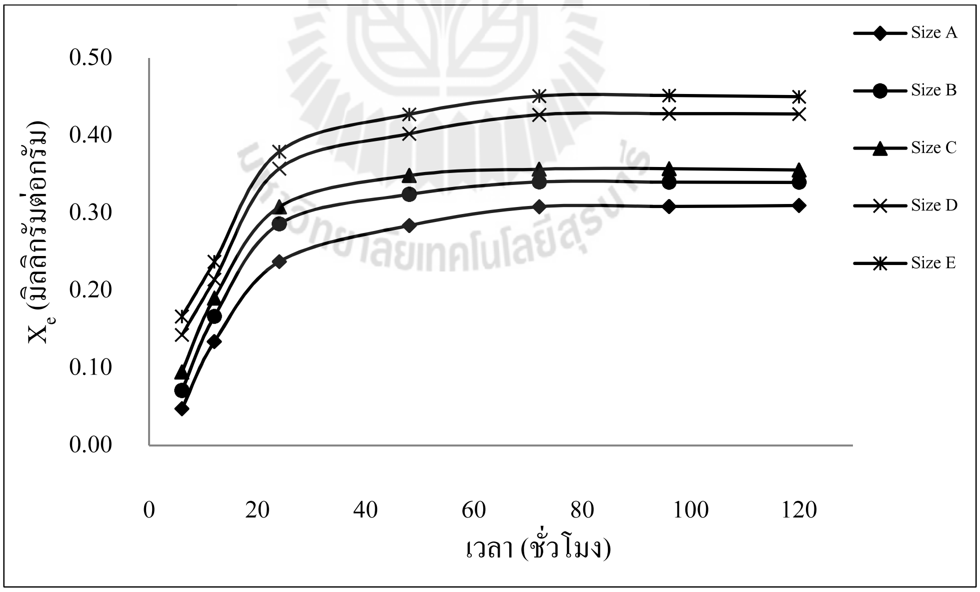
จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดาน พบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานแต่ละขนาดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมงโดยเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสมากกว่า 72 ชั่วโมง พบว่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยสามารถเรียงลำดับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 2.1129 1.9469 1.8373 1.7268 และ 1.6729 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานจึงอยู่ภายในช่วงระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานขนาด A B C D และ E

4.2.3 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

จากรูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดาน พบว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมงโดยเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส มากกว่า 72 ชั่วโมง พบว่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยสามารถเรียงลำดับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 0.4513 0.4271 0.3569 0.3404 และ 0.3090 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานจึงอยู่ภายในช่วงระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานขนาด A B C D และ E

4.2.4 สรุปผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด พบว่าในช่วงระยะเวลาสัมผัส 48 ชั่วโมงแรกการดูดซับ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและหลังจากนั้นการดูดซับจะค่อยเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ โดยจะเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง และมีค่าปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานสูงสุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 ชั่วโมง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานเท่ากับ 72 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ozacar and Sengil (2003) ซึ่งศึกษาผลของ ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Blue 114 (2) Reactive Yellow 64 และ (3) Reactive Red 124 ของ Calcined alunite พบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของ Calcined alunite มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณมากทำให้อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปอัตราการดูดซับซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมจากภายนอกเข้าสู่พื้นที่ภายในอนุภาคสารดูดซับจะเริ่มช้าลง (Amin, 2008) และเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับอื่น ๆ ที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ พบว่าสารดูดซับที่เกิดจากการผสมกากตะกอนโรงกรองน้ำและกากตะกอนโรงงานกระดาษทั้งเคลือบและไม่เคลือบไคโตซาน และสารดูดซับประเภทเม็ดไคโตซานมีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากับ 72 ชั่วโมง (ชนิสา หงอสุวรรณ, 2548; Wu et al., 2000) เช่นเดียวกับหินดินดาน

4.3 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

4.3.1 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

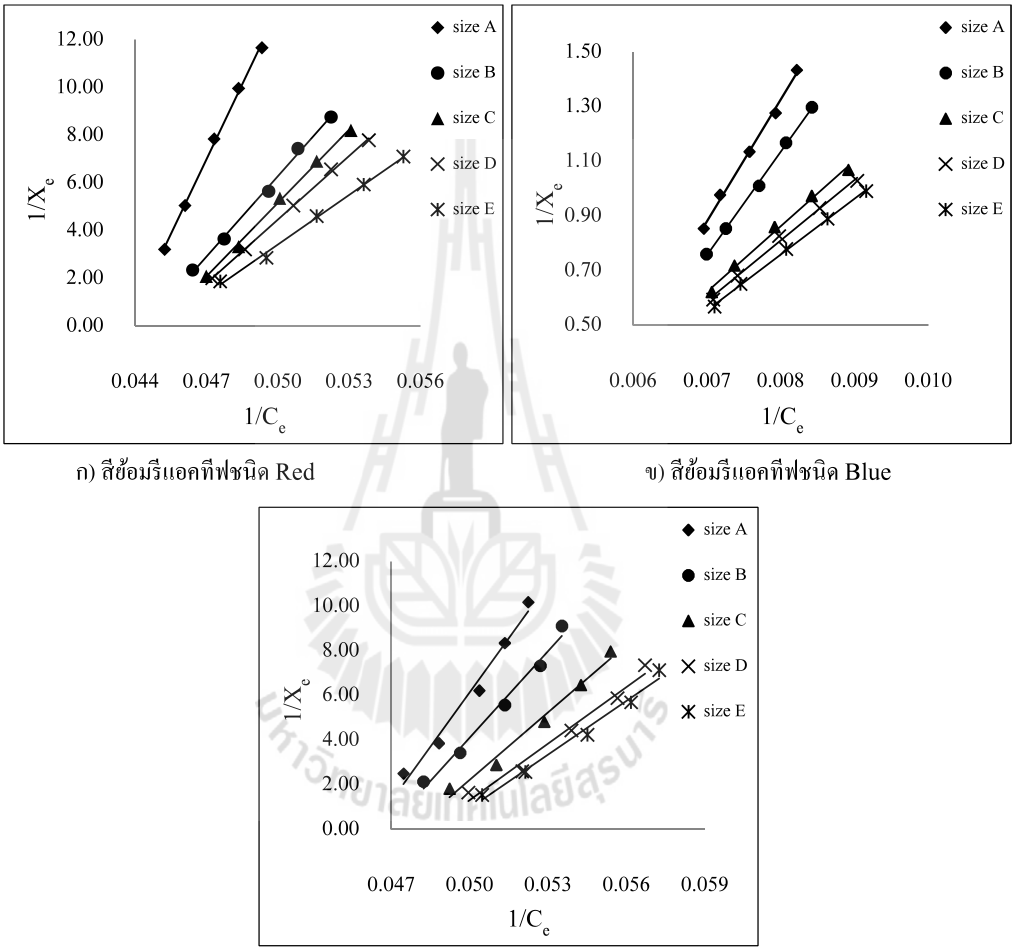
จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาด (ภาคผนวก ค.) นำข้อมูลผลการศึกษามาทดสอบโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับ 3 ชนิด คือ สมการของ Langmuir (สมการที่ 2.3) สมการของ Freundlich (สมการที่ 2.5) และสมการของ BET (สมการที่ 2.7) โดยนำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/X_e$ กับค่า $1/C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก-ค) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ เมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ข้อมูลโดยไอโซเทอมการ

ดูดซับแบบ Freundlich จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log X_e กับ log C_e เป็นกราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ก-ค) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ข้อมูลโดยไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET (ภาคผนวก ง.) ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/((C_s-C_e)X_e)$ กับ C_e/C_s เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ B ได้จากค่าความชันและจุดตัดบนแกน y ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET (ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น โดยมีสมมุติฐานว่าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นแหล่งที่เกิดการดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) (R^2 เป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าข้อมูลจากการศึกษาเข้ากับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบใดได้ดีกว่ากัน โดยถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลจากการศึกษาเข้ากับสมการไอโซเทอม การดูดซับนั้น ๆ ได้ดี ซึ่งเหมาะที่จะนำไอโซเทอมการดูดซับนั้นมาอธิบายการดูดซับ) อยู่ในช่วง 0.8547-0.9696 0.8302-0.9507 และ 0.9703-0.9825 สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า R^2 ที่ได้จากไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich ซึ่งจากค่า R^2 แสดงให้เห็นว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich มีความเหมาะสมที่จะนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET และเมื่อพิจารณาค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir (ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีสมมุติฐานว่าจะไม่เกิดการดูดซับซ้อนทับกันและมีตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอน) และแบบ Freundlich (ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้นบนสารดูดซับที่มีพื้นผิวของการดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน) พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่าสูงกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีลักษณะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และประกอบกับผลการศึกษาผลของอุณหภูมิ (หัวข้อ 4.4.3) ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานเป็นการดูดซับแบบเคมี ซึ่งการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของหินดินดานกับโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟ

4.3.1.1 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9960-0.9991 และมีค่า X_m ซึ่งแสดงความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน

แต่ละขนาด เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0322 0.0252 0.0218 0.0202 และ 0.0110 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0449 0.0448 0.0447 0.0441 และ 0.0434 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ก) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

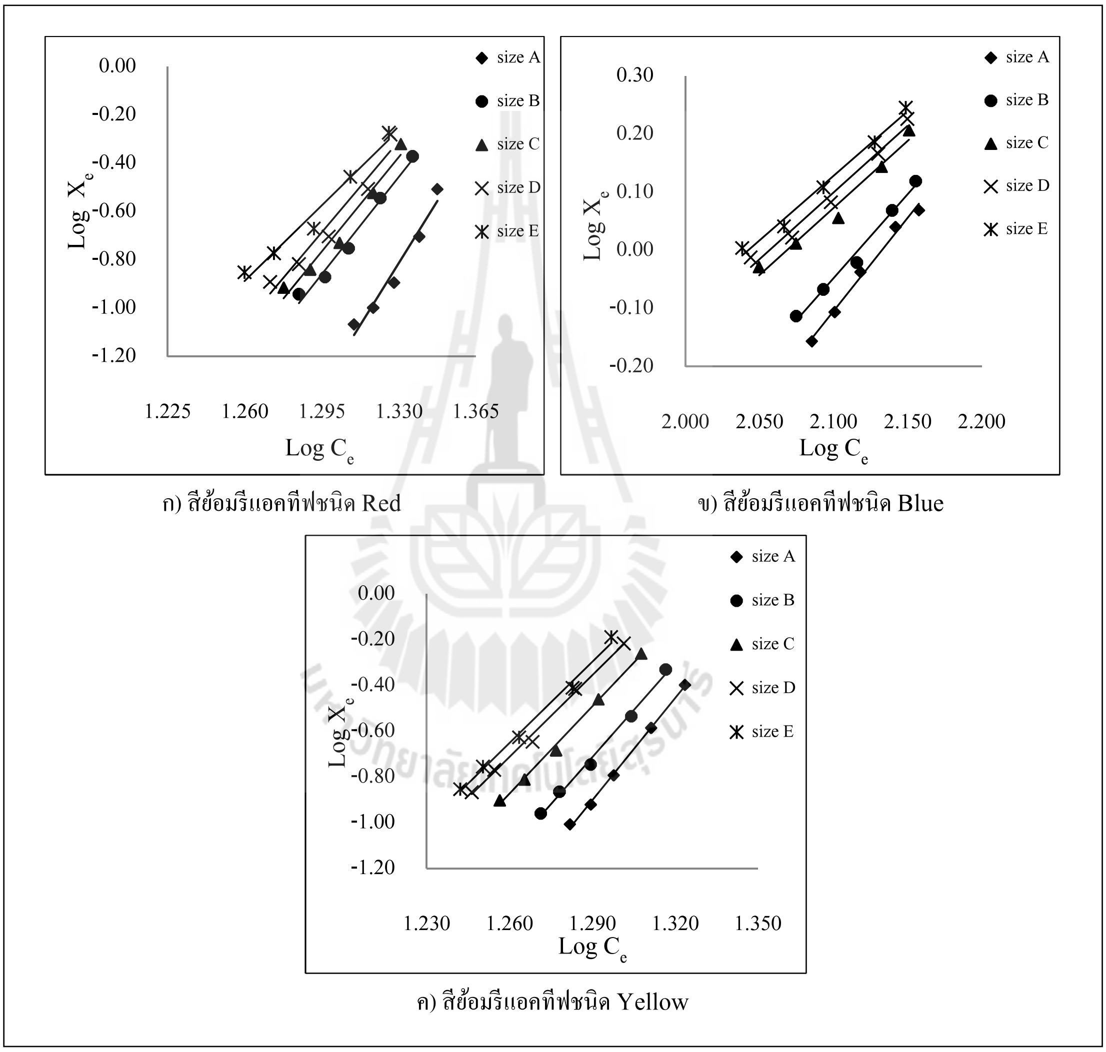
ข) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

ค) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

รูปที่ 4.6 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9512-0.9845 และมีค่า K_f ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานแต่ละขนาด

เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 7.533×10^{-13} 2.075×10^{-15} 5.728×10^{-16} 1.718×10^{-16} และ 5.236×10^{-21} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ nอยู่ในช่วง 0.0683-0.1121 โดยค่า n แสดงถึงแรงของการยึดติดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้า n < 1 แสดงถึงสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับยึดติดกันไม่ดี ถ้า n > 1 แสดงถึงสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับยึดติดกันดี



ก) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

ข) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

ค) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน แต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 มากกว่า ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานได้

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดานแต่ละขนาดโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.0110	0.0434	0.9978	0.0683	5.236×10^{-21}	0.9625
B	0.0202	0.0441	0.9963	0.0869	1.718×10^{-16}	0.9845
C	0.0218	0.0447	0.9979	0.0895	5.728×10^{-16}	0.9685
D	0.0252	0.0448	0.9991	0.0925	2.075×10^{-15}	0.9512
E	0.0322	0.0449	0.9960	0.1121	7.533×10^{-13}	0.9718

4.3.1.2 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9933-0.9990 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 1.1409 1.0392 0.9398 0.5291 และ 0.4479 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน A > B > C > D > E มีค่าเท่ากับ 0.0050 0.0050 0.0044 0.0043 และ 0.0043 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9705-0.9900 และมีค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 2.785×10^{-5}

1.884 x 10^{-5} 1.694 x 10^{-5} 7.619 x 10^{-7} และ 1.355 x 10^{-7} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.3105-0.4496

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดาน แต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานได้

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.4479	0.0050	0.9961	0.3105	1.355 x 10^{-7}	0.9900
B	0.5291	0.0050	0.9987	0.3459	7.619 x 10^{-7}	0.9876
C	0.9397	0.0044	0.9933	0.4335	1.694 x 10^{-5}	0.9705
D	1.0392	0.0043	0.9939	0.4352	1.884 x 10^{-5}	0.9804
E	1.1409	0.0043	0.9990	0.4496	2.875 x 10^{-5}	0.9889

4.3.1.3 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9757-0.9846 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0255 0.0245 0.0207 0.0165 และ 0.0133 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0488 0.0485 0.0478 0.0468 และ 0.0462 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9929-0.9983 และมีค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 2.661×10^{-16} 1.982×10^{-16} 1.233×10^{-17} 4.036×10^{-19} และ 8.375×10^{-21} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.0673-0.0844

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow มากที่สุด รองลงมาได้แก่หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานได้

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.0133	0.0462	0.9798	0.0673	8.375×10^{-21}	0.9983
B	0.0165	0.0468	0.9846	0.0730	4.036×10^{-19}	0.9945
C	0.0207	0.0478	0.9822	0.0786	1.233×10^{-17}	0.9966
D	0.0245	0.0485	0.9757	0.0841	1.982×10^{-16}	0.9946
E	0.0255	0.0488	0.9835	0.0844	2.661×10^{-16}	0.9929

4.3.1.3 สรุปผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด สามารถอธิบายโดยไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ได้ดีที่สุดและผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอทีฟ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานเป็นการ

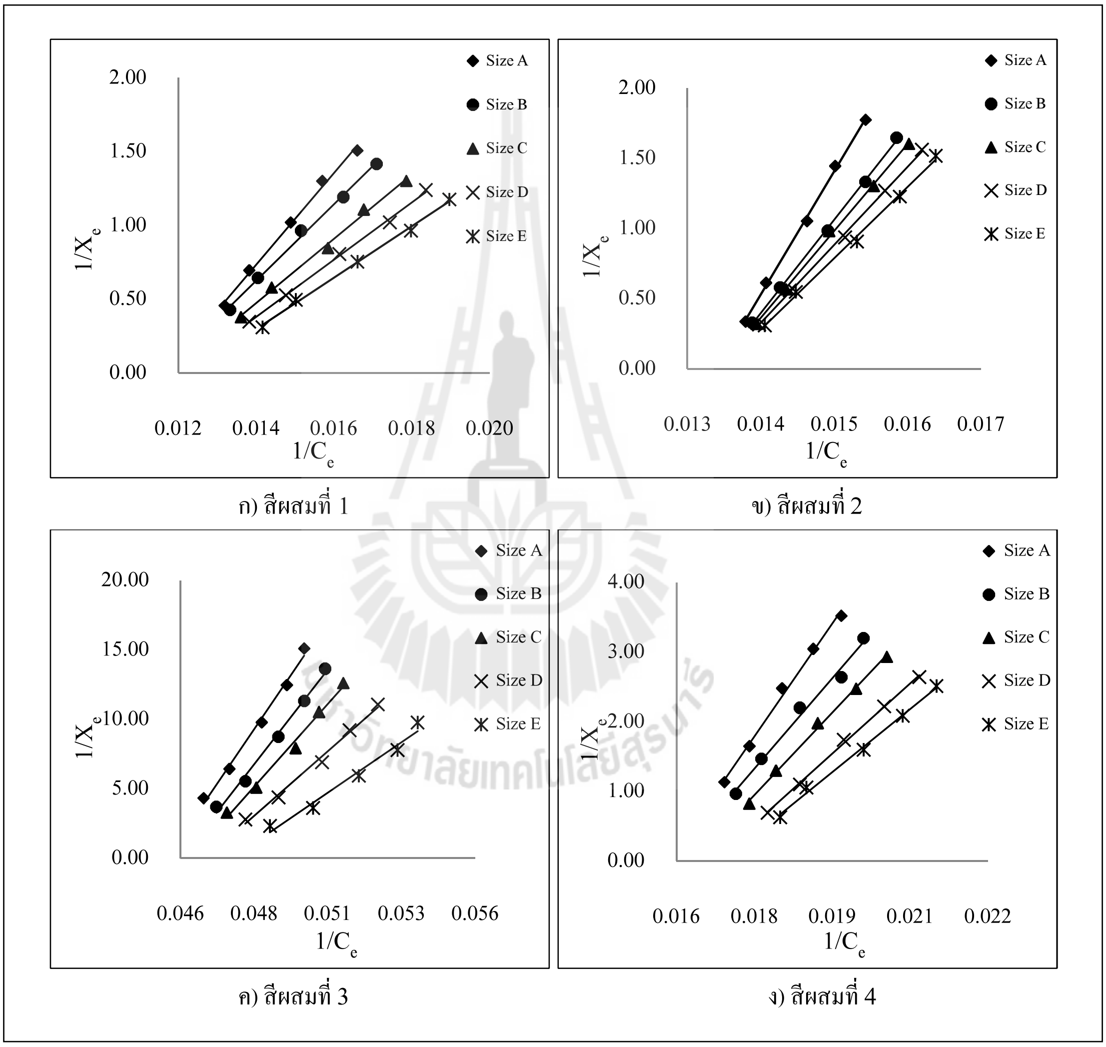
ดูดซับทางเคมี โดยการดูดซับจะทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างอะตอมที่ผิวหน้าของหินดินดานกับโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าหินดินดานมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.4479-1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานขนาด A-E กับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโทนสีแดง น้ำเงิน และเหลือง ซึ่งได้จากผลการศึกษาของงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าหินดินดาน ซึ่งไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดมากกว่าสารดูดซับจากเศษผงเหล็ก แต่มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดน้อยกว่าสารดูดซับชนิดเม็ดเคโอลิน เม็ดตะกอนผสม Untreated Alunite และClinoptilolite ซึ่งในการนำกระบวนการดูดซับของหินดินดานไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมให้เหมาะสมและคุ้มค่ากับการดำเนินการ นอกจากจะพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับแล้ว ควรพิจารณาปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมที่ใช้ในการเดินระบบและรูปแบบในการนำไปใช้ร่วมด้วย

ตารางที่ 4.8 ค่าความสามารถในการดูดซับรีแอคทีฟของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ

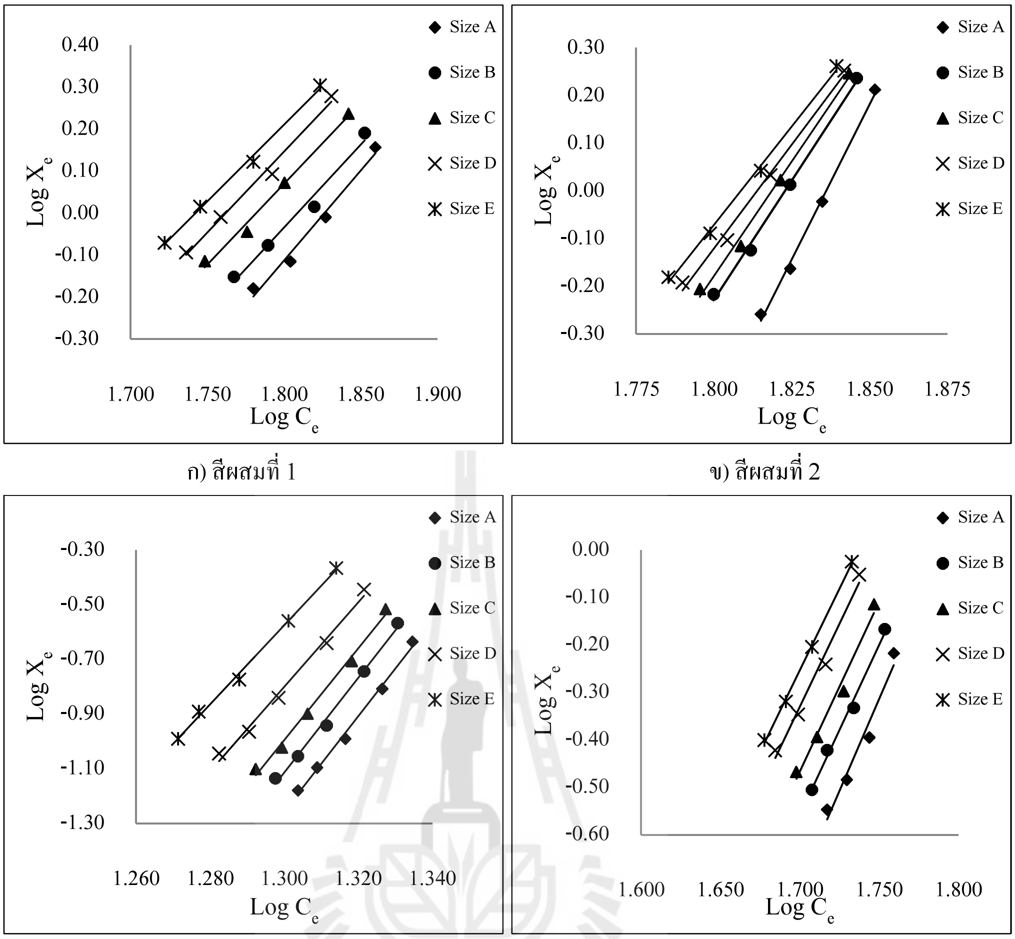
ชนิดของสารดูดซับ	ชนิดของสีย้อม	X_m (mg/g)	อ้างอิง
เม็ดเคโอลิน	Reactive Blue 141	4.3879	สุกานดา กาสังข์ (2548)
เม็ดตะกอนผสม	Reactive Blue 141	4.7916	
Clinoptilolite	Reactive Blue 21	9.6520	Sismanoglu et al. (2010)
	Reactive Red 195	3.1860	
Untreated Alunite	Reactive Yellow 64	5.0000	Ozacar and Sengil (2003)
	Reactive Blue 114	2.9200	
	Reactive Blue 124	2.8500	
เศษผงเหล็ก	Reactive Blue	0.0114	วรรณวิภา ผลาหาญ (2547)
	Reactive Red	0.0503	
	Reactive Yellow	0.0122	
หินดินดานขนาด 0.15-2.00 มิลลิเมตร	สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red	0.0114-0.0322	ผลการศึกษาครั้งนี้
	สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue	0.4479-1.1409	
	สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow	0.0133-0.0255	

4.3.2 ผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ

จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมผสมรีแอคทีฟแต่ละชนิดที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของหินดินดานแต่ละขนาด (ภาคผนวก ค.) นำผลการศึกษามาวิเคราะห์โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich ได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก-ง) และ 4.9 (ก-ง) ตามลำดับ และนำไปหาค่าคงที่ต่าง ๆ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟแต่ละชนิดสำหรับหินดินดาน A B C D และ E



ก) สีผสมที่ 1 ข) สีผสมที่ 2

ค) สีผสมที่ 3 ง) สีผสมที่ 4

รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของสีย้อมผสมรีแอคทีฟแต่ละชนิด สำหรับหินดินดาน A B C D และ E

4.3.2.1 สีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9949-0.9980 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ0.4662 0.4294 0.3888 0.3328 และ 0.2767 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0123 0.0120 0.0118 0.0117 และ 0.0116 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9810-0.9958 และมีค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 4.180×10^{-7} 1.572×10^{-7} 1.378×10^{-7} 7.264×10^{-8} และ 1.456×10^{-8} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.2330-0.2731

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 ของหินดินดานแต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 ของหินดินดานได้

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.2767	0.0116	0.9949	0.2330	1.456×10^{-8}	0.9816
B	0.3328	0.0117	0.9960	0.2533	7.264×10^{-8}	0.9810
C	0.3888	0.0118	0.9956	0.2597	1.378×10^{-7}	0.9902
D	0.4294	0.0120	0.9980	0.2597	1.572×10^{-7}	0.9899
E	0.4662	0.0123	0.9967	0.2731	4.180×10^{-7}	0.9958

4.3.2.2 สีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9971-0.9991 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.1464 0.1338 0.1206 0.1122 และ 0.0852 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับ จากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.01345 0.01342 0.01341 0.01340 และ 0.01339 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9962-0.9967 และมีค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 1.197×10^{-15} 1.603×10^{-16} 3.296×10^{-18} 5.598×10^{-19} และ 1.318×10^{-24} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.0769-0.1212

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 ของหินดินดานแต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 ของหินดินดานได้

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.0852	0.01339	0.9984	0.0769	1.318×10^{-24}	0.9962
B	0.1122	0.01340	0.9991	0.0999	5.598×10^{-19}	0.9963
C	0.1206	0.01341	0.9981	0.1040	3.296×10^{-18}	0.9936
D	0.1338	0.01342	0.9988	0.1148	1.603×10^{-16}	0.9930
E	0.1464	0.01345	0.9971	0.1212	1.197×10^{-15}	0.9967

4.3.2.3 สีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9734-0.9921 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0146 0.0115 0.0091 0.0081 และ 0.0071 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0472 0.0464 0.0458 0.0455 และ 0.0450 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9908-0.9966 และมีค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 4.256×10^{-20} 1.239×10^{-21} 1.452×10^{-23} 2.044×10^{-24} และ 1.330×10^{-24} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.05747-0.06916

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.0071	0.0450	0.9915	0.0575	1.330×10^{-24}	0.9942
B	0.0081	0.0455	0.9921	0.0576	2.044×10^{-24}	0.9934
C	0.0091	0.0458	0.9898	0.0595	1.452×10^{-23}	0.9930
D	0.0115	0.0464	0.9901	0.0647	1.239×10^{-21}	0.9908
E	0.0146	0.0472	0.9734	0.0692	4.256×10^{-20}	0.9966

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 ของหินดินดานแต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอม การดูดซับแบบ Freundlich มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 ของหินดินดานได้

4.3.2.4 สีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir สามารถคำนวณหาค่าคงที่ X_m และ K ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9879-0.9985 โดยมีค่า X_m เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0978 0.0891 0.0778 0.0723 และ 0.0586 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 0.0169 0.0167 0.0163 0.0160 และ 0.0158 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich สามารถคำนวณหาค่าคงที่ n และ K_f ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 โดยมี R^2 อยู่ในช่วง 0.9621-0.9987 และมี

ค่า K_f เรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A มีค่าเท่ากับ 1.148 x 10^{-12} 5.970 x 10^{-13} 2.286 x 10^{-13} 1.683 x 10^{-13} และ 1.406 x 10^{-14} มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ n อยู่ในช่วง 0.1293-0.1455

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich

หินดินดาน	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	X_m (mg/g)	K (mg/g)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2
A	0.0586	0.0158	0.9940	0.1293	1.406 x 10^{-14}	0.9621
B	0.0723	0.0160	0.9917	0.1395	1.683 x 10^{-13}	0.9911
C	0.0778	0.0163	0.9971	0.1396	2.286 x 10^{-13}	0.9806
D	0.0891	0.0167	0.9985	0.1429	5.970 x 10^{-13}	0.9840
E	0.0978	0.0169	0.9994	0.1455	1.148 x 10^{-12}	0.9987

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 ของหินดินดานแต่ละขนาดที่แสดงโดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และแบบ Freundlich จะเห็นว่าค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 ของหินดินดานแต่ละขนาดมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกัน โดยหินดินดาน E ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดมีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 มากที่สุดรองลงมา ได้แก่หินดินดาน D > C > B > A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า R^2 ของผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากทั้งสองไอโซเทอม พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 0.9500 โดยสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich มีค่า R^2 มากกว่าไอโซเทอม การดูดซับแบบ Langmuir เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับทั้งสองแบบสามารถนำมาอธิบายการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 ของหินดินดานได้

4.3.2.4 สรุปผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟ

จากผลการศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 มากที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.2767-0.4662 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดของหินดินดาน

ขนาด A-E กับสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่ไม่ใช่สีย้อมรีแอคทีฟโทนสีแดง น้ำเงิน และเหลือง ซึ่งได้จากผลการศึกษาของงานวิจัยอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าหินดินดานซึ่งไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าความสามารถในการดูดซับมากว่าสารดูดซับที่ไม่ผ่านการกระตุ้นอื่น ๆ เช่น เศษผงเหล็กซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.0070 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าใกล้เคียงกับสารดูดซับชนิด Anodonta Shell ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.436 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่มีค่าน้อยกว่า Squid pens และ Sepia pens ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 3.460-4.830 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟกับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานขนาด A-E พบว่าสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 และ 4 มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue แต่มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red และ Yellow ส่วนสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 มีค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อเทียบกับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

ตารางที่ 4.13 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ

ชนิดของสารดูดซับ	ชนิดของสีย้อม	X_m (mg/g)	อ้างอิง
Squid pens	Reactive Green 12	4.8300	Figueiredo et al. (2000)
Anodonta Shell	Reactive Green 12	0.4360	
Sepia pens	Reactive Green 12	3.4600	
เศษผงเหล็ก	Reactive black	0.0070	วรรณวิภา ผลาหาญ (2547)
หินดินดานขนาด 0.15-2.00 มิลลิเมตร	สีผสมที่ 1	0.2767-0.4662	ผลการศึกษาครั้งนี้
	สีผสมที่ 2	0.0852-0.1464	
	สีผสมที่ 3	0.0071-0.0146	
	สีผสมที่ 4	0.0586-0.0978	

4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดาน

4.4.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

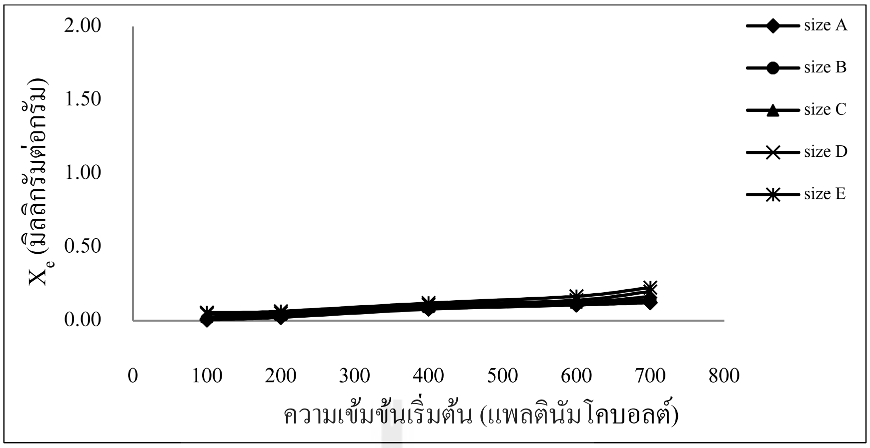
ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยศึกษาในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 100-700 แพลตินัมโคบอลต์ นำข้อมูลผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ดังแสดงในรูปที่ 4.10ก 4.10ข และ 4.10ค ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากค่าความชันของกราฟและค่าความสามารถในการดูดซับ (ตารางที่ 4.14) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด และค่าความสามารถในการดูดซับเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดานE > D > C > B > A โดยค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าเท่ากับ 0.2234 0.1984 0.1637 0.1382 และ 0.1212 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มีค่าเท่ากับ 1.8728 1.7297 1.5785 1.2850 และ 0.9903 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow มีค่าเท่ากับ 0.2650 0.2236 0.1995 0.1742 และ 0.1406 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

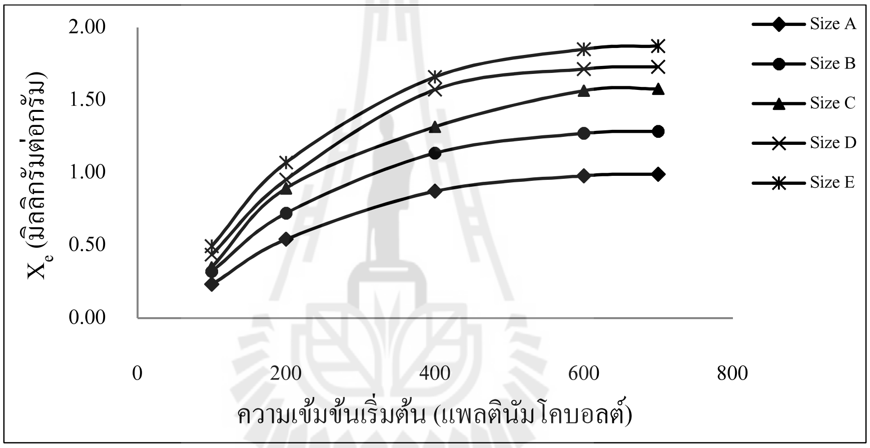
ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด
ในสภาวะปัจจัยต่าง ๆ

สีย้อม	หินดินดาน	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
		ความเป็นกรด-ด่าง (pH 2.00)	อุณหภูมิ (45 องศาเซลเซียส)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (700 แพลตินัมโคบอลต์)
Red	A	0.1795	0.0942	0.1212
	B	0.1921	0.1198	0.1382
	C	0.1922	0.1285	0.1637
	D	0.2298	0.1367	0.1984
	E	0.2813	0.1704	0.2234
Blue	A	1.5804	0.5275	0.9903
	B	1.7857	0.5861	1.2850
	C	1.8757	0.7022	1.5785
	D	1.9363	0.7633	1.7297
	E	2.0553	0.8778	1.8728
Yellow	A	0.1421	0.1155	0.1406
	B	0.1795	0.1489	0.1742
	C	0.2008	0.1829	0.1995
	D	0.2337	0.2164	0.2236
	E	0.2711	0.2661	0.2650

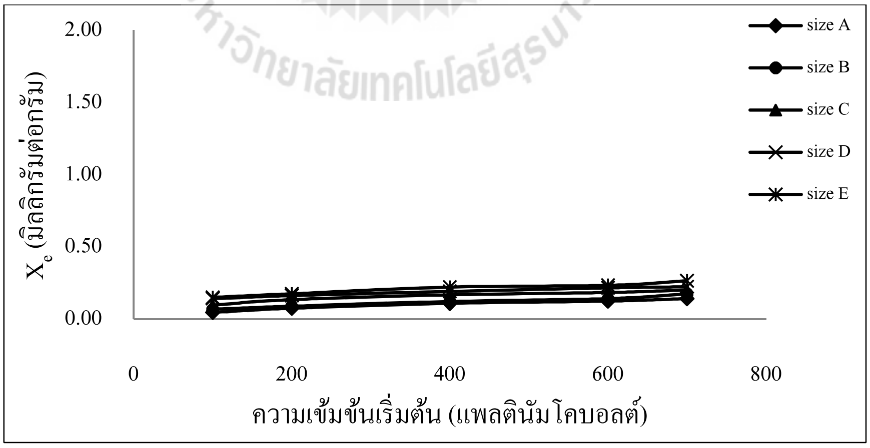
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) สีย้อมรีแอคทีฟ Red



ข) สีย้อมรีแอคทีฟ Blue



ค) สีย้อมรีแอคทีฟ Yellow

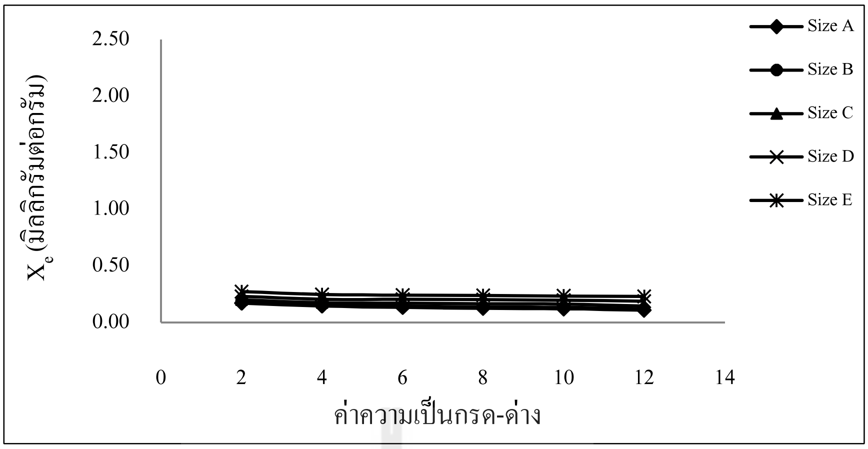
รูปที่ 4.10 กราฟผลของความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีต่อการดูดซับของหินดินดาน A B C D และ E

เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลง ส่งผลให้มีแรงขับเคลื่อนมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีย้อมเกิดการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น (Al-Qodah, 2000; Aydin and Baysal, 2006) ซึ่งสอดคล้องกับผลศึกษาของ Al-Qodah (2000) ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 7.0×10^{-11} เป็น 12.7×10^{-11} ตารางเมตรต่อนาที เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 380 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของสารดูดซับได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น และผลการศึกษาของ Senthikumaar et al. (2006) ที่ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Red ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยศึกษาในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มมากขึ้น

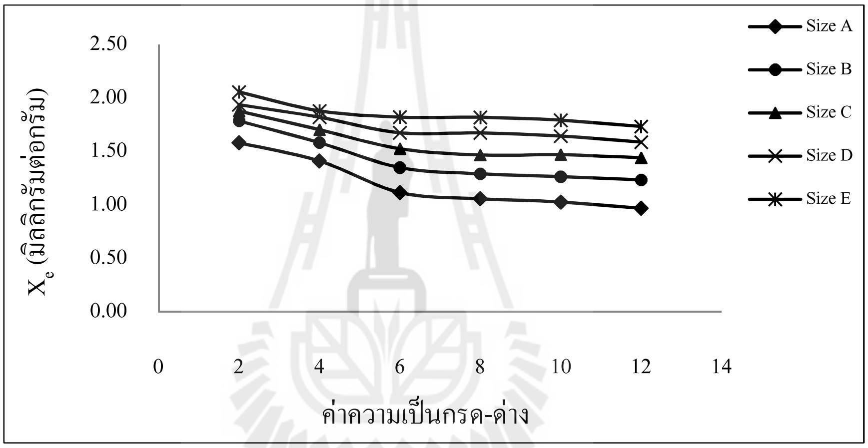
4.4.2 ผลของความเป็นกรด-ด่าง

ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยศึกษาในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ 2.0-12.0 นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ดังแสดงในรูปที่ 4.11ก 4.11ข และ 4.11ค ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานมีค่าลดลง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุดเมื่อพิจารณาจากค่าความสามารถในการดูดซับและค่าความชันของกราฟ และเมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของหินดินดานแต่ละขนาดมีค่าลดลง โดยเรียงลำดับค่าความสามารถในการดูดซับจากมากไปน้อยดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดสูงสุด สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าเท่ากับ 0.2813 0.2298 0.1922 0.1921 และ0.1795 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มีค่าเท่ากับ 2.0553 1.9363 1.8757 1.7857 และ 1.5804 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



ก) สีย้อมรีแอคทีฟ Red



ข) สีย้อมรีแอคทีฟ Blue

ค) สีย้อมรีแอคทีฟ Yellow

รูปที่ 4.11 กราฟผลของความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีต่อการดูดซับ
ของหินดินดาน A B C D และ E

และสำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow มีค่าเท่ากับ 0.2711 0.2337 0.2008 0.1795 และ 0.1421 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ จะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ๆ ในกรณีที่สารที่ถูกดูดซับมีประจุเป็นลบและสารดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นบวก ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการแย่งกันจับกับตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นบวกระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานเป็นการดูดซับแบบประจุที่ตรงกันข้าม (Electrostatic attraction) กล่าวคือสีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีที่มีประจุลบ ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟจะมีกลุ่มซัลโฟนิก ($-SO_3Na$) อย่างน้อย 1 กลุ่ม เมื่อสีย้อมรีแอคทีฟละลายน้ำจะแตกตัวให้โซเดียมไอออน (Na^+) และโมเลกุลของสีย้อมที่มีประจุลบ ($Dye\text{-}SO_3^-$) ดังสมการที่ 4.1 (Kulkami et al., 1986; Wang et al., 2003; Mall et al., 2005; Aydin and Baysal, 2006; Kyzas and Lazaridis, 2009) หินดินดานมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ SiO_2 Al_2O_3 CaO และ Fe_2O_3 เป็นต้น ซึ่งโลหะออกไซด์ที่ผิวหน้าของสารดูดซับเมื่ออยู่ในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟที่ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีสภาวะเป็นกรดที่ผิวหน้าของสารดูดซับจะถูกเติมโปรตอน (Protonation) ด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ทำให้ผิวหน้าของสารดูดซับแสดงประจุบวกซึ่งทำให้สารดูดซับสามารถที่จะดูดซับโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟซึ่งมีประจุเป็นลบได้ดังสมการที่ 4.2-4.4 (Ramakrishna and Viragharan, 1997; Ozacar and Sengil, 2003)

$$Dye\text{-}SO_3Na \longrightarrow Dye\text{-}SO_3^- + Na^+ \quad (4.1)$$

$$MO_{(Surface)} + H_2O \longrightarrow MOH_{(Surface)} \quad (4.2)$$

$$MOH_{(Surface)} + H^+ \longrightarrow M\text{-}OH_{2\,(Surface)}^+ \quad (4.3)$$

$$M\text{-}OH_{2\,(Surface)}^+ + Dye\text{-}SO_3^- \longrightarrow M\text{-}OH_2^+/Dye\text{-}SO_3 \quad (4.4)$$

โดย M คือ โมเลกุลของอลูมิเนียม ซิลิกอน แคลเซียม และอื่น ๆ

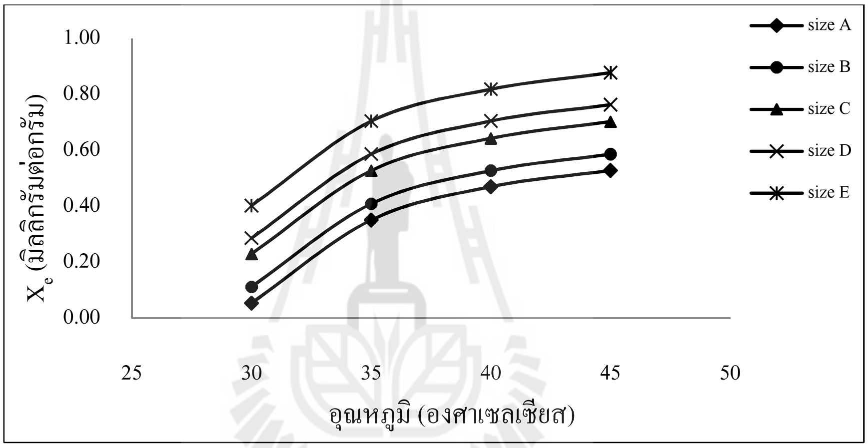
การแสดงประจุที่ผิวของสารดูดซับสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายและค่า Point of Zero Charge ของสารดูดซับ โดยเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมมีค่ามากกว่าค่าความเป็นเป็นกรด-ด่างที่จุด Point of Zero Charge จะมีผลทำให้ผิวของสารดูดซับแสดงประจุเป็นลบ (Wang and Zhu, 2005; Faria et al., 2004) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟซึ่งมีประจุเป็นลบมีค่าลดลง ค่าความเป็นกรด-ด่างที่จุด Point of Zero Charge ของหินดินดานมีค่าอยู่ในช่วง 7.35-7.94 ดังนั้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟมีค่ามากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่จุด Point of Zero Charge หินดินดานจะแสดงประจุที่ผิวเป็นลบส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานจะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Gupta et al. (1990) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อม Omega Chrome red ME ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุลบด้วยสารดูดซับผสมระหว่างเถ้าลอยและถ่านหิน ซึ่งมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก พบว่าการดูดซับสีย้อม Omega Chrome red ME มีค่าสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 2.0 ผลการศึกษาของ Chaudhuri et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาผลของความเป็นกรด-ด่างต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าว พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟจะมีค่าสูงสุด เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Sivaraj et al. (2010) ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจาก Eichornia Crassipes มีความสามารถในการดูดซับ สีย้อมรีแอคทีฟสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0

4.4.3 ผลของอุณหภูมิ

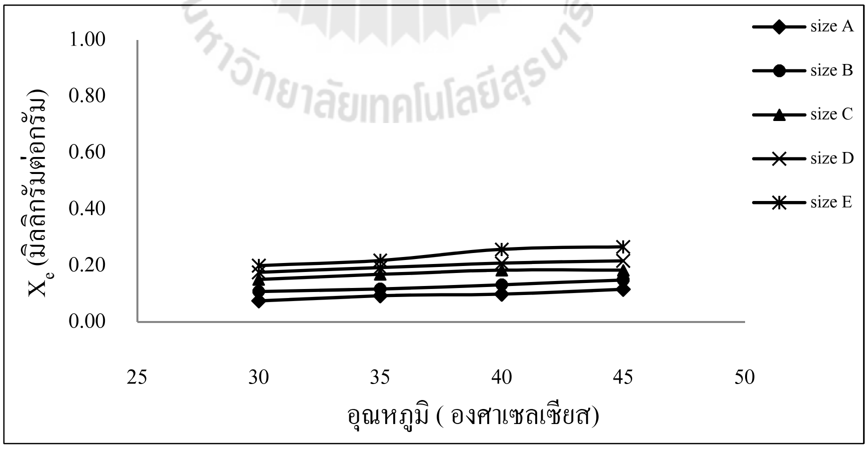
ผลการศึกษาอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30-45 องศาเซลเซียส นำผลการศึกษามาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ดังแสดงในรูปที่ 4.12ก 4.12ข และ 4.12ค ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกับค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของหินดินดานแต่ละขนาด มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าความสามารถในการดูดซับของหินดินดานจากมากไปน้อย

ก) สีย้อมรีแอคทีฟ Red



ข)สีย้อมรีแอคทีฟ Blue



ค) สีย้อมรีแอคทีฟ Yellow

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.12 กราฟผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับของสีย้อมรีแอคทีฟ ของหินดินดาน A B C D และ E

ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยที่อุณหภูมิเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงสุด สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าเท่ากับ 0.1704 0.1452 0.1200 0.1198 และ 0.0942 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มีค่าเท่ากับ 0.8778 0.7633 0.7022 0.5861 และ 0.5275 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow มีค่าเท่ากับ 0.2661 0.2164 0.1829 0.1489 และ 0.1155 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

การเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ซึ่งส่งผลทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลสีย้อมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีการเคลื่อนที่และกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบนสารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น (Al-Qoah, 2000; Khalid et al., 2000; Al-Degs et al., 2007; 2008; Karaoglu et al., 2010) และการที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นยังช่วยเร่งให้เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับสารดูดซับอีกด้วย (ปิยะวรรณ หลีชาติ, 2546) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Cicek et al. (2007) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ (1) Reactive Blue 19 (2) Reactive Red 195 และ (3) Reactive Yellow 145 ด้วย wheat bran โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20-50 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด เพิ่มมากขึ้น และจากผลการศึกษาของโชติรส เอี่ยมสะอาด (2545) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 30-50 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซับสีย้อม Reactive Violet 5 ของไคโตซาน พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Diffusivity coefficient) มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

4.4.4 สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

จากผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด โดยศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลง มีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีผลต่อประจุที่ผิวหน้าของหินดินดาน โดยในสภาวะที่สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ที่ผิวหน้าของหินดินดานจะถูกเติมโปรตอนด้วยไฮโดรเจนไอออนทำให้ผิวหน้าของหินดินดานแสดงประจุเป็นบวกทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟที่มีประจุเป็นลบได้เพิ่มมากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

ทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานการดูดซับมีค่าลดลง ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนมวลเพิ่มมากขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกระจายตัวเข้าสู่ภายในรูพรุนของหินดินดานได้เพิ่มมากขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง ส่งผลทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลสีย้อมในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีการเคลื่อนที่และกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับบน สารดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และการที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นยังช่วยเร่งให้เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับสารดูดซับอีกด้วย โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากที่สุด

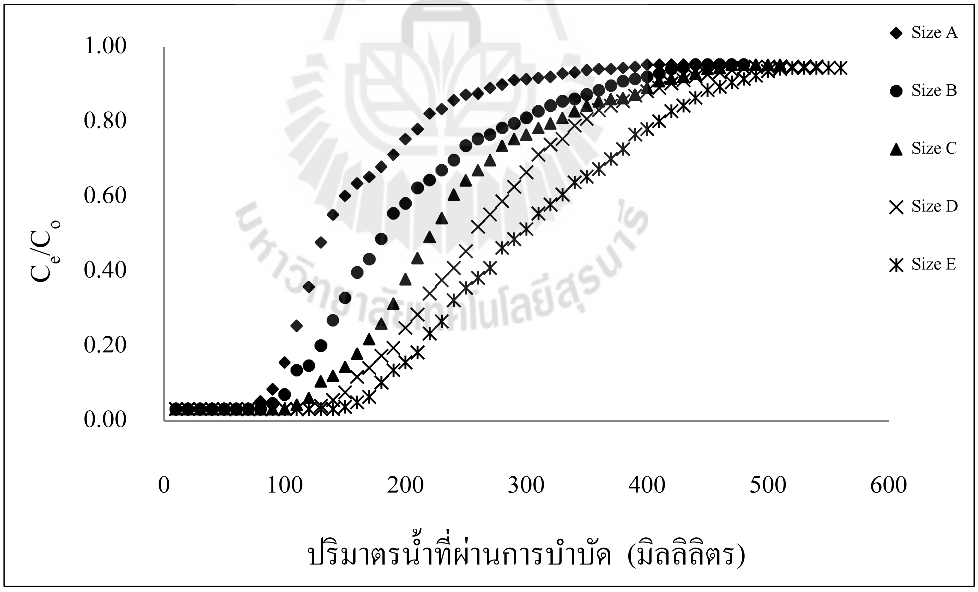
4.5 ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์

4.5.1 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

ผลการศึกษาการ Breakthrough curve ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาดในชุดทดลองคอลัมน์ โดยนำหินดินดานแต่ละขนาดมาบรรจุลงในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร ให้มีความลึกของชั้นสารดูดซับเท่ากับ 30.00 เซนติเมตร ทำการป้อนน้ำประปาผ่านคอลัมน์เพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นป้อนสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ (C_o) เท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10.50$\pm$0.20 ทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านชุดทดลองคอลัมน์ (C_e) จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดที่ออกจากชุดทดลองคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 95 ของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟที่เข้าสู่คอลัมน์ รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก จ. เมื่อนำผลการศึกษามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/C_o กับปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.5.1.1 สีย้อมรีแอคทีฟ Red

จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาดในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red จากการศึกษาพบว่าเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและที่จุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.15 โดยเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงจากขนาด A เป็นขนาด E ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและที่จุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นจาก 82.84 เป็น 168.21 มิลลิลิตร และจาก 376.83 เป็น 526.83 มิลลิลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง จากการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นจาก 82.84 เป็น 168.21 นาที และจาก 376.83 เป็น 526.83 นาที ตามลำดับ ความยาวของชั้นการดูดซับ (สมการ 2.8) และอัตราการใช้ตัวกลาง (สมการ 2.11) จะมีค่าลดลงเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน A B C D และ E ที่จุดหมดสภาพมีค่าเท่ากับ 0.0114 0.0170 0.0282 0.0321 และ 0.0324 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



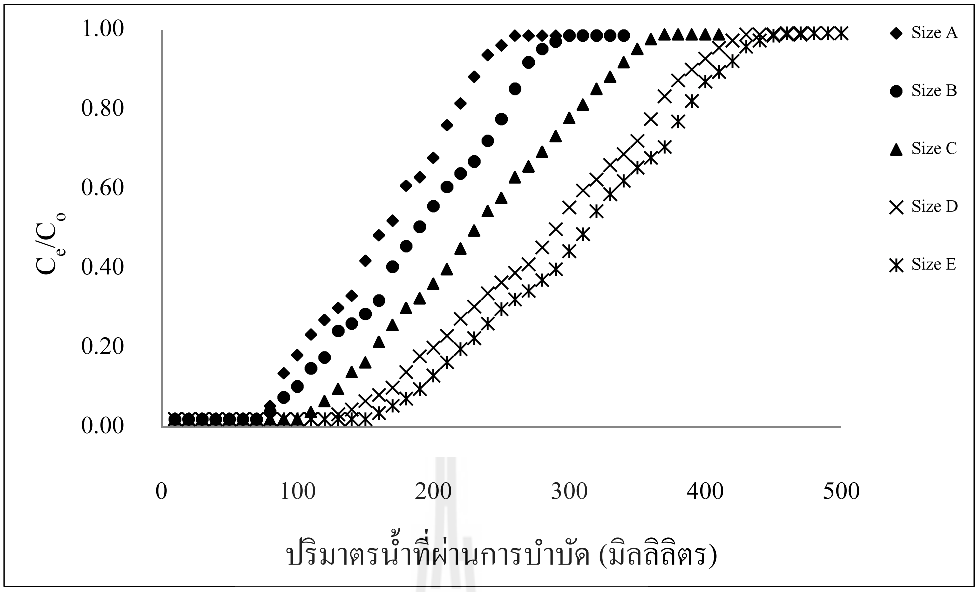
รูปที่ 4.13 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาด ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red

พารามิเตอร์	ขนาดของหินดินดาน				
	A	B	C	D	E
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	376.83	437.89	466.83	496.83	526.83
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)	82.84	96.39	120.07	143.03	168.21
ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)	23.405	23.396	22.284	21.363	20.421
ปริมาณสีย้อมสะสมที่ถูกดูดติด จนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	2.106	3.086	4.829	5.431	5.523
ความสามารถในการดูดติดของสีย้อม เมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.0114	0.0170	0.0282	0.0321	0.0324
อายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้น จนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)	376.83	437.89	466.83	496.83	526.83
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.253	1.236	1.189	1.165	1.156
EBCT (นาที)	147.26	147.26	147.26	147.26	147.26
อัตราการใช้สารดูดซับ (กรัมต่อมิลลิลิตร)	2.227	1.888	1.458	1.199	1.012

4.5.1.2 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาดในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue จากการศึกษาพบว่าเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงจากขนาด A เป็นขนาด E ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นจาก 80.25 เป็น 171.11 มิลลิลิตร และจาก 245.83 เป็น 428.06 มิลลิลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง จากการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นจาก 80.25 เป็น 171.11 นาที และจาก 245.83 เป็น 428.06 นาที ตามลำดับ แต่ความยาวของชั้นการดูดซับและอัตราการใช้ตัวกลางจะมีค่าลดลงเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดาน A B C D และ E ที่จุดหมดสภาพมีค่าเท่ากับ 0.1230 0.1446 0.1859 0.2327 และ 0.2534 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



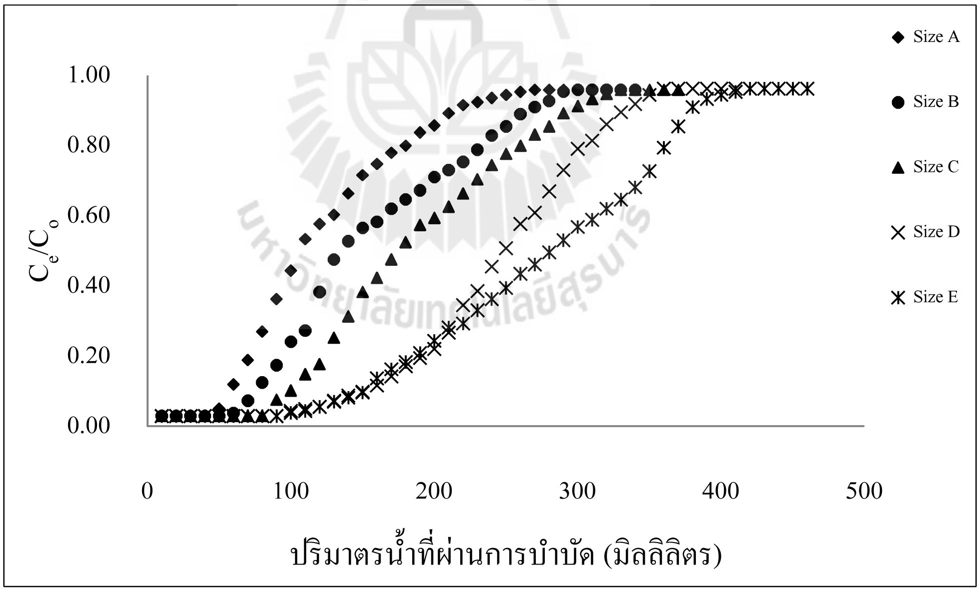
รูปที่ 4.14 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

ตารางที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาดในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue

พารามิเตอร์	ขนาดของหินดินดาน				
	A	B	C	D	E
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	245.83	279.69	349.69	408.51	428.05
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)	80.25	86.30	116.29	145.23	171.11
ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)	20.207	20.744	20.023	19.334	18.008
ปริมาณสีย้อมสะสมที่ถูกดูดติดจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	22.688	26.310	32.545	39.917	43.143
ความสามารถในการดูดติดของสีย้อมเมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.1230	0.1446	0.1859	0.2327	0.2534
อายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)	245.83	279.70	349.70	408.52	428.06
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.253	1.236	1.189	1.165	1.156
EBCT (นาที)	147.26	147.26	147.26	147.26	147.26
อัตราการใช้สารดูดซับ (กรัมต่อมิลลิลิตร)	2.218	1.412	1.964	1.918	2.085

4.5.1.3 สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาดในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow จากการศึกษาพบว่าเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลงจากขนาด A เป็นขนาด E ปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นจาก 53.19 เป็น 131.65 มิลลิลิตร และจาก 257.13 เป็น 407.13 มิลลิลิตร ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง จากการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่จุดเบรคทรูและจุดหมดสภาพจะเพิ่มขึ้นจาก 53.19 เป็น 131.19 นาที และจาก 257.13 เป็น 407.13 นาที ตามลำดับ แต่ความยาวของชั้นการดูดซับและอัตราการใช้ตัวกลางจะมีค่าลดลงเมื่อหินดินดานมีขนาดเล็กลง ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดาน A B C D และ E ที่จุดหมดสภาพมีค่าเท่ากับ 0.0129 0.0170 0.0212 0.0287 และ 0.0323 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด A B C D และ E ในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

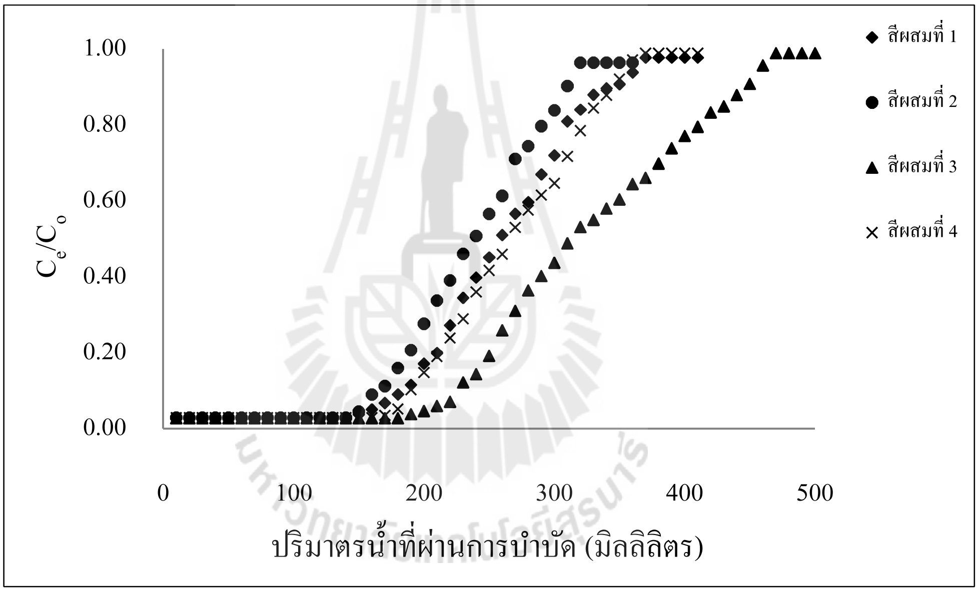
ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานแต่ละขนาด ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

พารามิเตอร์	ขนาดของหินดินดาน				
	A	B	C	D	E
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	257.13	289.04	322.85	353.57	407.13
ปริมาตรจากเริ่มต้นถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)	53.19	69.72	89.16	129.43	131.65
ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)	23.794	22.764	21.715	19.018	20.299
ปริมาณสีย้อมสะสมที่ถูกดูดติด จนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	2.385	3.090	3.707	4.918	5.506
ความสามารถในการดูดติดของสีย้อม เมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.0129	0.0170	0.0212	0.0287	0.0323
อายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้น จนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)	257.13	289.04	322.85	353.57	407.13
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.253	1.236	1.189	1.165	1.156
EBCT (นาที)	147.26	147.26	147.26	147.26	147.26
อัตราการใช้สารดูดซับ (กรัมต่อมิลลิลิตร)	3.469	2.611	1.964	1.325	1.293

4.5.2 สีผสมที่เกิดจากการผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 ของหินดินดาน E ขนาดในชุดทดลองคอลัมน์ โดยนำหินดินดานขนาด E มาบรรจุลงในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร ให้มีความลึกของชั้นสารดูดซับเท่ากับ 30.00 เซนติเมตร ทำการป้อนน้ำประปาผ่านคอลัมน์เพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นป้อนสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟเท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ ทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดที่เหลืออยู่หลังจากผ่านชุดทดลองคอลัมน์ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดที่ออกจากชุดทดลองคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับกับร้อยละ 95 ของสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟที่เข้าสู่คอลัมน์ รายละเอียดผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก จ. เมื่อนำผลการศึกษามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/C_o กับปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 4.16 เป็นกราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด E ในการกำจัดสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 จากการศึกษาพบว่าปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดที่จุดเบรคทรูเท่ากับ 158.82 150.99 203.09 และ 178.30 มิลลิลิตร ตามลำดับ สำหรับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 และจุดหมดสภาพปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าเท่ากับ 362.95 315.15 458.58 และ 355.73 มิลลิลิตร ตามลำดับ สำหรับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 โดยหินดินดานขนาด E มีความยาวของชั้นการดูดซับและอัตราการใช้ตัวกลางมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม โดยค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดผสมที่ 1 2 3 และ 4 ของหินดินดานขนาด E ที่จุดหมดสภาพมีค่าเท่ากับ 0.1213 0.1136 0.0412 และ 0.1014 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาด E ในการกำจัดสารละลายสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4

ตารางที่ 4.18 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการทดลองในชุดทดลองคอลัมน์ของหินดินดานขนาด E ในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4

พารามิเตอร์	ชนิดของสี			
	สีผสม 1	สีผสม 2	สีผสม 3	สีผสม 4
ปริมาตรจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิลิตร)	362.95	315.15	458.58	355.73
ปริมาตรจากจากเริ่มต้นถึงจุดเบรคทรู (มิลลิลิตร)	158.82	150.890	203.09	178.30
ความยาวของชั้นการดูดซับ (เซนติเมตร)	16.873	15.636	16.714	14.963
ปริมาณสีย้อมสะสมที่ถูกดูดติด จนถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัม)	20.670	19.254	7.061	17.232
ความสามารถในการดูดติดของสีย้อม เมื่อถึงจุดหมดสภาพ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.1213	0.1136	0.0412	0.1014
อายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้น จนถึงจุดหมดสภาพ (นาที)	362.948	315.154	458.583	355.730
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อลิตร)	1.00	1.00	1.00	1.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.156	1.156	1.156	1.156
EBCT (นาที)	147.26	147.26	147.26	147.26
อัตราการใช้สารดูดซับ (กรัมต่อมิลลิลิตร)	1.072	1.128	0.838	0.955

4.5.3 สรุปผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์

จากผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์ พบว่าหินดินดานมีอายุการใช้งานของระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A และจากผลการศึกษาพบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue สูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.123-0.253 มิลลิกรัมต่อกรัม รองลงมาคือสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow และ Red ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.013-0.032 และ 0.011-0.032 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 7 ชนิด จากการศึกษาด้วยชุดทดลองคอลัมน์กับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการศึกษาแบบกะ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้จากชุดทดลองคอลัมน์มีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากในการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์มีระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับน้อยกว่าแบบกะ กล่าวคือในการศึกษาแบบกะมีระยะเวลาในการดูดซับ 72 ชั่วโมง

แต่ในชุดทดลองคอลัมน์มีระยะเวลาในการดูดซับเพียง 100 นาที (ระยะเวลาเก็บกักในชุดทดลองคอลัมน์ซึ่งได้จากการศึกษาสารติดตาม) สำหรับหินดินดานแต่ละขนาดในแต่ละชุดการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดของหินดินดานในชุดทดลองคอลัมน์กับสารดูดซับอื่น ๆ ในสภาวะการทดลองที่ใกล้เคียงกัน พบว่าการศึกษาของ Tipprasertsin (2003) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Reactive Red 141 ความเข้มข้น 30 พีพีเอ็ม ด้วยหญ้าแขมที่ผ่านการปรับสภาพในชุดทดลองคอลัมน์ พบว่าปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดและเวลาที่ใช้ในการบำบัดจนถึงจุดหมดสภาพของหญ้าแขมที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าใกล้เคียงกับหินดินดาน โดยมีค่าเท่ากับ 522 มิลลิลิตร และ 435 นาที ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1.20 มิลลิลิตรต่อนาที และความลึกของชั้นตัวกลางเท่ากับ 30 เซนติเมตร และจากผลการศึกษา Al-Degs et al. (2009) ซึ่งได้ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Remazol Reactive Black ความเข้มข้น 155 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยถ่านกัมมันต์ในชุดทดลองคอลัมน์ พบว่าปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัดและระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจนถึงจุดหมดสภาพของถ่านกัมมันต์มีค่ามากกว่าหินดินดาน โดยมีค่าเท่ากับ 5.70 ลิตร และ 19 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 5.00 มิลลิลิตรต่อนาที และความลึกของชั้นตัวกลางเท่ากับ 7.50 เซนติเมตร ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจนถึงจุดหมดสภาพจะเป็นตัวบอกอายุการใช้งานของระบบ หากระบบมีระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจนถึงจุดหมดสภาพนานระบบก็มีอายุการใช้งานนานกว่าระบบที่มีค่าน้อยกว่า

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

ศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยหินดินดานแต่ละขนาด โดยนำหินดินดานแต่ละขนาดมาบรรจุลงในคอลัมน์พลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.50 เซนติเมตร ให้มีความลึกของชั้นสารดูดซับเท่ากับ 30.00 เซนติเมตร ทำการป้อนน้ำประปาผ่านคอลัมน์เพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลา 3 วัน จากนั้นป้อนน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดปราจีนบุรีเข้าสู่คอลัมน์โดยลักษณะสมบัติของน้ำเสียทั้ง 3 จุดดังแสดงในตารางที่ 4.19 ทำการทดลองจนกว่าความเข้มข้นของสีที่วิเคราะห์ได้ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าเท่ากับร้อยละ 95 ของความเข้มข้นของสีในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ผลการศึกษาดังแสดงในภาคผนวก ฉ. และประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของหินดินดาน แสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.19 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมแห่งหนึ่ง ในจังหวัดปราจีนบุรีที่ใช้ในการศึกษา

ลักษณะสมบัติน้ำเสีย	หน่วย	คุณสมบัติของน้ำเสีย (Mean±SD)		
		น้ำเสียจุดที่ 1	น้ำเสียจุดที่ 2	น้ำเสียจุดที่ 3
ซีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	45500±182.00	2600±3.78	750±1.67
บีโอดี	มิลลิกรัมต่อลิตร	5±0.00	520±0.47	25±0.04
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	45±0.73	130±0.85	90±0.33
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	45000±123.00	5600±6.54	4800±15.00
สี	แพลตินัมโคบอลต์	2502000±500.00	2105±13.00	420±3.00

หมายเหตุ : จำนวนตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้วิเคราะห์สำหรับน้ำเสียแต่ละจุดเท่ากับ 15 ตัวอย่าง

4.6.1 น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

4.6.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

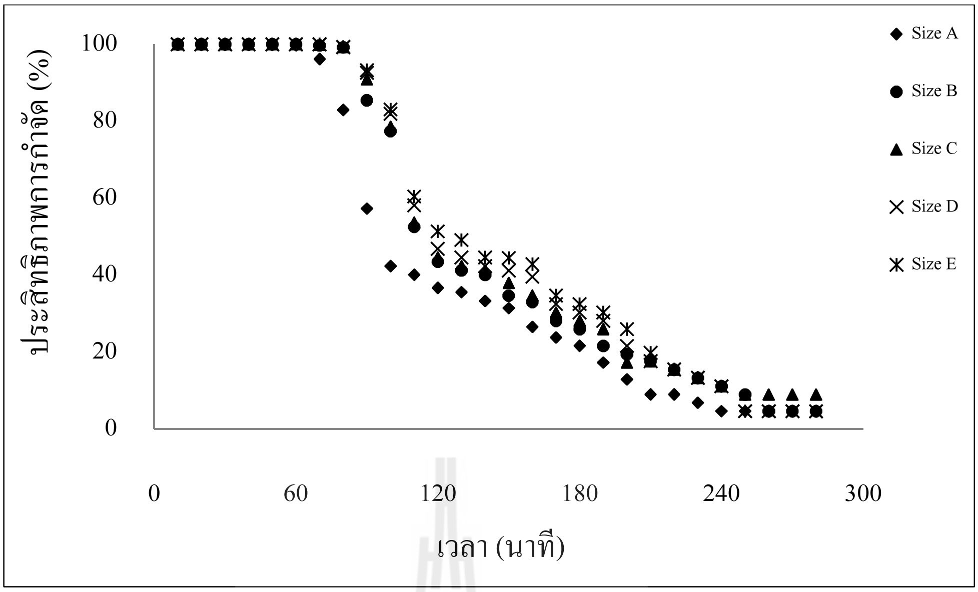
จากรูปที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบพบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.31 98.22 98.85 99.05 และ 99.14 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-220 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัด จากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.18) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 77.05 76.27 75.00 72.99 และ 60.83 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพ เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 239.70 238.97 229.84 229.07 และ 218.18 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของหินดินดาน

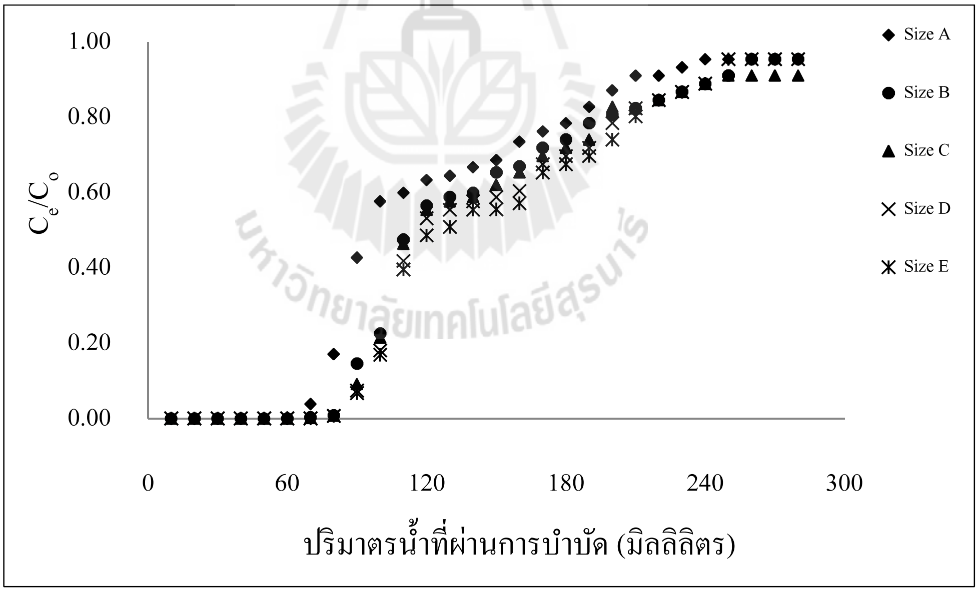
น้ำเสีย	ลักษณะสมบัติของน้ำ	ประสิทธิภาพการการจัด (%) (X±SD)				
		A	B	C	D	E
น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี	สี	91.512± 4.796	98.445± 4.452	98.578± 4.400	98.734± 3.345	98.805± 3.070
	ซีโอดี	97.309± 5.977	98.221± 4.814	98.846± 3.014	99.050± 2.456	99.136± 2.232
	ของแข็งทั้งหมด	95.371± 0.869	95.659± 0.864	95.507± 0.644	99.612± 0.531	99.612± 0.554
	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	95.289± 12.325	95.582± 11.813	96.444± 9.795	99.605± 0.541	99.605± 0.564
น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ	สี	98.449± 1.646	98.674± 1.008	98.912± 2.200	98.960± 0.202	98.983± 0.134
	ซีโอดี	98.428± 2.156	98.428± 2.156	98.619± 1.826	98.661± 1.834	99.336± 1.314
	ของแข็งทั้งหมด	10.239*	14.589*	33.049*	40.489*	40.613*
	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	10.119**	14.094**	32.804**	40.179**	40.306**
น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ	สี	94.969± 0.505	95.088± 0.168	95.147± 0.000	95.147± 0.000	95.147± 0.000
	ซีโอดี	98.201± 0.000	98.529± 0.002	98.529± 0.002	98.529± 0.002	98.529± 0.002
	ของแข็งทั้งหมด	5.960*	9.826*	11.350*	8.445*	12.523*
	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	5.655**	9.524**	10.938**	7.562**	12.202**

หมายเหตุ : * หมายถึง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลา 250 นาที

** หมายถึง ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งละลายน้ำทั้งหมดที่เวลา 250 นาที



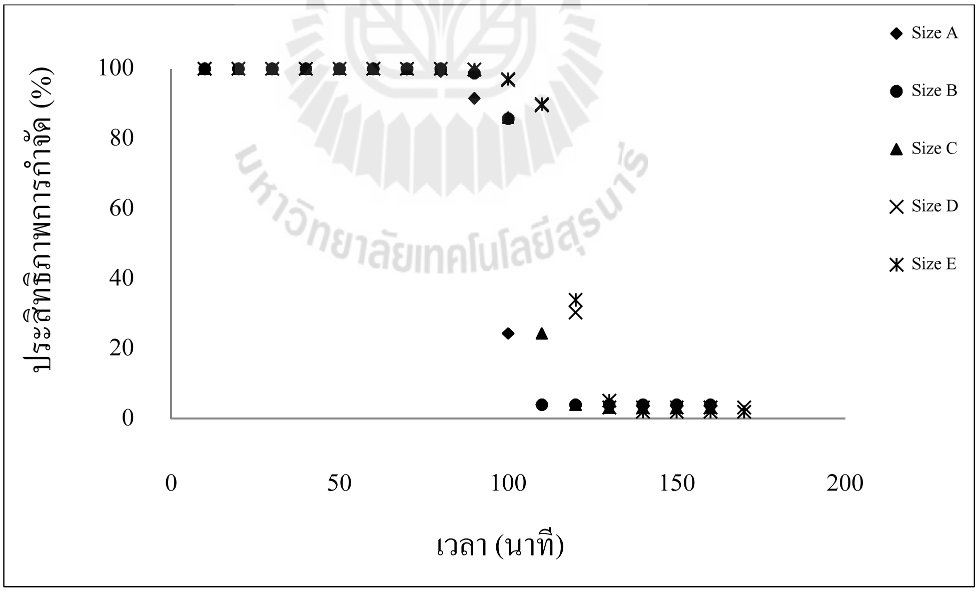
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานแต่ละขนาด



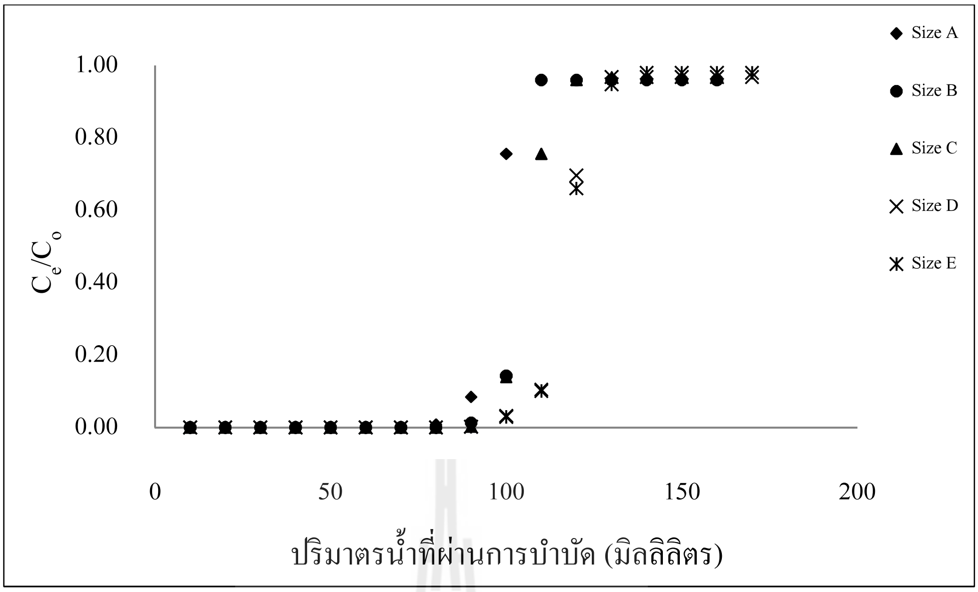
รูปที่ 4.18 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาดแต่ละขนาด
ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

4.6.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

จากรูปที่ 4.19 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบโดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบ พบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 91.51 98.45 98.58 98.73 และ 98.81 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-130 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัดจากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.20) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 102.92 102.47 93.46 92.85 และ 85.45 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพ เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 130.62 129.34 119.51 119.17 และ 109.51 นาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีของหินดินดานแต่ละขนาด

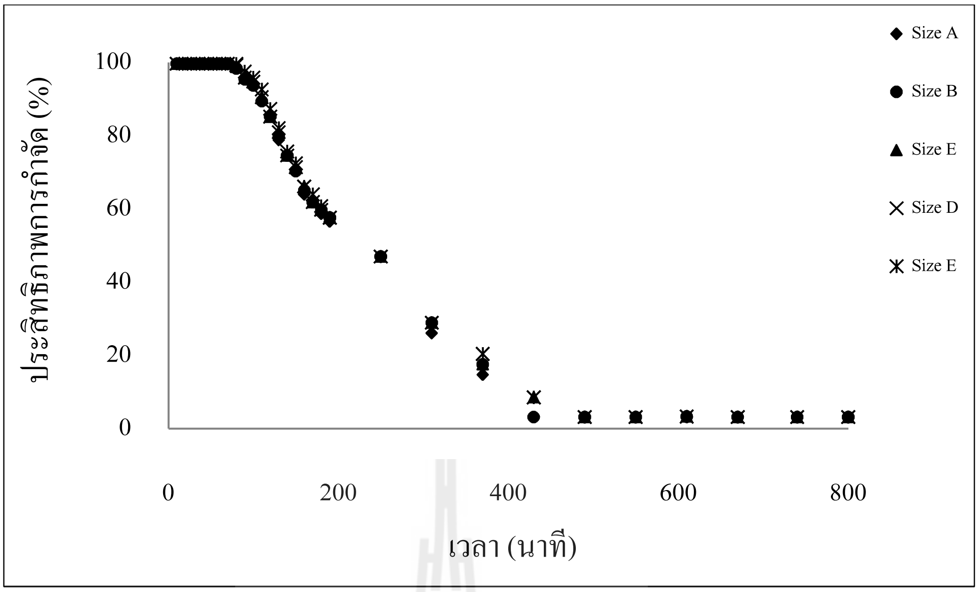


รูปที่ 4.20 กราฟBreakthrough curve ของหินดินดานขนาดแต่ละขนาด ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

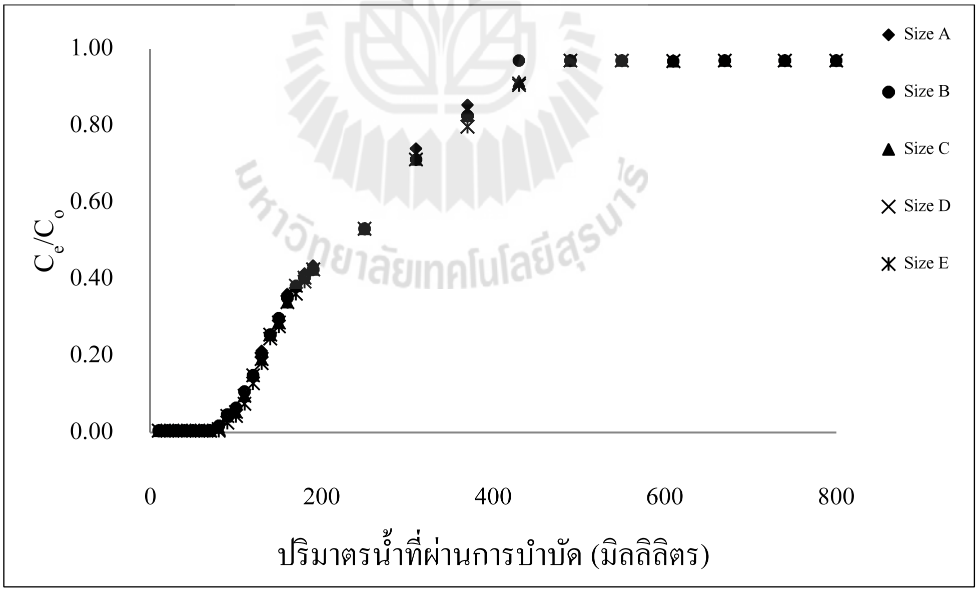
4.6.2 น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

4.6.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากรูปที่ 4.21 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบพบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.43 98.43 98.62 98.66 และ 99.34 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-400 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัด จากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.22) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 102.50 97.27 97.27 91.76 และ 91.76 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพ เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 472.19 470.68 468.89 422.08 และ 420.09 นาที ตามลำดับ



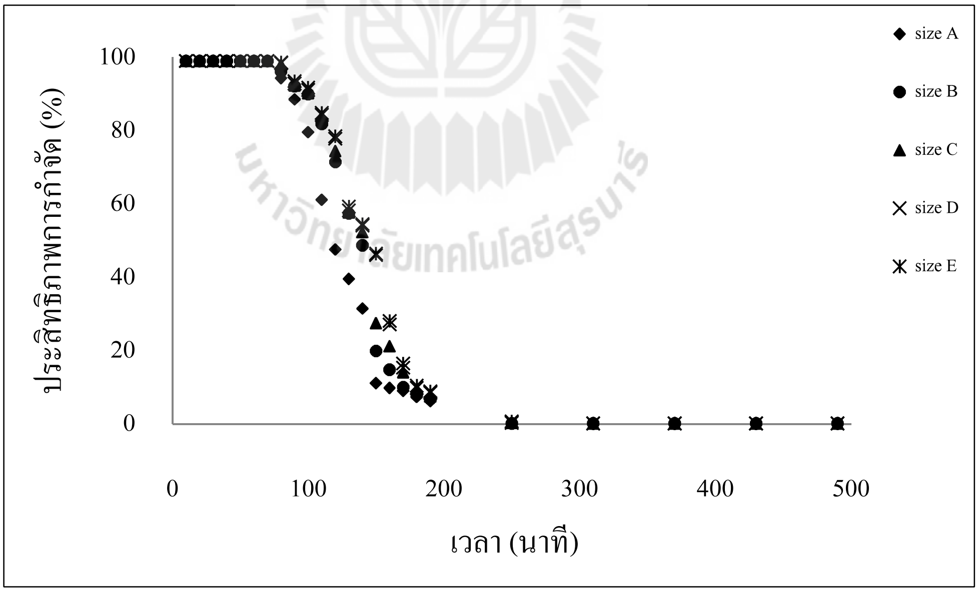
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด



รูปที่ 4.22 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาดในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพ

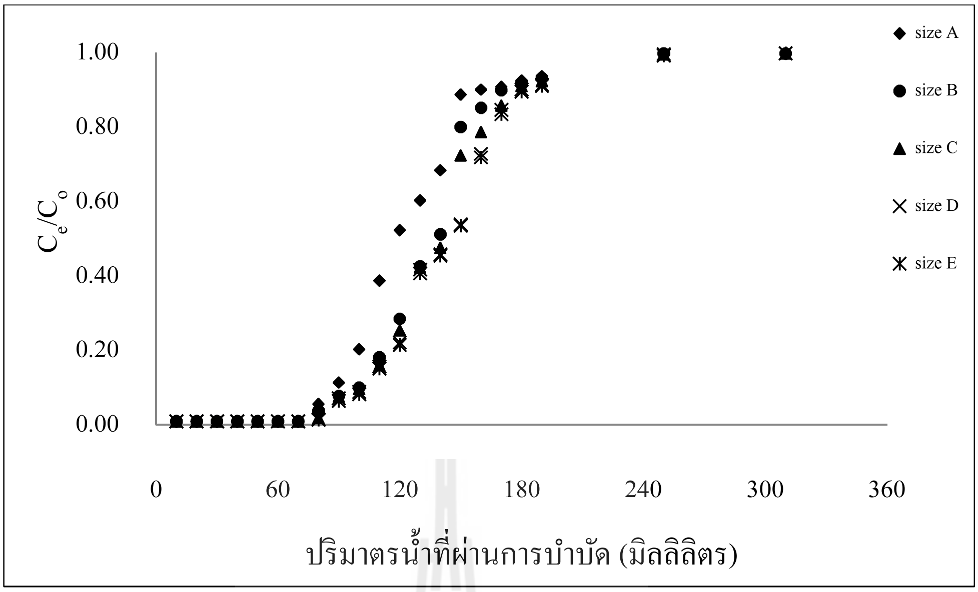
4.6.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

จากรูปที่ 4.23 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบ พบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.45 98.67 98.91 98.96 และ 98.98 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-190 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัด จากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.24) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 87.12 86.25 85.44 83.00 และ 78.70 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพ เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 194.59 194.39 193.61 192.73 และ 192.13 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



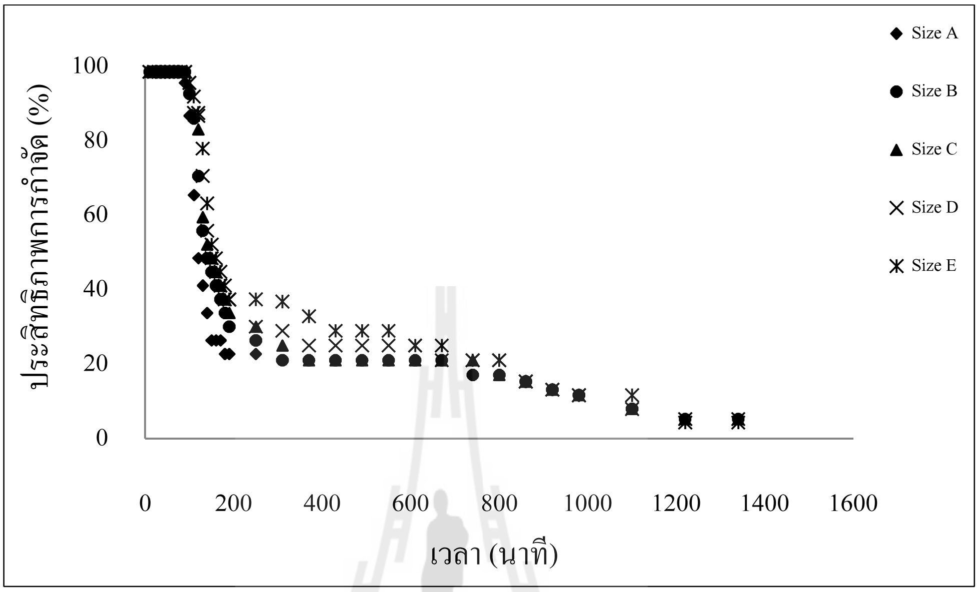
รูปที่ 4.24 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาด
ในการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

4.6.3 น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

4.6.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

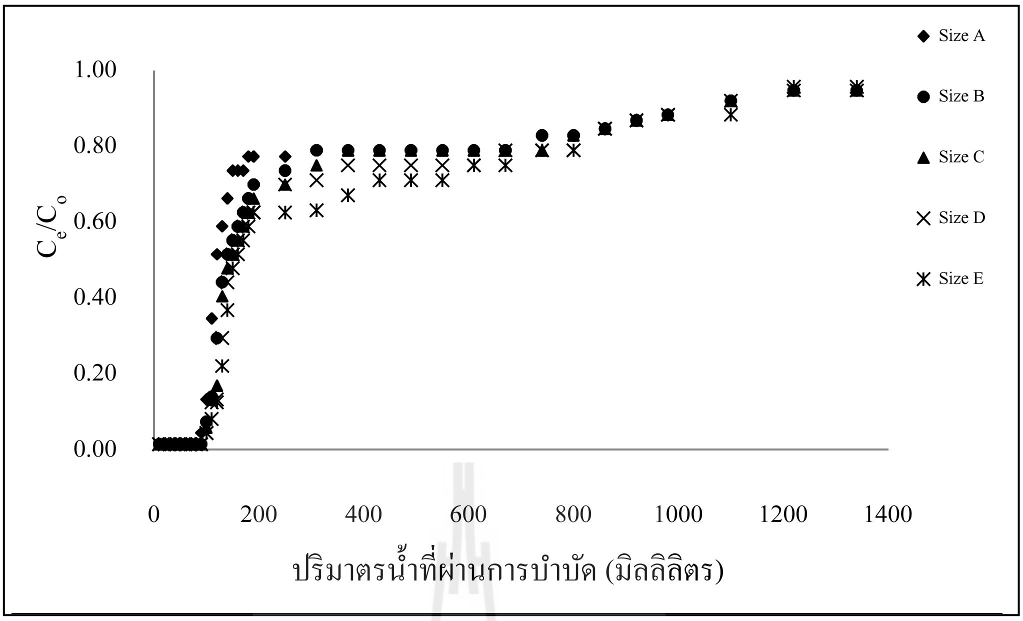
จากรูปที่ 2.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบพบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.20 98.53 98.53 98.53 และ 98.53 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-200 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัด จากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.26) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 101.62 100.74 97.95 95.93 และ 90.68 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพโดยเรียงจากมากไปหา

น้อยได้ดังต่อไปนี้ หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 1245.96 1215.00 1216.13 1194.74 และ 1190.00 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด

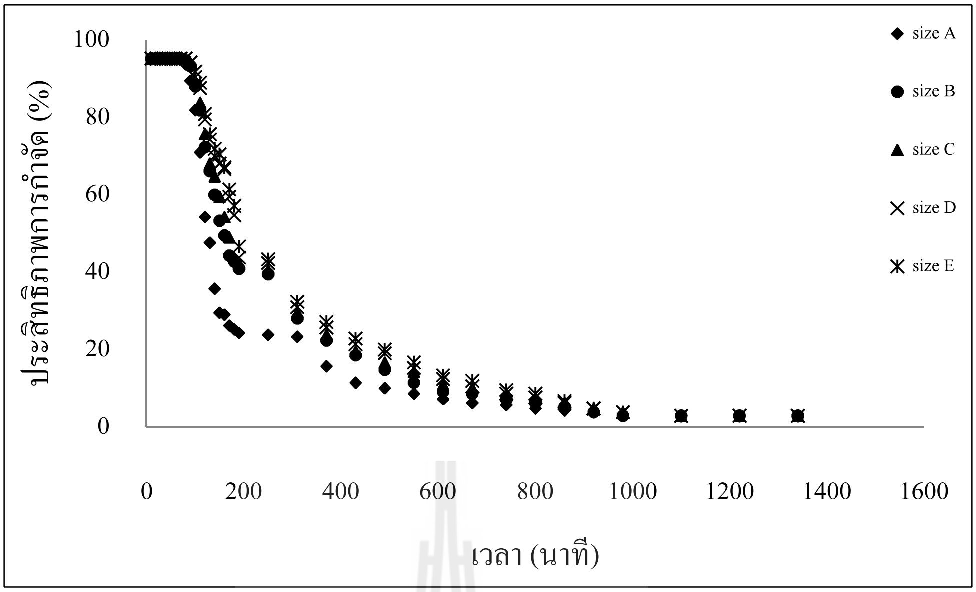
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



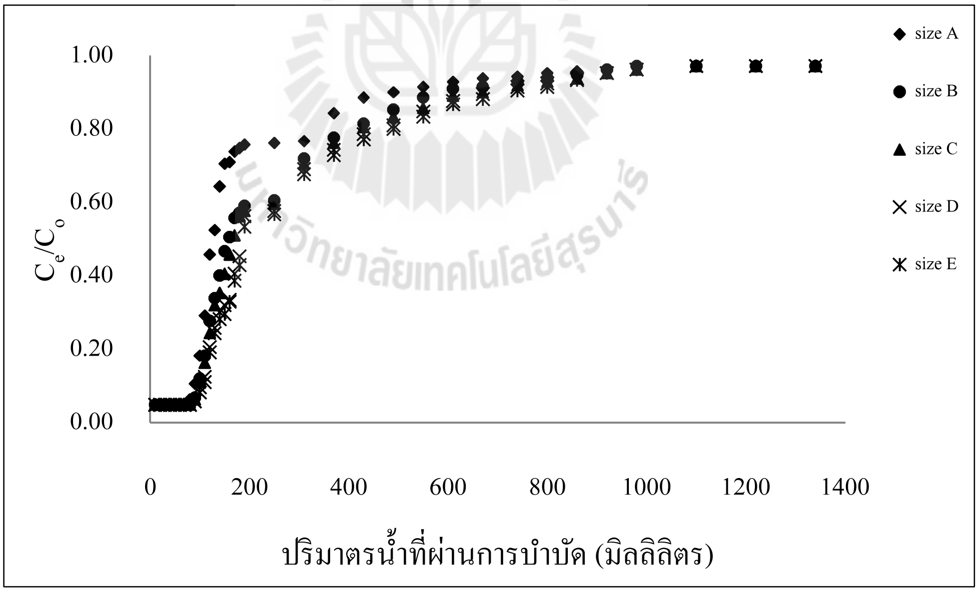
รูปที่ 4.26 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานแต่ละขนาดในการกำจัดซีโอดี ในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

4.6.3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม

จากรูปที่ 4.27 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A B C D และ E จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ โดยในช่วง 80 นาทีแรกของการเดินระบบพบว่าหินดินดานแต่ละขนาดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.97 95.09 95.15 95.15 และ 95.15 สำหรับหินดินดาน A B C D และ E ตามลำดับ และในช่วง 80-1000 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว แล้วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงที่จนหมดประสิทธิภาพการกำจัด จากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานขนาด A-E ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) และจาก Breakthrough curve (รูปที่ 4.28) ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดเบรคทรูของหินดินดานแต่ละขนาด เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 81.11 81.11 80.71 72.50 และ 70.71 นาที ตามลำดับ และเวลาที่ใช้ในการเดินระบบจนถึงจุดหมดประสิทธิภาพ เรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังต่อไปนี้หินดินดาน E > D > C > B > A โดยมีค่าเท่ากับ 913.68 912.94 890.00 868.57และ 786.67 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ของหินดินดานแต่ละขนาด



รูปที่ 4.28 กราฟ Breakthrough curve ของหินดินดานขนาดแต่ละขนาด ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ

4.6.4 สรุปผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

จากการศึกษาพบว่าหินดินดานมีความสามารถในการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสำหรับน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีอยู่ในช่วงร้อยละ 97.31-99.14 สำหรับน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 98.43-99.34 และสำหรับน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 98.20-98.53 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสำหรับน้ำเสียจากขั้นตอน การย้อมสีอยู่ในช่วงร้อยละ 91.512-98.805 สำหรับน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 98.449-98.983 และสำหรับน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 94.97-95.15 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุด ในช่วง 80 นาทีแรก พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ช.) แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุดที่จุดหมดสภาพ พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุดที่จุดหมดสภาพ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุด ในช่วง 80 นาทีแรก พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุดที่จุดหมดสภาพ พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุดที่จุดหมดสภาพ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของระบบโดยทำการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด พบว่าอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 7 และ 4 เท่าตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด พบว่าอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่าน

ระบบบำบัดทางชีวภาพอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 5 และ 2.5 เท่า ตามลำดับ

4.7 การนำกระบวนการดูดซับของหินดินดานไปประยุกต์ใช้

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่าหินดินดานมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีสูงกว่าร้อยละ 90 และ 97 ตามลำดับ ดังนั้นหากนำกระบวนการดูดซับด้วยหินดินดานไปประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีอยู่เดิมจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีของระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ในการนำไปประยุกต์ใช้ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งในการศึกษาจึงได้นำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจาก 3 จุด คือ น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมาใช้ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัด และอายุการใช้งานของระบบ เพื่อนำไปพิจารณาถึงความเหมาะสมที่จะนำกระบวนการดูดซับด้วยหินดินดานไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียตรงจุดใดจึงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาดมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสีและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยในเรื่องอายุการใช้งานพบว่ากระบวนการดูดซับด้วยหินดินดานที่ใช้ในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี และน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าควรนำกระบวนการดูดซับด้วยหินดินดานไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ หรือนำหินดินดานไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดโดยดิน (Land Treatment System) ซึ่งหินดินดานจะเป็นเสมือน ชั้นดินที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกรองรองรับน้ำเสียที่ถูกปล่อยเข้าสู่ระบบ

ระบบบำบัดโดยดิน ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติที่อาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมของดิน พืช และน้ำในระบบ ซึ่งวิธีนี้อาศัยกลไกธรรมชาติมาบำบัดน้ำเสียเป็นหลัก โดยไม่ต้องอาศัยถังบำบัดหรือเครื่องจักรกลต่าง ๆ ทำให้ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้า ระบบบำบัดโดยดินที่ใช้มีอยู่ด้วยกัน 3 ระบบคือ (1) ระบบอัตราไหลช้า (Slow-Rate Systems) (2) ระบบไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration Systems) และ (3) ระบบน้ำไหลนอง (Overland-Flow Systems) ซึ่งระบบบำบัดแต่ละแบบจะมีอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำ เส้นทางการไหลของน้ำ รวมถึงความต้องการการบำบัดน้ำเสียขั้นพื้นฐานก่อนเข้าระบบที่แตกต่างกัน อีกทั้งระบบ

บำบัดโดยดิน แต่ละระบบต้องการพื้นที่บำบัดที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดโดยดินทั้ง 3 ระบบแสดงในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ลักษณะพื้นที่สำหรับระบบบำบัดโดยดิน

ปัจจัย	ระบบอัตราไหลช้า	ระบบไหลซึมเร็ว	ระบบน้ำไหลนอง
ความลาดชันของพื้นที่	- ร้อยละ 0-20 เป็นพื้นที่ปลูกพืช - ร้อยละ 40 เป็นพื้นที่ที่ไม่ได้ปลูกพืช	ไม่จำเป็น	ความชันร้อยละ 2-8
ความสามารถในการซึมลงดิน	ปานกลางถึงช้า	เร็ว	ช้าหรือไม่ซึม
ความลึกของชั้นดินจากผิวดิน	0.6-3.0 เมตร (2.0-10.0 ฟุต)	- 1.0 เมตร (3.0 ฟุต) ในระหว่างการใช้งาน - 1.5-3.0 เมตร (5-10 ฟุต) ในระหว่างปล่อยให้แห้ง	ไม่จำเป็น

หมายเหตุ : Crites et al. (2000); U.S. EPA, (2006)

โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตในปริมาณมาก และน้ำเหล่านี้ก็จะกลายเป็นน้ำเสียที่ต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้นในการเลือกระบบบำบัดโดยดินที่จะนำไปใช้จึงจำเป็นต้องสามารถรองรับน้ำเสียในปริมาณมากได้ ซึ่งจากข้อมูลสำหรับใช้ออกแบบระบบบำบัดโดยดินดังแสดงในตารางที่ 4.22 พบว่าระบบบำบัดโดยดินแต่ละระบบมีค่าภาระปริมาณน้ำเสียที่แตกต่างกัน โดยระบบไหลซึมเร็วมีภาระปริมาณน้ำเสียสูงกว่าระบบอัตราไหลช้า และระบบน้ำไหลนอง และจากตารางที่ 4.21 พบว่าระบบบำบัดโดยดินแต่ละระบบต้องการพื้นที่ที่มีความสามารถในการซึมลงดินที่แตกต่างกัน ซึ่งหินดานดานมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านอยู่ในช่วง 23.634-657.504 เมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง โดยมีค่าเทียบเท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของกรวด (สำหรับหินดินดานขนาด A-C) และทรายหยาบ (สำหรับหินดินดานขนาด D-E) ดังนั้นหินดินดานจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบแบบไหลซึมเร็วมากกว่าระบบแบบอัตราไหลช้าและระบบน้ำไหลนอง โดยพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับระบบไหลซึมเร็วชั้นดินควรเป็นดินทราย ดินร่วนปนดินทรายหรือดินทรายปนดินร่วน และกรวดที่มีค่าความสามารถในการไหลซึมลงดินอยู่ในช่วง 5-15 เซนติเมตรต่อชั่วโมง แต่พื้นที่ที่เป็นทรายหยาบหรือกรวดที่มีค่าความสามารถในการไหลซึมลงดินมากกว่า 20 เซนติเมตรต่อชั่วโมง อาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง (Reynolds and Richards, 1996) เนื่องจากความสามารถในการไหลซึมลงดินมีผลต่อ

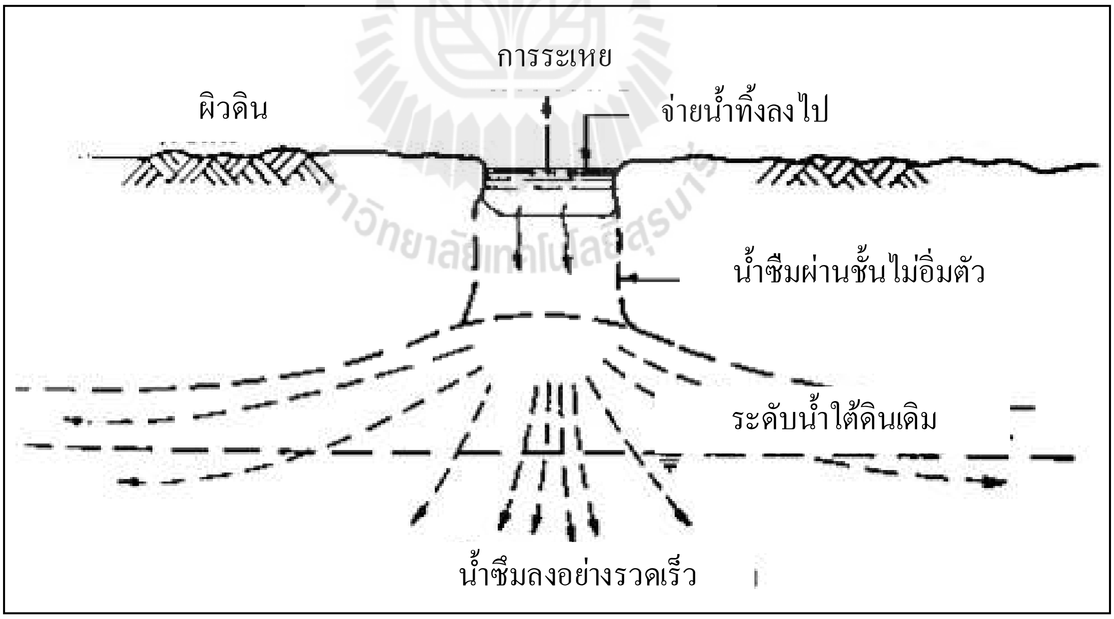
ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบ โดยพื้นที่ที่มีความสามารถในการไหลซึมลงดินไม่เร็วเกินไปจะเป็นการเพิ่มการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ และเคมีในช่วงเมตรแรกให้มากขึ้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2547; Reynolds and Richards, 1996) ในการเลือกขนาดของหินดินดานที่จะนำมาใช้ในระบบหากพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน พบว่าหินดินดานขนาด D และขนาด E มีความเหมาะสมมากกว่าหินดินดานขนาด A-C เนื่องจากหินดินดานขนาด D และขนาด E มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้อยกว่าหินดินดานขนาด A-C ซึ่งจะทำให้การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและเคมีในช่วงเมตรแรกมีมากกว่า และจากผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่าหินดินดานขนาด D และ E มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีสูงกว่าหินดินดานขนาด A-C และมีอายุการใช้งานของระบบนานกว่าระบบที่บรรจุหินดินดานขนาด A-C และตลอดระยะเวลาในการเดินระบบ (ระยะเวลาประมาณ 1250 นาที) ไม่เกิดปัญหาของการอุดตันในระบบ

ตารางที่ 4.22 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดโดยดิน

ปัจจัย	ระบบอัตราไหลช้า	ระบบไหลซึมเร็ว	ระบบน้ำไหลนอง
เทคนิคการกระจายน้ำ	ใช้หัวกระจายน้ำเสีย หรือระบายตามร่องน้ำ	นิยมใช้แบบระบาย ตามร่องน้ำ	ใช้หัวกระจายน้ำเสีย หรือระบายตามร่องน้ำ
ภาระปริมาณน้ำต่อปี	2-20 ฟุต (0.6-6.0 เมตร)	20-400 ฟุต (6-120 เมตร)	10-70 ฟุต (3-21 เมตร)
ภาระปริมาณน้ำต่อสัปดาห์	0.5-4.0 นิ้ว (1.25-10 เซนติเมตร)	4-96 นิ้ว (10-240 เซนติเมตร)	2.5-16.0 นิ้ว (6.25-40 เซนติเมตร)
พื้นที่บำบัดสำหรับ 1 เมกกะแกลลอนต่อวัน	60-700 เอเคอร์	7-60 เอเคอร์	15-110 เอเคอร์
ความต้องการบำบัดขั้นต้น	การบำบัดเบื้องต้น และบ่อตกตะกอน	การบำบัดเบื้องต้น และบ่อตกตะกอน	การกำจัดกรวด และทราย
ความต้องการการปลูกพืช	ต้องการการปลูกพืช	หญ้า	หญ้าที่ทนน้ำ

หมายเหตุ : Crites et al. (2000)

ระบบไหลซึมเร็วเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้พื้นดินเป็นเสมือนถังกรอง และชั้นดินเป็นเสมือนชั้นกรองน้ำเสีย โดยระบบมีภาระปริมาณน้ำเสียอยู่ในช่วง 6-120 เมตรต่อปี (Crites et al., 2000) ซึ่งน้ำเสียที่จะปล่อยเข้าสู่ระบบไหลซึมเร็วต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นเสียก่อน และเมื่อน้ำเสียถูกปล่อยลงสู่ร่องรองรับน้ำเสียก็จะเกิดการระเหย และการซึมลงใต้ชั้นดินดังแสดงในรูปที่ 4.29 การปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบทำได้ 2 ลักษณะ คือ การใช้ระบบหัวกระจายน้ำเสียและการปล่อยน้ำเสียลงสู่ร่องรองรับน้ำเสีย ซึ่งการใช้ระบบหัวกระจายน้ำเสียนั้นค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่กระจายลงสู่พื้นดินต้องมีค่าน้อยกว่าอัตราการซึมลงใต้ชั้นดิน มิฉะนั้นจะมีน้ำเสียขังอยู่บนพื้นดินทำให้เกิดการตกตะกอนและทำให้เกิดปัญหาการอุดตันขึ้น สำหรับการปล่อยน้ำเสียลงสู่ร่องรองรับน้ำเสียนั้นอัตราการไหลของน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่ร่องรองรับน้ำเสียอาจมีค่าสูงกว่าอัตราการซึมลงใต้ชั้นดินได้ แต่ต้องไม่ให้มีน้ำเสียขังอยู่ในร่องรองรับน้ำเสียลึกเกินกว่า 0.45 เมตร เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงดันของน้ำที่กดลงบนพื้นผิวล่างของร่องรองรับน้ำเสีย ซึ่งจะทำให้เกิดการทับถมของตะกอนขึ้นได้ โดยทั่วไประบบไหลซึมเร็วนิยมปล่อยน้ำเสียลงสู่ร่องรองรับน้ำเสียมากกว่าการใช้ระบบหัวกระจายน้ำเสีย เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียลงสู่ร่องรองรับน้ำเสียจะช่วยป้องกันการอุดตันของดินบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่มากเกินไปได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)



รูปที่ 4.29 ระบบแบบไหลซึมเร็ว (Rapid Infiltration System) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542)

ในการออกแบบระบบไหลซึมเร็วจะใช้ค่าอัตราการซึมผ่าน และความสามารถในการซึมผ่านได้ของดินมาคำนวณเพื่อหาอัตราภาระชลศาสตร์ต่อปี อัตราภาระปริมาณน้ำเสียที่ลงสู่พื้นดิน และพื้นที่บำบัด ซึ่งในการเลือกใช้อัตราภาระปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่พื้นดินจะต้องคำนึงถึงรอบเวลาดำเนินการ ค่าอัตราภาระชลศาสตร์ต่อปี และระยะเวลาที่ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบ เนื่องจากอัตราภาระปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่พื้นดินมีผลต่อการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของระบบ และในการคำนวณหาขนาดพื้นที่บำบัดของระบบไหลซึมเร็วต้องนำขนาดของพื้นที่ที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความต้องการพื้นที่บำบัดสำหรับการกำจัดไนโตรเจนและค่าภาระสารอินทรีย์ เพื่อเลือกขนาดพื้นที่บำบัดที่เหมาะสม

โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งมีปริมาณน้ำเสียประมาณ 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีความเข้มข้นบีโอดี และซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพเท่ากับ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 750 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และความเข้มข้นสีเท่ากับ 420 แพลตินัมโคบอลล์ หากต้องการนำระบบบำบัดโดยดินประเภทระบบไหลซึมเร็วมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งในระบบจะนำหินดินดานมาประยุกต์ใช้ โดยการนำหินดินดานมาทำเป็นแปลงยกสูงขึ้นจากระดับพื้นดินเดิม และมีร่องรองรับน้ำเสียที่รองพื้นด้วยหินดินดานกั้นระหว่างแปลงเพื่อที่น้ำเสียจะได้มีโอกาสสัมผัสกับหินดินดานในทุกทิศทางไม่ว่าจะเป็นในทิศทาง การไหลซึมลงสู่พื้นดินหรือไหลออกทางด้านข้าง โดยหินดินดานที่จะนำมาใช้ในระบบมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.156 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านเท่ากับ 23.634 เมตรต่อวัน ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสามารถคำนวณหาอัตราภาระชลศาสตร์ต่อปี และขนาดของพื้นที่บำบัดได้ ดังต่อไปนี้

อัตราภาระชลศาสตร์ต่อปี (L_w) (กำหนดค่าตัวคูณเท่ากับ 0.1) คำนวณจาก

$$L_w = \left(23.634\,\frac{\text{เมตร}}{\text{วัน}}\right)\left(365\,\frac{\text{วัน}}{\text{ปี}}\right)(0.1)$$

$$= 862.641\,\frac{\text{เมตร}}{\text{ปี}}$$

ขนาดพื้นที่บำบัด (A)

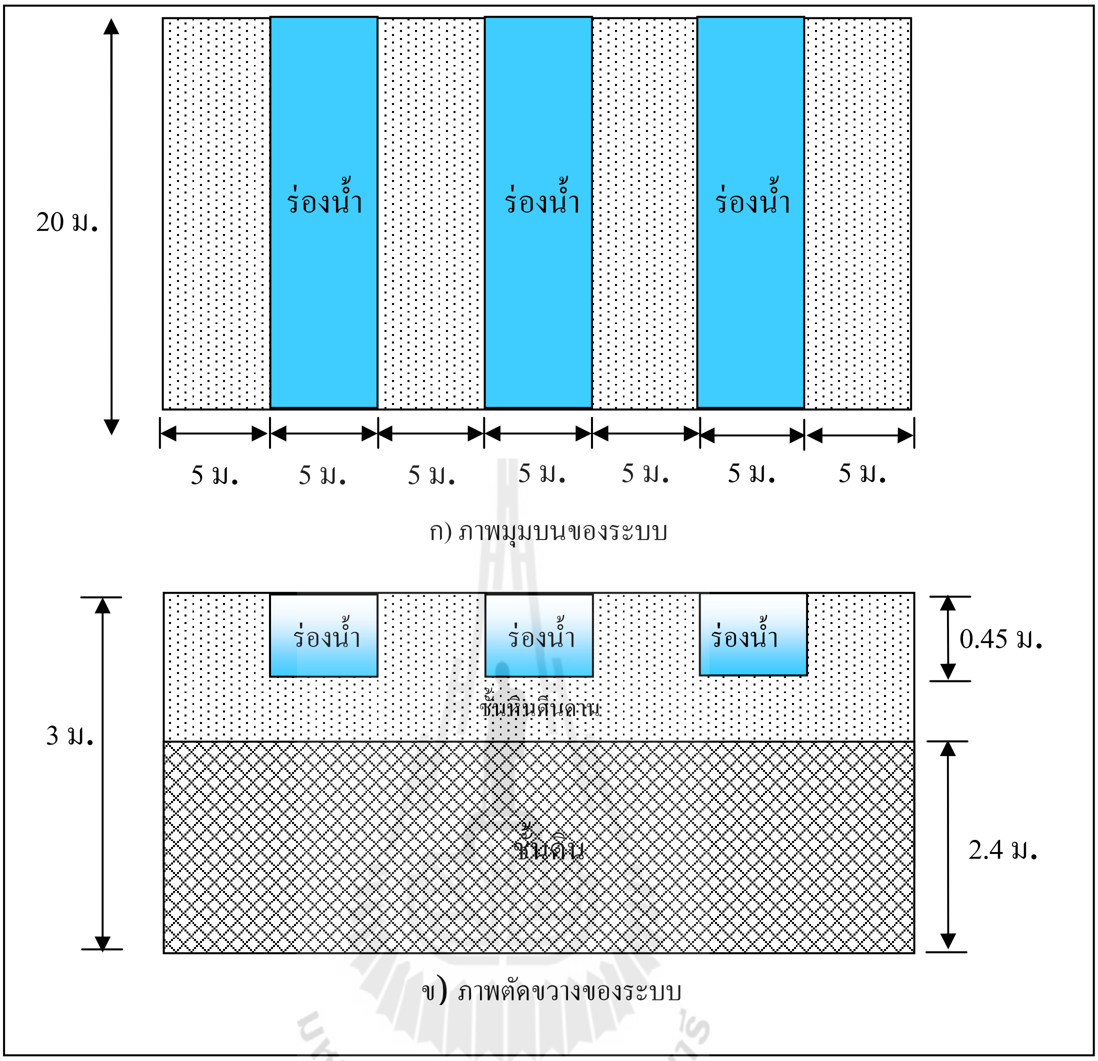
$$A = \frac{\left(500\,\frac{\text{ลูกบาศก์เมตร}}{\text{วัน}}\right)\left(365\,\frac{\text{วัน}}{\text{ปี}}\right)}{\left(864.641\,\frac{\text{เมตร}}{\text{ปี}}\right)}$$

$$= 211.560 \text{ ตารางเมตร}$$

จากการคำนวณพบว่าระบบต้องการใช้พื้นที่ในการบำบัดเท่ากับ 211.560 ตารางเมตร ซึ่งด้วยขนาดพื้นที่ดังกล่าวระบบจะต้องรองรับภาระบรรทุกบีโอดีเท่ากับ 59.085 กรัมบีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.000-18.000 กรัมบีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2542) ดังนั้นในการเดินระบบอาจทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและการอุดตันในระบบได้ หากต้องการให้ระบบมีภาระบรรทุกบีโอดีอยู่ในช่วงแนะนำระบบต้องการพื้นที่ในการบำบัดอย่างน้อย 700 ตารางเมตร ซึ่งด้วยขนาดพื้นที่ดังกล่าวระบบจะมีค่าภาระบรรทุกบีโอดี และซีโอดีเท่ากับ 17.857 กรัมบีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน และ 535.714 กรัมซีโอดีต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ และมีค่าภาระบรรทุกสีเท่ากับ 300.000 กรัมแพลตินัมในรูปคลอโรแพลติเนตต่อตารางเมตรต่อวัน

จากการคำนวณออกแบบระบบพบว่าระบบต้องการพื้นบำบัดเท่ากับ 700 ตารางเมตร ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นหินดานที่ทำเป็นแปลงยกสูงจากระดับพื้นดินเดิม และส่วนที่เป็นร่องรองรับน้ำเสียที่รองพื้นด้วยหินดินดาน และแผนผังของระบบไหลซึมเร็วแสดงดังรูปที่ 4.30 จากแผนผังระบบสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณหินดินดานที่จะนำมาใช้ในระบบ และอายุการใช้งานของระบบได้ดังต่อไปนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.30 การออกแบบตัวอย่างระบบไหลซึมเร็วโดยใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง

ปริมาณหินดินดานที่จะนำมาใช้ในระบบ

ปริมาตรหินดินดานที่ใช้ในการทำเป็นแปลงยกสูงจากระดับพื้นดินมีปริมาตรเท่ากับ 220 ลูกบาศก์เมตร และหินดินดานที่ใช้ในการรองพื้นร่องรองรับน้ำเสียมีปริมาตรเท่ากับ 45 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นปริมาตรรวมของหินดินดานที่ใช้ในระบบเท่ากับ 265 ลูกบาศก์เมตร

ปริมาณหินดินดานที่ใช้ = (ความหนาแน่น)(ปริมาตรของหินดินดานที่ใช้ในระบบ)

= (1.156 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)(265 ลูกบาศก์เมตร)

= 306340 กิโลกรัม

อายุการใช้งานของระบบ

ค่าความจุในการดูดซับสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดานที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.708 มิลลิกรัมแพลตินัมในรูปคลอโรแพลติเนตต่อกรัมหินดินดาน

ปริมาณสีย้อมที่ระบบสามารถรับได้ = (0.708 มิลลิกรัมต่อกรัม)(306340 กิโลกรัม)

= 216888720 มิลลิกรัมแพลตินัม

= 216.889 กิโลกรัม

ปริมาณสีย้อมที่เข้าระบบ = (500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)(420 แพลตินัมโคบอลต์)

= 210000000 มิลลิกรัมแพลตินัมต่อวัน

= 210 กิโลกรัมแพลตินัมต่อวัน

$$\text{อายุการใช้งานของระบบ} = \frac{216.889\,\text{กิโลกรัมแพลตินัม}}{\left(210\,\dfrac{\text{กิโลกรัมแพลตินัม}}{\text{วัน}}\right)}$$

= 1.033 วัน

สภาวะที่ใช้ในการออกแบบ และเดินระบบสำหรับตัวอย่างระบบไหลซึมเร็วที่ใช้หินดินดานเป็นตัวกลาง สามารถสรุปได้ดังแสดงดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 สรุปค่าที่ได้จากการออกแบบในงานวิจัย

ปัจจัย	หน่วย	ค่าที่ใช้
ขนาดของหินดินดานที่ใช้ (ผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1)	มิลลิเมตร	D (0.18-0.25) E (0.15-0.18)
สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน	เมตรต่อวัน	23.634
ความหนาแน่นของหินดินดาน	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	1.156
ปริมาณน้ำเสีย	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน	500
อัตราภาระชลศาสตร์	เมตรต่อปี	862.641
ขนาดพื้นที่บำบัด	ตารางเมตร	700
ค่าภาระบรรทุกปริมาณสี	กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน	300.000
ค่าภาระบรรทุกบีโอดี	กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน	17.857
ค่าภาระบรรทุกซีโอดี	กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน	535.714
ค่าความจุการดูดซับสี	มิลลิกรัมกรัมต่อกรัม	0.708
ปริมาณหินดินดานที่ใช้	กิโลกรัม	306340.000
อายุการใช้งานของระบบ	วัน	1.033

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิดของหินดินดาน โดยได้ทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ความสามารถในการดูดซับ ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ การเข้าสู่สมดุลการดูดซับในชุดทดลองคอลัมน์ และการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมของหินดินดาน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังต่อนี้

5.1.1 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสสำหรับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดาน พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 72 ชั่วโมง

5.1.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue Yellow และสีย้อมผสมรีแอคทีฟ 4 สีของหินดินดาน สามารถอธิบายกระบวนการดูดซับได้ด้วยสมการไอโซเทอมทั้งแบบ Langmuir และแบบ Freundlich เนื่องจากมีค่า $R^2 > 0.9500$ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red และ Yellow และสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 จะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 3 และ 4 โดยสรุปความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.1.2.1 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.01103-0.0322 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.2 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.4479-1.1409 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.3 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.0133-0.0255 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.4 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.2767-0.4662 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.5 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 2 สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.0852-0.1464 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.6 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.0071-0.0146 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.2.7 ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 4 สูงสุดของหินดินดาน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.0586-0.0978 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.1.3 ปัจจัยสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ดังต่อไปนี้

5.1.3.1 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของหินดินดานจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow มีค่าเท่ากับ 700 แพลตินัมโคบอลต์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 0.1212-0.2234 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าอยู่ในช่วง 0.9903-1.8728 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟ Blue และมีค่าอยู่ในช่วง 0.1406-0.2650 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

5.1.3.2 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลงมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow เท่ากับ 2 โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 0.17953-0.2813 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าอยู่ในช่วง 1.5804-2.0553 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue และมีค่าอยู่ในช่วง 0.1421-0.2711 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

5.1.3.3 เมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ของหินดินดานมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับอยู่ในช่วง 0.0942-0.1704 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีค่าอยู่ในช่วง 0.5275-0.8778 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue และมีค่าอยู่ในช่วง 0.1155-0.2661 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow

5.1.3.4 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิมีผลกับการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue มากกว่าสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red และ Yellow

5.1.4 การศึกษา Breakthrough curve

5.1.4.1 ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของหินดินดานแต่ละขนาด เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินระบบของสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3

ชนิด พบว่าสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red มีอายุการใช้งานของระบบนานกว่าสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue และ Yellow แต่มีค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดหมดสภาพน้อยกว่าสีย้อมรีแอคทีฟ Blue

5.1.4.2 ผลการศึกษา Breakthrough curve การดูดซับสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดของหินดินดานขนาด E เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินระบบของสีย้อมผสมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิด พบว่าสีย้อมผสมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 3 มีอายุการใช้งานของระบบนานกว่าสีย้อมผสมรีแอคทีฟอีก 3 ชนิด แต่มีค่าความสามารถในการดูดซับที่จุดหมดสภาพน้อยกว่าสีย้อมผสมรีแอคทีฟอีก 3 ชนิด

5.1.5 ผลการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุดในช่วงระยะเวลา 80 นาทีแรกของการเดินระบบ พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อเดินระบบจนถึงจุดหมดสภาพ พบว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด ที่จุดหมดสภาพมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด พบว่าอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 7 และ 4 เท่า ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด พบว่าอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 จุด มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอายุการใช้งานของระบบในการกำจัดสีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพอายุการใช้งานของระบบนานกว่าน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมและน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพประมาณ 5 และ 2.5 เท่าตามลำดับ

รายการอ้างอิง

กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา. (2548). **ผลของอุณหภูมิ และภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่อการดูดติดของสีรีแอคทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2542). **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม**. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.

กรมวิชาการเกษตร. (2546). **คู่มือวิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2549ก). **การใช้แร่อุตสาหกรรม 2544-2548** [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001160467999.pdf

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2549ข). **ผลผลิตเปรียบเทียบ 5 ปี** [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001148286264.pdf

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2551ก). **Mineral Production of Thailand 2006-2007** [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001220416353.pdf

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2551ข). **สถิติการใช้แร่อุตสาหกรรมภายในปี 2006-2007** [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001208485317.pdf

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2547). **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย.** เล่มที่ 5. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี : เอส. อาร์.พริ้นติ้ง แมสโปรดักส์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2542). **การบำบัดน้ำเสีย.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์.

จารุทัศน์ มิลินทะเลข. (2537). **การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีทางเคมี.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชนิตา เสมรัตน์. (2543). **ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชนิสา หงอสุวรรณ. (2548). **การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ และสีย้อมเบสิคโดยใช้กากตะกอนของเสีย.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชัชวาล สิงหกันต์. (2543). **การกำจัดสีรีแอคทีฟโดยใช้หญ้าแขมปรับสภาพ.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.

โชติรส เอี่ยมสอาด. (2545). **การกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ด้วยการดูดซับโดยใช้ไคโตซาน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐพันธุ์ ศุภกา. (2546). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดวงรัตน์ อินทร. (2546). **การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอทางเคมี.** สาขาอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคมหิดล.

เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. (2544). การ**กำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธานี สิทธิไพโรจน์สกุล. (2547). **การดูดซับฟอสเฟตด้วยคอลลอยด์สังเคราะห์และคอลลอยด์ธรรมชาติ.**วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ธิดารัตน์ บุญศรี. (2543). **การบำบัดน้ำเสียที่มีสีด้วยชั้นดิน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นภา ศิวรังสรรค์. (2542). **การกำจัดสีน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยโพลีเมอร์.** รายงานผลการวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นภารัตน์ จิวาลักษณ์. (2545). **การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี มหวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นิตยา ผาสุขพันธุ์. (2545). **การศึกษาการใช้ระบบถังเทที่มีตัวกลางในการบำบัดสารอินทรีย์และสีรีแอคทีฟจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บุษรา ประชุมญาติ. (2545). **การกำจัดสีรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์.** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปฏิเวธ ชินเชษฐ. (2543). **การบำบัดน้ำเสียสีดิสเพอร์สโดยกระบวนการยูเอเอสบี.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ประนัดดา เจริญราช. (2548). **การบำบัดน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมไหมโดยใช้บึงประดิษฐ์.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ขอนแก่น.

ประเสริฐ ตปนียางกูล. (2536). แนวทางการป้องกันและลดปัญหามลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม. **วารสาร TTIS Textile Digest**, 12(3) : 12-17

ปวีณา ธนะสังข์. (2539). **การกำจัดสีจากน้ำทิ้งฟอกย้อมสิ่งทอ โดยวิธีการออกซิเดชัน-รีดักชัน.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์. (2546). **การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยวิธีการตกตะตอนทางไฟฟ้าเคมี.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปิยะชน สันดุษฎี. (2545). **ผลของสับสเตรทที่มีต่อการกำจัดสีรีแอคทีฟและฟอสฟอรัสโดยระบบเอสบีบีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปิยะวรรณ หลีชาติ ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ วรนันต์ นาคบรรพต และประไพ ธุระกิจ. (2545). **การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้แกลบ.** การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, 24-26 ตุลาคม. ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์. กรุงเทพฯ. หน้า 676.

มณเฑียร กังศศิเทียม. (2541). **กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูประถัมภ์.

มยุรี ปาลวงศ์. (2547). **หินดินดาน**. กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาธุรกิจ สอพ. กพร. กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/ dt/pper/000001099463794.pdf

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). **วิศวกรรมประปา.** เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัตนา รุจิรวนิช. (2543). **การดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตแซน.** รายงานผลการวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ลิลี่ โกศัยยานนท์. (2541). **คู่มือวิชาการสิ่งทอ.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วรรณวิภา ผลาหาญ. (2547). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรรษวรรณ เที่ยงวรรณกานต์. (2546). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิวัฒน์ โตธิรกุล. (2548). **หินน้ำมัน (Oil Shale)**. กลุ่มส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งและสิ่งแวดล้อม สำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่เขต 3 กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.dpim.go.th/dt/pper/ 0000011073 33994.pdf

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา สวลี เสนาพิทักษ์ สรินทร ลิ่มปนาท กฤษณา ศิรเลิศมุกูล และ ศรีไฉล ขุนทน. (2543). **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สกล ศิริรัตน์.(2546). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิคจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สถาพร คูวิจิตรจารุ. (2542). **ทดลองปฐพีกลศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไลบรารีไนน์.

สุกานดา กาสังข์. (2548). **การพัฒนาและปรับปรุงวัสดุดูดซับราคาถูกเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิก.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

แสวง เกิดประทุม ชนากานต์ อาษาสุจริต และ อธิษฐาน ทิมแย้มประเสริฐ. (2551). บำบัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยโอโซน. **Thai Environmental Engineering Magazine**. 5(4) : 15-18

สำอาง หอมชื่น และ กิตติ เอกอำพน. (2529). **การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้กกกลม (Scirpus macronatus) และผักตบชวา (Eichhornia crassipes).** การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 24, 27-29 ตุลาคม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. หน้า 18

เสรีวัฒน์ สมินทร์ปัญญา. (2538). **โลกและหิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาส์น.

หิน (Rock). (2004). **โครงการเรียนรู้เรื่องวิทยาศาสตร์และโลกอวกาศ** [ออนไลน์]. ได้จาก : http://www.lesa.in.th/geo/rocks/rocks.htm

อภิชาติ หิรัญจิตต์. (2539). **การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดติดผิวและโคแอกกูเลชัน.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิสิทธิ์ เนตรวงศ์. (2538). **การกำจัดสีในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีการดูดซับด้วยขี้เถ้าลอยลิกไนต์**. เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อมรา ดาวไธสง. (2550). **การดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของหินดินดานเพื่อนำไปใช้เป็นตัวกลางในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อังคณา ปัญญาอ่อง อนวัช พินิจศักดิ์กุล ศศิธร พุทธวงษ์ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร และสร้อยดาว วินิจนันทรัตน์. (2550). **การกำจัดสีรีแอคทีฟบลูโดยกระบวนการบำบัดทางไฟฟ้าเคมี.** การประชุมวิชาการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ ครั้งที่ 1. 31 สิงหาคม 2550. โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์. กรุงเทพฯ.

Abu-El-Sha'r, W. Y., Gharaibeh, S. H., and Mahmoud, S. (1999). Removal of dyes from aqueous solutions using low-cost sorbents made of solid residues from olive-mill wastes (JEFT) and solid residues from refined Jordanian oil shale. **Environmental Geology**. 39 (10) : 1090-1094

Albanis, T. A., Hela, D. G., Sakellarides, T. M., and Danis T. G. (2000). Removal of dyes from aqueous solutions by adsorption on mixtures of fly ash and soil in batch and column techniques. **Global Nest**. 2(3) : 237-244

Al-Asheh, S., and Banat, F. (2000). Adsorption of copper and zinc by oil shale. **Environmental Geology**. 40 (6) : 693-698

Al-Degs, Y., Khraisheh, M. A. M., Allen, S .J., Ahmad, M. N., and Walker, G. M. (2007). Competitive adsorption of reactive dyes from solution : Equilibrium isotherm studies in single and multissolute systems. **Chemical Engineering**. 128 : 163-167

Al-Degs, Y. S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H., and Walker, G. M. (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. **Dyes and Pigments**. 77 : 16-23

Al-Degs, Y. S., Khraisheh, M. A. M., Allen, S .J., and Ahmad, M. N. (2009). Adsorption characteristics of reactive dyes in columns of activated carbon. **Hazardous Materials**. 165 : 944-949

Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes using shale oil ash. **Water Research**. 34 (17) : 4295-4303

Al-Qodah, Z., Shawaqfeh, A. T., and Lafi, W.K. (2007). Adsorption of pesticides from aqueous solutions using oil shale ash. **Desalination**. 208 : 294-305

Allegre, C., Maisseu, M., Charbit, F., and Moulin, P. (2004). Coagulation-flocculation decantation of dye house effluents : concentrated effluents. **Hazardous Materials**. B116 : 57-64

Amin, N. K. (2008). Removal of reactive dye from aqueous solution by adsorption onto activated carbon prepared from sugarcane bagasse pith. **Desalination**. 223 : 152-161

Annadurai, G., Chellapandian, M., and Krishnan, M. R. V. (1999). Adsorption of reactive dye on chitin. **Environmental Monitoring and Assessment**. 59 (1) : 111-119

Armagan, B., Turan, M., and Celik, M. S. (2004) Equilibrium studies on the adsorption of reactive azo dyes into zeolite. **Desalination**. 170 : 33-39

APHA, AWWA, and WEF. (2005). **Standard method for the examination of the water and wastewater**. Washington D. C. : American Public Health Association.

ASTM. (2004a). **Annual Book of ASTM Standard : Soil and rock**. 04.08-04.09. USA : Baltimore.

ASTM. (2004b). **Annual Book of ASTM Standard : Soil and rock**. 15.01. USA : Baltimore.

Avlonitis, S. A., Poulios, L., Sotiriou, D., Pappas, M., and Moutesidis, K. (2008). Simulated cotton dye effluents treatment and reuse by nanofiltration. **Desalination**. 221 : 259-267.

Aydin, H., and Baysal, G. (2006). Adsorption of acid dyes in aqueous solutions by shells of bittim. **Desalination**. 196 : 248-259

Banat, I. M., McMullan, G., Meehan, C., Kirby, N., Nigam, P., Smyth, W. F., and Marchant, R. (1999). **Microbial decolorization of textile dyes present in textile industries effluen**t. In: Proceedings of the Industrial Waste Technical Conference, Indianapolis, USA. pp. 1-16

Barclay, S., and Buckley, C. (2000). **Waste minimization guide for the textile industry : A step towards cleaner production**. The Pollution Research Group. Universitry of Naltal, Durban, South Africa.

Barka, N., Qourzal, S., Assabbane, A., Nounah, A., and Ait-Ichou, Y. (2010). Removal of Reactive Yellow 84 from aqueous solutions by adsorption onto hydroxyapatite. **Saudi Chemical Society**.

Bes-Pia, A., Mendoza-Roca, J. A., Alcaina-Miranda, M. I., Iborra-Clar, A., and Iborra-Clar, M. I. (2002). Reuse of wastewater of the textile industry after its treatment with a combination of physic-chemical treatment and membrane technologies. **Desalination**. 149 : 169-174

Buckley, C. A. (1992). Membrane technology for the treatment of dyehouse effluents. **Water Science and Tecnology**. 25(10) : 203-209

Bulc, T. G., and Ojstrsek, A. (2008). The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. **Hazardous Materials**. 155 : 76-82

Chaudhuri, M., Elmolla, E. S., and Othman, R. B. (2009). **Removal of reactive dyes from aqueous solution by adsorption on coconut coir activated carbon**. 2nd International Conference on Engineering Technology 2009. Kuala Lumpur, Malaysia.

Cheremisinoff, N. P. (2002). **Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies**. Butterworth-Heinemann, Boston.

Christie, R. M. (2007). **Environmental Aspects of Textile Dyeing**. Woodhead, Boca Raton, Cambridge.

Cicek, F., Ozer, D., Ozer, A., and Ozer, A. (2007). Low cost removal of reactive dyes using wheat bran. **Hazardous Materials**. 146 : 408-416

Crites, W. R., Reed, C. S., and Bastian, K.R. (2000) **Land Treatment Systems for Municipal and Industrial Wastes**. McGraw-Hill. New York.

Daothaisong, A., and Yimrattanabovorn, J. (2008). **Phosphate removal by shale for utilization in constructed wetland**. In Proceeding of International Conference on Managing Wetlands for Sustainnable Development : Innovative Research and Lessons Learned, Effective Partnerships, and the Need for Co-Management 2008 (pp 1-9). Trang, Thailand. Prince of Songkla University.

Davies, L. C., Carias, C. C., Novais, J. M., and Martins-Dias, S. (2005). Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using Phragmites australis in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland. **Ecological Engineering**. 25 : 594-605.

Davies, L. C., Pedro, I. S., Novais, J. M., and Martins-Dias, S. (2006). Aerobic degradation of acid orange 7 in a vertical-flow constructed wetland. **Water Research**. 40 : 2055-2063

Davies, L. C., Vacas, A., Novais, J. M., Freire, F. G., and Martins-Dias, S. (2007). Vertical flow constructed wetland for textile effluent treatment. **Water Science and Technology**. 55 : 127-134

Dhale, A. D., and Mahajani, V. V. (2000). Studies in treatment of disperse dye waste : membrane-wet oxidation process. **Waste Management**. 20 : 85-92

Dizge, N., Aydiner, C., Demirbas, E., Kobya, M., and Kara, S. (2008). Adsorption of reactive dye from aqueous solutions by fly ash : Kinetic and equilibrium studies. **Hazardous Materials**. 150 : 737-746

Dolphen, R. (2005). **Adsorption of synthetic reactive dye wastewater by modified chitin**. M.S. thesis. King Mongkut's University of Technology Thonburi. Thailand.

Dos Santos, A. B., Cervantes, F. J., and Van Lier, J. B. (2007). Review paper on current technologirs for decolouriasation of textile wastewater : Prespectivefor anaerobic biotechnology. **Bioresource Technology**. 98 : 2369-2385

Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1997). Phosphate and ammonium removal by constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate**. Water Science and Technology**. 35 (5) : 95-102

Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (1999). Physical-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems. **Water Research**. 33 (17) : 3595-3602

Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., and Smith, K. A. (2000). Phosphate and ammonium distribution in pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. **Water Research**. 34 (9) : 2483-2490

El-Gohary, F., and Tawfik, A. (2009). Decolorization and COD reduction of disperse and reactive dyes wastewater using chemical-coagulation followed by sequential batch reactor (SBR) process. **Desalination**. 249 : 1159-1164

El Qada, E. N., Allen, S. J., and Walker, G. M. (2006). Adsorption of methylene blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal : A study of equilibrium adsorption isotherm. **Chemical Engineering**. 124 : 103-110

Eren, Z., and Acar, F. N. (2006). Adsorption of reactive black 5 from an aqueous solution : equilibrium and kinetic studies. **Desalination**. 194 : 1-10

Figueiredo, S. A., Boaventura, R. A., and Loureiro, J. M., (2000). Color removal with natural adsorbents : modeling, simulation and experimental Separation**. Purification Technol**. 20 : 129-141

Faith, D., Horsfield, C. J., and Nazarov, W. (2006). Characterization of pore size of trimethylol propane triacrylate (TMPTA) polymer foam by pulsed sputter coating and SEM analysis. **Materials Science**. 41(13) : 3973-3977

Faria, P. C. C., Orfao, J. J. M., and Pereira, M. F. R. (2004). Adsorption of anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries. **Water Research**. 38 : 2043-2052

Garg, V. K., Amita, M., Kumar, R., and Gupta, R. (2004). Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian Rosewood Sawdust : a timber industry waste. **Dyes and Pigments**. 63 : 243-250

Gharaibeh, S. H., Abu-El-Shar, W. Y., and Al-Kofahi, M. M. (1998). Removal of selected heavy metals from aqueous solution using a solid by-product from the Jordanian oil shale refining. **Environmental Geology**. 39 (2) : 113-116

Gregor, K. H., and Schwarzer, H. (1993). **Oxidative decolourisation of textile wastewater with advanced oxidation processes**. A paper presented at symposium 'Varstvo voda in ciscenje odpadnih voda', Portoroz.

Gulnaz, O., Kaya, A., and Dincer, S. (2006). The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. **Hazardous Materials**. 134 : 190-196

Gupta, G. S., Prasad, G., and Singh, V.N. (1990). Removal of chrome dye from aqueous solution by mixed adsorbents : fly ash and coal. **Water Research**. 24 : 45-50

Gupta, V. K., and Suhas. (2009) Application of low-cost adsorbents for dye removal-A review. **Environmental Management**. 1-30

Hai, F. I., Yamamoto, K., and Fukushi, K. (2007). Hybrid treatment systems for dye wastewater. **Critical Reviews Environmental Science Technology**. 37: 315-377

Hameed, B. H., Din, A. T. M., and Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon : Kinetics and equilibrium studies. **Hazardous Materials**. 141 (3) : 819-825

Ichcho, S., Khouya, E., Fakhi, S., Ezzine, M., Hannache, H., Pallier, R., and Naslain, R. (2005). Influence of the experimental conditions on porosity and structure of adsorbents elaborated from Moroccan oil shale of Timahdit by chemical activation. **Hazardous Materials**. 118 : 45-51

Kadirvelu, K., Palanival, M., Kalpana, R., and Rajeswari, S. (2000). Activated carbon from an agricultural by-product, for the treatment of dyeing industry wastewater. **Bioresource Technology**. 74 : 263-265.

Kadlec, R. H., and Knight, R.L. (1996). **Treatment Wetlands**. Boca Raton. Lewis Publishers.

Karaca, S., Guirses, A., Acikyildiz, M., and Ejder, M. (2008). Adsorption of cationic dye from aqueous solutions by activated carbon. **Microporous and Mesoporous Materials**. 115 : 376-382

Karadag, D., Akgul, E., Tok, S., Erturk, F., Kaya, M. A., and Turan, M. (2007). Basic and reactive dye removal using natural and modified zeolites. **Chemical and Engineering Data**. 52 (6) : 2436-2441

Karaoglu, M. H., Dogan, M., and Alkan, M. (2010). Kinetic analysis of reactive blue 221 adsorption on kaolinite. **Desalination**. 256 : 154-165

Khalid, N., Ahmad, S., Toheed, A., and Ahmed, J. (2000). Potential of rice husks for antimony removal. **Applied Radiation and Isotopes**. 52 : 31-38

Khraisheh, M. A. M., Al-Ghouti, M. A., Allen, S. J., and Ahmad, M. N. (2005). Effect of OH and silanol groups in the removal of dyes from aqueous solution using diatomite. **Water Research**. 39 : 922-932

Kim, T. H., Park, C., Yang, J., and Kim, S. (2004). Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. **Hazardous Materials**. 112 : 95-103.

Kulkami, S. K., Mehta, A. K., and Kunchandy, J. (1986). Antiinflammatory acrions of clonidine, guanfacine and B-HT 920 against various inflammagen-induced acute paw oederma in rats. **Archives Internationales de Pharmacodynamie et de Thérapie.** 279 : 324-334

Kyzas, G. Z., and Lazaridis, N. K. (2009). Reactive and basic dyes removal by sorption onto chitosan derivatives. **Colloid and Interface Science**. 331 : 32-39

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Lee, Y. H., Matthews, R. D., and Pavlostathis, S. G. (2006). Biological decolorization of reactive anthraquinone and phthalocyanine dyes under various oxidation-reduction conditions. **Water Environmental Research**. 78 : 156-169

Leechart, P., Nakbanpote, W., and Thiravetyan, P. (2009). Application of 'waste' wood-shaving bottom ash for adsorption of azo reactive dye. **Environmental Management**. 90 : 912-920

Lin, S. H., and Lai, C. L. (1999). Catalytic oxidation of dye wastewater by metal oxcide catalyst and granular activated carbon. **Environment International**. 25 (4): 497-504.

Lin, S. H., and Lui, W. Y. (1994). Continuous treatment of textile water by ozonation and coagulation. **Environmental Engineerin**g. 120(2) : 437-446

Ling, W. (1994). **Color removal from dyeing wastewater by electroflotation technique**. M.S. thesis. Asian Institute of Technology. Thailand.

Lu, K., Zhang, X. L., Zhao, Y. L., and Wu, Z. L. (2010). Removal of color from textile dyeing wastewater by foam separation. **Hazardous Materials**. 182 : 928-932

Lu, X., Liu, L., Liu, R., and Chen, J. (2010). Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finshing processes : A case study. **Desalination**. 258 : 229-232

Malik, P. K. (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes : a case study of Acid Yellow 36. **Dyes and Pigments**. 56 : 239-249

Mall, I. D., Srivastava, V. C., Agarwal, N. K., and Mishra, I. M. (2005). Removal of congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon : Kinetic study and equilibrium isotherm analyses. **Chemosphere**. 61 : 492-501.

Martin Marietta Material. (2004). **Material Safety Data Sheet of Shale Rock** [On-line]. Available : http://www.martinmarietta.com/Products/MSDS-Shale.pdf

Meric, S., Kaptan, D., and Tunay, C. (2003). Removal of color and COD from a mixture of four reactive azo dyes using Fenton oxidation process. **Environmental Science and Health**. Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering. 38 : 2241-2250

Metcalf and Eddy. (2004). **Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse**. (4th edition). Boston : McGraw-Hill.

Mishra, A., and Bajpai, M. (2006). The flocculation performance of Tamarindus mucilage in relation to removal of vat and direct dyes. **Bioresource Technology**. 97 : 1055-1059

Moussavi, G., and Mahmoudi, M., (2009). Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. **Hazardous Materials**. 168 : 806-812

Myslak, Z. W., Bolt, H. M., and Brockmann, W. (1991). Tumors of the urinary bladder in painters : a case-control study**. American Journal Industrial Medicine**. 19 : 705-713

Nigam, P., Armour, G., Banat, I. M., Singh, D., and Marchant, R. (2000). Physical removal of textile effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues. **Bioresource Technology**. 72 (3) : 219-226

Namboodri, C. G., Perkins, W. S., and Walsh, W. K. (1994a). **Decolurizing dyes with chlorine and ozone** : Part I. American Dyestuff Reporter. 83 : 17-22

Namboodri, C. G., Perkins, W. S., and Walsh, W. K. (1994b). **Decolurizing dyes with chlorine and ozone** : Part II. American Dyestuff Reporter. 83 : 17-26

Netpradit, S., Thiravetyan, P., and Towprayoon, S. (2004). Adsorption of three azo reactive dyes by metal hydroxide sludge : effect of temperature, pH, and electrolytes. Colloid **and Interface Science**. 270 : 255-261

Ojstrsek, A., Fakin, D., and Vrhovsek, D. (2007). Residual dyebath purification using a system of constructed wetland. **Dyes and Pigments**. 74 : 503-507

Ong, S. A., Uchiyama, K., Inadama, D., and Yamagiwa, K. (2009). Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. **Hazardous Materials**. 165 : 696-703

Orfao, J. J. M., Silva, A. I. M., Pereira, J. C. V., Barata, S. A., Fonseca, I. M., Faria, P. C. C., and Pereira, M.F.R. (2006). Adsorption of a reactive dye on chemically modified activated carbons-Influence of pH. **Colloid and Interface Science**. 296 : 480-489

Osma, J. F., Saravia, V., Toca-Herrera, T., and Couto, S. R. (2007). Sunflower seed shells : A novel and effective low-cost adsorbent for the removal of the diazo dye Reactive Black 5 from aqueous solutions. **Hazardous Materials**. 147 : 900-905

Ozacar, M., and Sengil, I. A. (2003). Adsorption of reactive dyes on calcined alunite from aqueous. **Hazardous Materials**. 98 : 211-224

Paikay, S., Banerjee, S., and Mukherji, S. (2005). Sorption of arsenic on to Vindhyan shales : Role of pyrite and organic carbon. **Current Science**. 88 (10) : 1580-1585

Patnukao, P., and Pavassant, P. (2008). Activated carbon from Eucalyptus camaldulensis Dehn bark using phosphoric acid activation. **Bioresource Technology**. 99 : 8540-8543

Panswad, T., and Luangdilok, W. (2000). Decolorization of reactive dye with different molecular structures under different environmental conditions. **Water Research.** 34 : 4177-4184

Petrinic, I., Andersen, N. P. R., Sostar-Turk, S., and Marechal, A. M. L. (2007). The removal of reactive dye printing compounds using nanofiltration. **Dyes and Pigments**. 74 : 512-518

Prochaska, C. A., and Zouboulis, A. I. (2005). Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. **Ecology Engineering.** 26 : 293-303.

Qin, J. J., Oo, M. H., and Kekre, K. A. (2007) Nanofiltration for recovering wastewater from a specific dyeing facility. **Separation and Purification Technology**. 56 : 199-203

Rachakornkij, M., Ruangchuay, S., and Teachakulwiroj, S. (2004). Removal of reactive dyes from aqueous solution using bagasse fly ash. **Songklanakalin Journal of Science and Technology**. 26 : 13-24

Rai, H. S., Bhattacharyya, M. S., Singh, J., Bansal, T. K., Vats, P., and Banerjee, U. C. (2005). Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry : a review of emerging techniques with reference to biological treatment. **Environmental Science Technology**. 35 : 219-238

Ramakrishna, K.,R., and Viragharan, T. (1997). Original contribution use of slag for dye removal. **Waste Management**. 17 (8): 483-488

Rao, B. V. V., and Rao, M. S. (2006). Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by flyash. **Chemical Engineering**. 116 : 77-84

Reddy, S. S., Kotaiah, B., Reddy, N. S. P. and Velu, M. (2006). The removal of Composite reactive dye from dyeing unit effluent using sewage sludge derived activated carbon. **Engineering Environmental Science**. 30 : 367-373

Richard, P. A., and Reynolds, T. D. (1996). **Unit operations and processes in environmental engineering**. 2nd Edition. Boston : PWS Publishing Company.

Sakkayawong, N., Thiravetyan, P., and Nakbanpote, W. (2005). Adsorption mechanism of synthetic reactive dye wastewater by chitosan. **Colloid and Interface Science.** 286 : 36-42

Sen, S., and Demirer, G. N. (2003). Anaerobic treatment of synthetic textile wastewater containing a reactive azo dye. **Engineering Environmental Science**. 129: 595-601

Senthikumaar, S., Kalaamani, P., Porkodi, K., Varadarajan, P. R., and Subburaam, C. V. (2006). Adsorption of dissolved Reactive red dye from aqueous phase onto activated carbon prepared from agricultural waste. **Bioresource Technology**. 97 : 1618-1625

Shawabkeh, R. A. (2006) Adsorption of chromium from aqueous solution by using activated carbo-aluminosilicate material from oil shale. **Colloid and Interface Science**. 299 : 530-536

Shawabkeh, R., Al-Harahsheh, A., and Al-Otoom, A. (2004a). Conversion of oil shale ash into zeolite for cadmium and lead removal from wastewater. **Fuel**. 83 : 981-985

Shawabkeh, R., Al-Harahsheh, A., and Al-Otoom, A. (2004b). Copper and zinc sorption by treated oil shale ash. **Separation and Purification Technology**. 40 : 251-257

Shawabkeh, R. A. (2004c). Synthesis and characterization of activated carbo-aluminosilicate material from oil shale. **Microporous and Mesoporous Materials**. 75: 107-114

Sheng, L. H., and Wen, L.,Y. (1994). Continuous treatment of textile water by ozonation and coagulation. **Environmental Engineering**. 120 : 437-446.

Shi, B., Li, G.,Wang, D., Feng, C., and Tang, H. (2007) Remove of direct dyes by coagulation : The performance of preformed polymeric aluminum species. **Hazardous Materials**. 143 : 567-574

Sismanoglu, T., Kismir, Y., and Karakus, S. (2010). Single and binary adsorption of reactive dyes from aqueous solutions onto clinoptilolite. **Hazardous Materials**. 184 : 164-169

Sivaraj, R., Venckatesh, R., Gowri, and Sangeetha, G. (2010). Activated carbon prepared from *Eichornia crassipes* as an adsorbent for the removal of dyes from aqueous solution. **Engineering Science and Technology**. 2: 2418-2427

Sun, D., Zhang, X., Wu,Y., and Liu, X. (2010). Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **Hazardous Materials**. 181 : 335-342

Sundrarajan, M., Vishnu, G., and Joseph. (2007). Ozonation of light-shaded exhausted reactive dye bath for reuse. **Dyes and Pigments**. 75 : 273-278

Tipprasertsin, K. (2003). **Removal of color from synthetic reactive dye solution by using treated Freated flute reed in a fixed bed column**. M.S. Thesis. Mahidol University, Thailand.

Turhan, K. and Turgut, Z. (2010). Decolorization of direct dye in textile wastewater by ozonization in a semi-batch bubble column reactor. **Desalination**. 242 : 256-263

Tokunaga, T. K., Olson, K. R., and Wan, J. (2003). Moisture characteristic of Handford gravel. Soil Science of America. 322-329

U.S. EPA. (2000). **Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment**. Ohio : United States Environmental Protection Agency.

U.S. EPA. (2006). **Process Design Manual Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents**. Ohio : United States Environmental Protection Agency.

Yang, L., Chang, H. L., and Huang, M. L. (2001). Nutrient removal in gravel and soil based wetland microcosms with and with and without vegetation. **Ecological Engineering**. 18 : 91-105

Yigit, N. O., Uzal, N., Koseoglu, H., Harman, I., Yukseler, H., Yetis, U., Civelekoglu, G., and Kitis, M. (2009). Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioresctor. **Desalination**. 240 : 143-150

Yue, Q. Y., Gao, B. Y., Wang, Y., Zhang, H., Sun, X., Wang, S. G., and Gu, R. R. (2008). Synthesis of polyamine flocculants and their potential use in treating dye wastewater. **Hazardous Materials**. 152 : 221-227

Walker, G. M., Hansen, L., Hanna, J.-A., and Allen, S. J. (2003) Kinetics of a reactive dye adsorption onto dolomitic sorbents. **Water Research**. 37 : 2081-2089

Wang, S., and Zhu, Z. H. (2005). Sonochemical treatment of fly ash for dye removal from wastewater. **Hazardous Materials**. 126 : 91-95

Wang, S. (2008). A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. **Dyes Pigments**. 76 : 714-720

Wu, F. C., Tseng, R. L., and Juang, R. S. (2000). Comparative adsorption of metal and dye on flake and bead types of chitosans prepared from fishery wastes. **Hazard Mater**. 73 : 63–75

Zollinger, H. (1991). **Color Chemistry**. 2^{nd} Edition. New York : VCH.

ภาคผนวก ก

วิธีการวัดความเข้มข้นสีของน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การวัดในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์

ก.1.1 วิธีเตรียมสารละลายสีมาตรฐาน

นำสารโพแทสเซียมคลอโรแพลตินเนต (Potassium Choroplatinate : K_2PtCl_2) 2.4920 กรัม และผลึกโคบอลต์คลอไรด์ (Cobalt Choride : $CoCl_2.H_2O$) 1.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่นที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) อยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรของสารละลายให้เป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายสีมาตรฐานที่มีความเข้มข้นสี 1000 แพลตินัมโคบอลต์

ก.1.2 การหาความยาวคลื่นแสงที่สารละลายสีมาตรฐานดูดกลืนได้สูงสุด

เตรียมสารละลายสีมาตรฐานความเข้มข้น 300 แพลตินัมโคบอลต์ โดยเตรียมจากสารละลายสีมาตรฐานความเข้มข้นสี 1000 แพลตินัมโคบอลต์ โดยปิเปตสารละลายสีมาตรฐานตามตารางที่ ก.1 ปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำมาสแกนหาความยาวคลื่นแสงที่สารละลายสีมาตรฐานดูดกลืนแสงได้สูงสุดในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-700 นาโนเมตร จากการศึกษาพบว่าค่าความยาวคลื่นแสงที่สารละลายสีมาตรฐานดูดกลืนแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นสี 0-800 แพลตินัมโคบอลต์

ความเข้มข้นสี (แพลตินัมโคบอลต์)	ปริมาตรของสารละลายสีมาตรฐานความเข้มข้นสี 1000 แพลตินัมโคบอลต์ (มิลลิลิตร)
0	0
100	5
200	10
300	15
500	25
800	40

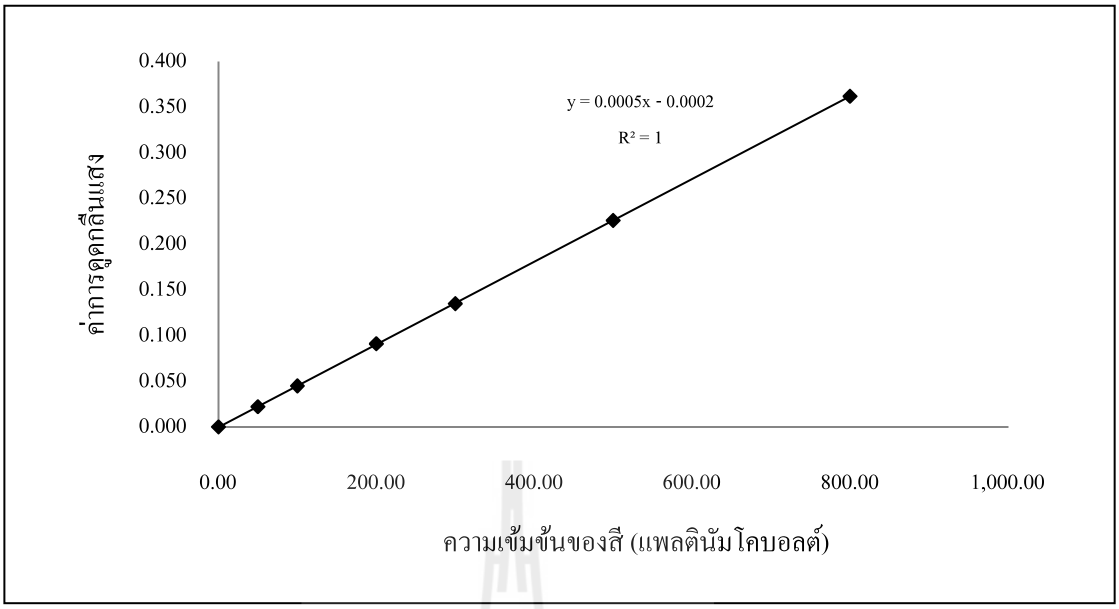
ก.1.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีมาตรฐาน

เตรียมสารละลายสีมาตรฐานให้มีความเข้มข้นสีเท่ากับ 0 100 200 300 500 และ 800 แพลตินัมโคบอลต์ โดยเตรียมจากสารละลายสีมาตรฐานความเข้มข้นสี 1000 แพลตินัมโคบอลต์ โดยปิเปตสารละลายสีมาตรฐานตามตารางที่ ก.1 ปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายสีมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสง 465 นาโนเมตร จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟมาตรฐานของสารละลายสีมาตรฐานที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ กับค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ ก.1

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีมาตรฐานที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ

ความเข้มข้น (แพลตินัมโคบอลต์)	Abs.			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.000	0.000	0.000
50	0.022	0.022	0.022	0.022
100	0.045	0.045	0.045	0.045
200	0.091	0.091	0.091	0.091
300	0.135	0.135	0.135	0.135
500	0.226	0.226	0.226	0.226
800	0.362	0.362	0.362	0.362

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีมาตรฐาน

ก.1.4 วิธีการวัด

ก.1.4.1 นำตัวอย่างน้ำมาแยกตะกอนโดยใช้เครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

ก.1.4.2 เอาตัวอย่างน้ำส่วนใสมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่ความเจือจางที่เหมาะสม นำไปวัดค่าความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น blank นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นสีของตัวอย่างน้ำ

ก.1.5 การคำนวณความเข้มข้นสี

ค่าความเข้มข้นสีของตัวอย่างน้ำสามารถคำนวณจากสมการที่ ก.1

$$\text{ความเข้มข้นของสี (แพลตินัมโคบอลต์)} = \frac{(Ax50)}{B} \qquad (\text{ก.1})$$

โดย A คือ ค่าความเข้มข้นสีที่อ่านได้จากกราฟมาตรฐาน (แพลตินัมโคบอลต์)

B คือ ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่นำมาเจือจางเป็น 50 มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)

ก.1.6 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

ก.1.6.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ ชนิด Red Blue และ Yellow

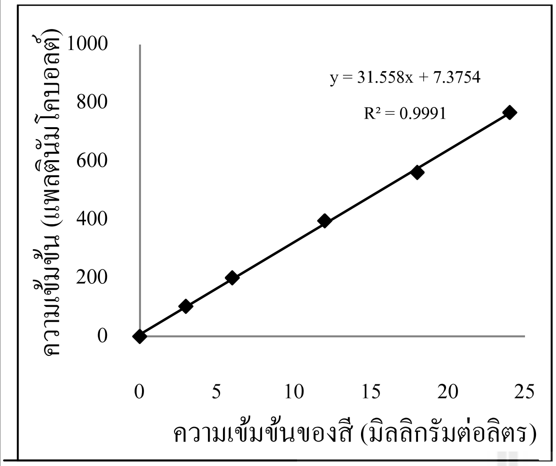
เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ให้มีความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ ก.3 โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้นสี 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตามตารางที่ ก.3 ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow แต่ละความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสง 465 นาโนเมตร นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ จากนั้นเขียนกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ กับค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ดังแสดงในรูปที่ ก.2

ก.1.6.2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟ

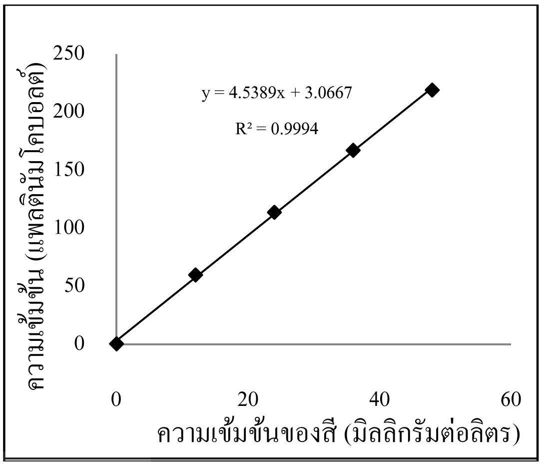
เตรียมสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟชนิดสีผสมที่ 1 2 3 และ 4 ให้มีความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ ก.4 โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิด โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดตามตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow

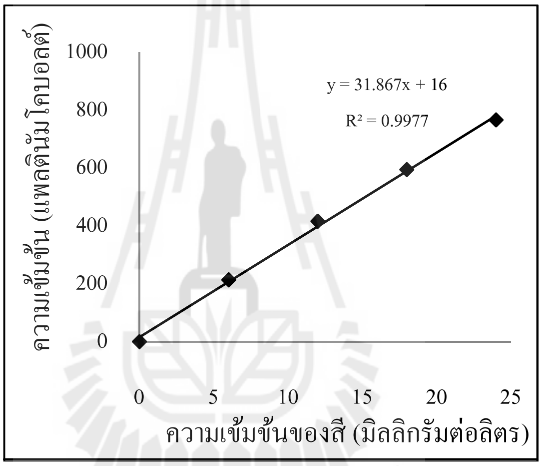
ความเข้มข้นสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟ (มิลลิลิตร)		
Red	Blue	Yellow	Red	Blue	Yellow
0	0	0	0	0	0
6	12	6	1	2	1
12	24	12	2	4	2
18	36	18	3	6	3
24	48	24	4	8	4



ก) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red



ข) สีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue



ค) สีย้อมรีแอคทีฟ Yellow

รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดในแต่ละความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นแสง 465 นาโนเมตร นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ จากนั้นเขียนกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 4 ชนิดที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ กับค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ ดังแสดงในรูปที่ ก.3

ก.2 การวัดสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI)

ก.2.1 วิธีการวัด

ก.2.1.1 นำตัวอย่างน้ำมาแยกตะกอนโดยใช้เครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

ก.2.1.2 การหาค่า Tristimulus X Y และ Z

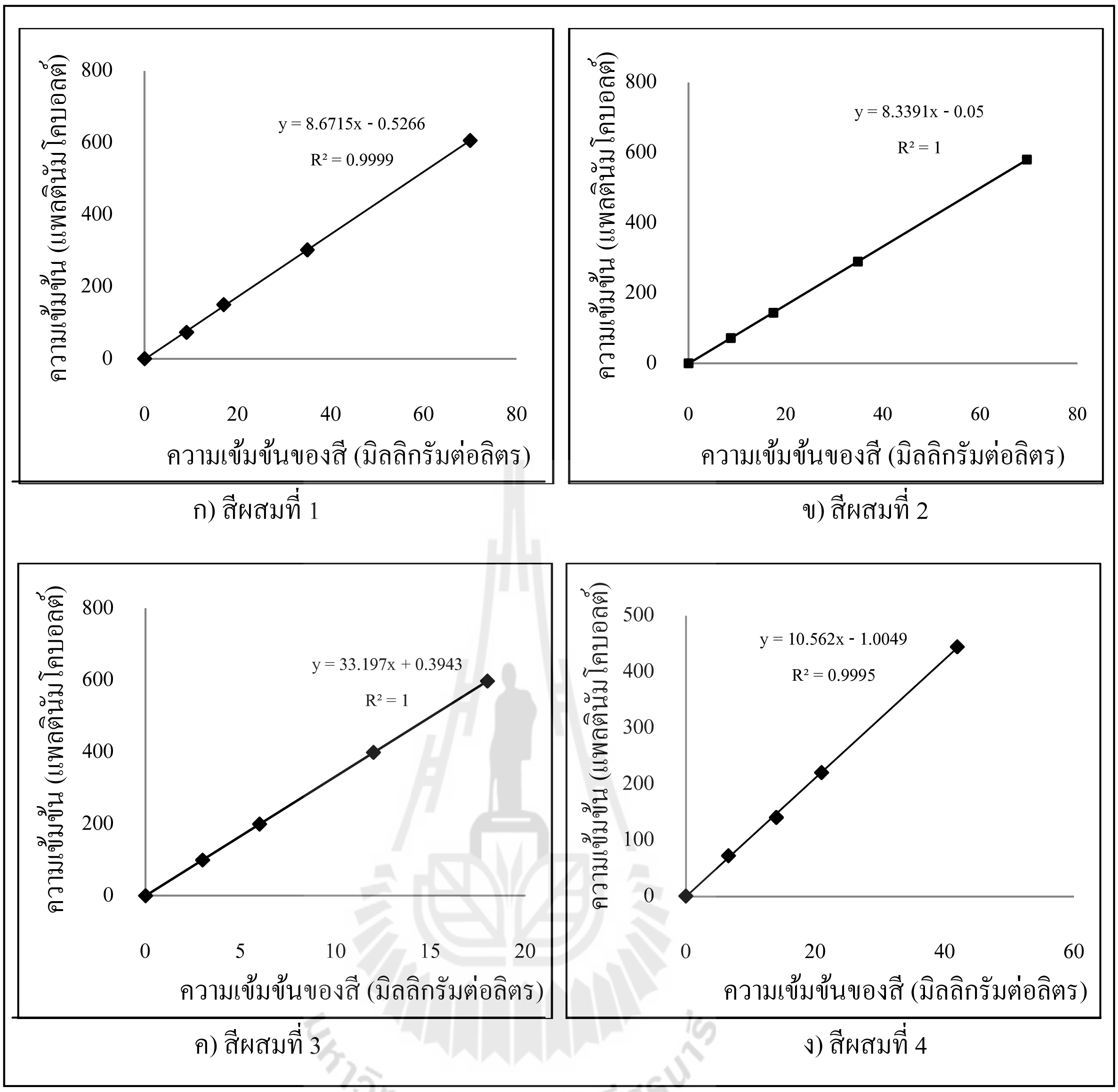
นำตัวอย่างน้ำมาวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานมิสชัน (%T) ที่ทุก ๆ 10 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร นำค่าเปอร์เซ็นต์ทรานมิสชันที่วัดได้มาคำหาค่า Tristimulus X Y และ Z โดยการนำค่าเปอร์เซ็นต์ทรานมิสชันที่วัดได้ไปคูณกับค่า factor ในตารางที่ ก.3 จะได้ค่า X Y และ Z

ก.2.1.3 การคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอด้วยโปรแกรม QuickBasic

นำค่า X Y และ Z ป้อนเข้าไปในโปรแกรม QuickBasic โปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยจะแสดงค่า V_x V_y V_z ค่าความแตกต่างของสี Adams-Nickerson (DE) และค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ

ตารางที่ ก.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟ

ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟ (มิลลิลิตร)			
สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2	สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4	สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2	สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.70	8.70	3.00	6.60	10.00	10.00	12.50	10.00
17.40	17.40	6.00	13.20	20.00	20.00	25.00	20.00
34.80	34.80	12.00	26.40	40.00	40.00	50.00	40.00
69.60	69.60	18.00	52.80	80.00	80.00	75.00	80.00



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีผสมสีย้อมรีแอคทีฟ

ก.2.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

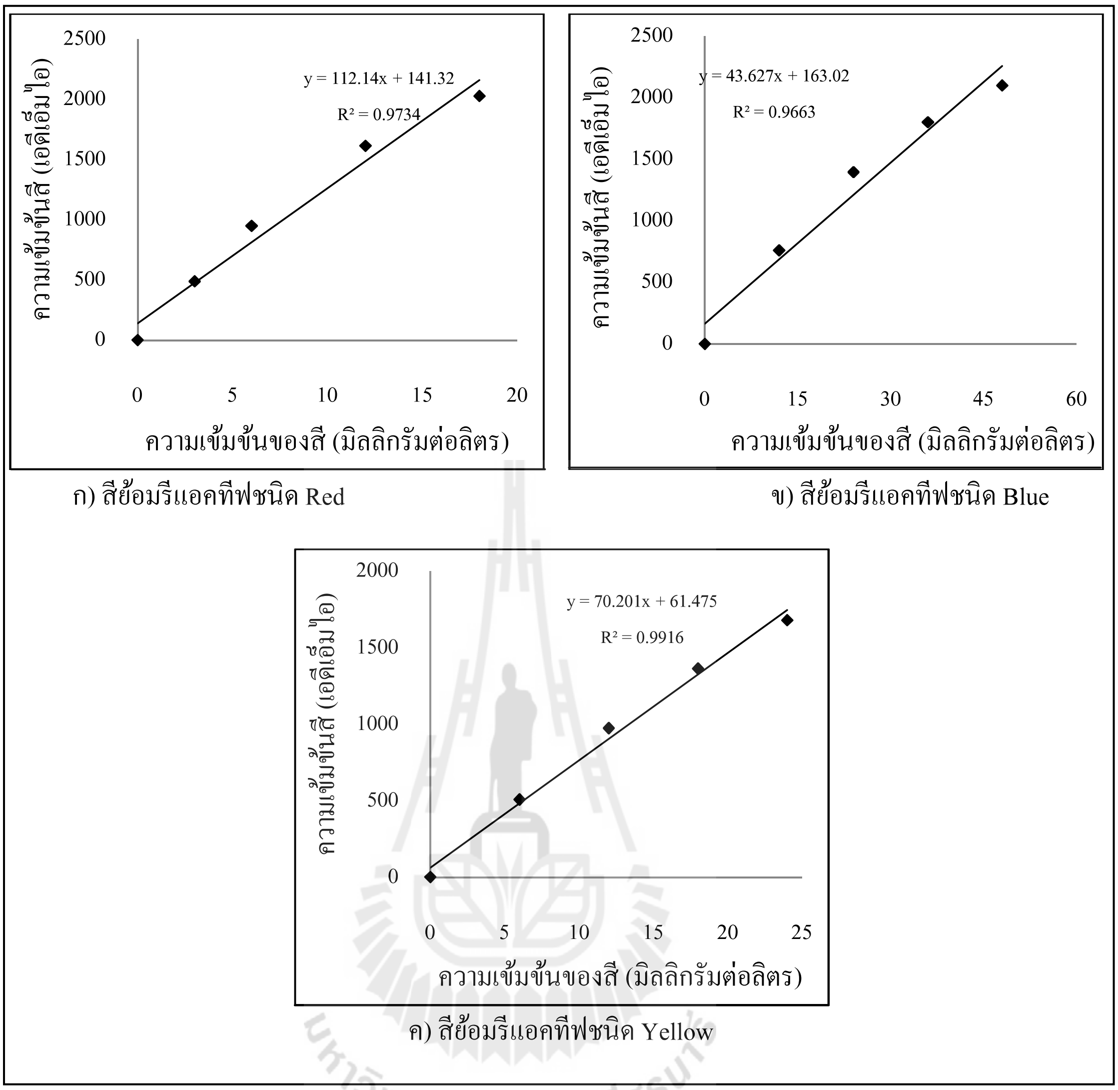
เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ให้มีความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ ก.3 โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow ความเข้มข้นสี 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานตามตารางที่ ก.3 ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red Blue และ Yellow แต่ละความเข้มข้นไปวัดค่าเปอร์เซ็นต์ทรานมิสชันที่ทุก ๆ 10 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นสีใน

หน่วยเอดีเอ็มไอตามขั้นตอนที่ ก.2.2.2-ก.2.2.3 จากนั้นเขียนกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นสีต่าง ๆ กับค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ ดังแสดงในรูปที่ ก.4

ตารางที่ ก.5 ตารางคำนวณค่า CIE Tristimulus ในการคำนวณหาหน่วยเอดีเอ็มไอ

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	%T	X		Y		Z	
		Factor	%T x Factor	Factor	%T x Factor	Factor	%T x Factor
700		0.00156		0.00056		0.00000	
690		0.00171		0.00062		0.00000	
680		0.00369		0.00134		0.00000	
670		0.00708		0.00259		0.00000	
660		0.01361		0.00504		0.00000	
650		0.02349		0.00886		0.00000	
640		0.03693		0.01443		0.00000	
630		0.05309		0.02190		0.00000	
620		0.07070		0.03153		0.00002	
610		0.08325		0.04176		0.00002	
600		0.08949		0.05316		0.00007	
590		0.08984		0.06627		0.0001	
580		0.08417		0.07992		0.00016	
570		0.07322		0.09147		0.0002	
560		0.05880		0.09841		0.00039	
550		0.04282		0.09832		0.00086	
540		0.02785		0.09149		0.00195	
530		0.01523		0.07934		0.00388	
520		0.00576		0.06462		0.00712	
510		0.00089		0.04833		0.01520	
500		0.00052		0.03401		0.02864	
490		0.00363		0.02358		0.05274	
480		0.01112		0.01618		0.09461	
470		0.02272		0.01058		0.14972	
460		0.03362		0.00694		0.19299	
450		0.03915		0.00443		0.20638	
440		0.03975		0.00262		0.19938	
430		0.02997		0.00122		0.14628	
420		0.01238		0.00037		0.05949	
410		0.00329		0.00009		0.01570	
400		0.00108		0.00002		0.00513	
		X Sum =		Y Sum =		Z Sum =	

หมายเหตุ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2544)



รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยวัดความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ เอดีเอ็มไอ และความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ ก.2-4 เพื่อใช้สำหรับการแปลงหน่วยความเข้มข้นของสี จากการศึกษาพบว่าหน่วยวัดสีแบบแพลตินัมโคบอลต์สัมพันธ์กับหน่วยวัดสีแบบเอดีเอ็มไอและหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา ตัวอย่างการหาความสัมพันธ์ของหน่วยในการวัดความเข้มข้นของสีแต่ละหน่วยของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red แสดงดังสมการต่อไปนี้

เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red สามารถนำคำนวณหาความเข้มข้นของสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์ได้ ดังสมการที่ ก.2

$$Y_1 = 0.0005Y_2 - 0.0002 \qquad (ก.2)$$

ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์กับมิลลิกรัมต่อลิตรของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ดังแสดงในสมการที่ ก.3

$$Y_2 = 31.5580Y_3 + 7.3754 \qquad (ก.3)$$

ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอกับมิลลิกรัมต่อลิตรของสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ดังแสดงในสมการที่ ก.4

$$Y_4 = 112.1400Y_3 + 141.3200 \qquad (ก.4)$$

จากสมการที่ ก.3 และ ก.4 สามารถหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอกับแพลตินัมโคบอลต์ของสีย้อมรีแอคทีฟ Red ดังแสดงในสมการที่ 3.4 และสมการความสัมพันธ์ของในหน่วยวัดความเข้มข้นของสีในแต่ละหน่วยแสดงในตารางที่ ก.5

$$\frac{Y_2 - 7.3754}{31.558} = \frac{Y_4 - 141.32}{112.14}$$

$$Y_2 = 0.2814Y_4 - 37.6942 \qquad (ก.5)$$

โดย Y_1 คือ ค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง

Y_2 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยแพลตินัมโคบอลต์

Y_3 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร

Y_4 คือ ค่าความเข้มข้นสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ

ตารางที่ ก.6 สมการความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสีในหน่วยวัดต่าง ๆ ของสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการศึกษา

สีย้อมรีแอคทีฟ	สมการความสัมพันธ์ของหน่วยวัดความเข้มข้นสี		
	แพลตินัมโคบอลต์ (Y_2) กับ มิลลิกรัมต่อลิตร (Y_3)	เอดีเอ็มไอ (Y_4) กับ มิลลิกรัมต่อลิตร (Y_3)	แพลตินัมโคบอลต์ (Y_2) กับเอดีเอ็มไอ (Y_4)
Red	$Y_2 = 31.5580Y_3+7.3754$	$Y_4 = 112.1400Y_3+141.3200$	$Y_2 = 0.2814Y_4-37.6942$
Blue	$Y_2 = 4.5389Y_3+3.0667$	$Y_4 = 43.6270Y_3+163.0200$	$Y_2 = 0.1040Y_4-16.6413$
Yellow	$Y_2 = 31.8670Y_3+16.0000$	$Y_4 = 70.2010Y_3+61.4750$	$Y_2 = 0.4539Y_4-20.6429$
สีผสมที่ 1	$Y_2 = 8.6715Y_3+0.5266$	-	-
สีผสมที่ 2	$Y_2 = 8.3391Y_3+0.0500$	-	-
สีผสมที่ 3	$Y_2 = 10.5620Y_3+1.0049$	-	-
สีผสมที่ 4	$Y_2 = 33.1970Y_3+0.3943$	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

การศึกษาสารติดตาม

ข.1 ชุดคอลัมน์ของหินดินดานขนาด A

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{3545.69}{35.75}$$

$$= 99.18 \text{ นาที}$$

$$t_{Theory} = \frac{V}{Q} = \frac{A(d_n n + d_w)}{Q}$$

$$= \frac{\pi r^2 (d_n n + d_w)}{Q}$$

$$= \left(\frac{\pi \left(\frac{2.50}{2}\right)^2 \left((35.00 \times 0.34) + 10\right) \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1.00 \frac{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{\text{นาที}}} \right)$$

$$= 107.50 \text{ นาที}$$

ข.2 ชุดคอลัมน์ของหินดินดานขนาด B

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{3631.06}{36.55}$$

$$= 99.35 \text{ นาที}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$t_{Theory} = \frac{V}{Q} = \frac{A\left(d_n n + d_w\right)}{Q}$$

$$= \frac{\pi r^2 (d_n n + d_w)}{Q}$$

$$= \left(\frac{\pi\left(\frac{2.50}{2}\right)^2 \left(\left(35.00 \times 0.34\right) + 10\right) \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1.00 \frac{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{\text{นาที}}} \right)$$

$$= 107.50 \text{ นาที}$$

ข.3 ชุดคอลัมน์ของหินดินดานขนาด C

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{3518.61}{35.28}$$

$$= 99.72 \text{ นาที}$$

$$t_{Theory} = \frac{V}{Q} = \frac{A\left(d_n n = + d_w\right)}{Q}$$

$$= \frac{\pi r^2 (d_n n + d_w)}{Q}$$

$$= \left(\frac{\pi\left(\frac{2.50}{2}\right)^2 \left(\left(35.00 \times 0.33\right) + 10\right) \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1.00 \frac{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{\text{นาที}}} \right)$$

$$= 105.78 \text{ นาที}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.4 ชุดคอลัมน์ของหินดินดานขนาด D

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{3577.42}{35.77}$$

$$= 100.00 \text{ นาที}$$

$$t_{Theory} \frac{V}{Q} = \frac{A\left(d_n n + d_w\right)}{Q}$$

$$= \frac{\pi r^2 (d_n n + d_w)}{Q}$$

$$= \left(\frac{\pi\left(\frac{2.50}{2}\right)^2 \left(\left(35.00 \times 0.33\right) + 10\right) \text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1.00 \frac{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{\text{นาที}}} \right)$$

$$= 105.78 \text{ นาที}$$

ข.5 ชุดคอลัมน์ของหินดินดานขนาด E

$$t_{Actual} = \frac{\sum t_i C_i \Delta t_i}{\sum C_i \Delta t_i}$$

$$= \frac{3537.18}{35.33}$$

$$= 100.10 \text{ นาที}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$t_{Theory}\ \frac{V}{Q} = \frac{A\left(d_n n + d_w\right)}{Q}$$

$$= \frac{\pi r^2 \left(d_n n + d_w\right)}{Q}$$

$$= \left(\frac{\pi\left(\frac{2.50}{2}\right)^2 \left(\left(35.00 \times 0.33\right) + 10\right) \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{1.00 \ \frac{\text{ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{\text{นาที}}} \right)$$

$$= 105.78 \text{ นาที}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Red ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0066	23.8240	22.2580	0.3111	0.0658
	2.0063	23.8240	21.8400	0.1978	0.0658
	4.0068	23.8240	21.2700	0.1275	0.0658
	6.0017	23.8240	20.8140	0.1003	0.0658
	8.0038	23.8240	20.3960	0.0857	0.0000
B	1.0048	23.8240	21.6880	0.4252	0.0658
	2.0037	23.8240	20.9660	0.2853	0.0000
	4.0034	23.8240	20.2820	0.1769	0.0000
	6.0038	23.8240	19.7880	0.1344	0.0658
	8.0046	23.8240	19.2560	0.1141	0.0000
C	1.0052	23.8240	21.4220	0.4779	0.0000
	2.0073	23.8240	20.8140	0.2999	0.0658
	4.0070	23.8240	20.0920	0.1863	0.0658
	6.0048	23.8240	19.4840	0.1446	0.0000
	8.0038	23.8240	18.9520	0.1217	0.0658
D	1.0069	23.8240	21.1940	0.5224	0.0000
	2.0059	23.8240	20.7000	0.3115	0.0658
	4.0021	23.8240	19.8640	0.1979	0.0658
	6.0031	23.8240	19.2560	0.1522	0.0000
	8.0019	23.8240	18.6860	0.1284	0.0000
E	1.0022	23.8240	21.1560	0.5324	0.0658
	2.0056	23.8240	20.3200	0.3494	0.0658
	4.0011	23.8240	19.5600	0.2131	0.0658
	6.0045	23.8240	18.7620	0.1686	0.0658
	8.0051	23.8240	18.1920	0.1407	0.0658

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.2 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Blue ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0023	149.5710	143.6960	1.1723	0.4240
	2.0084	149.5710	138.5550	1.0970	0.0000
	4.0011	149.5710	131.2110	0.9177	0.4240
	6.0010	149.5710	126.0710	0.7832	0.0000
	8.0042	149.5710	121.6640	0.6973	0.0000
B	1.0046	149.5710	142.9620	1.3157	0.4240
	2.0055	149.5710	137.8210	1.1718	0.0000
	4.0064	149.5710	130.4770	0.9532	0.0000
	6.0007	149.5710	123.8670	0.8567	0.4240
	8.0034	149.5710	118.7270	0.7708	0.0000
C	1.0032	149.5710	141.4930	1.6104	0.0000
	2.0029	149.5710	135.6180	1.3933	0.0000
	4.0020	149.5710	126.8050	1.1377	0.4240
	6.0016	149.5710	118.7270	1.0279	0.0000
	8.0020	149.5710	112.1170	0.9361	0.4240
D	1.0030	149.5710	141.1260	1.6839	0.2120
	2.0023	149.5710	134.8830	1.4671	0.0000
	4.0045	149.5710	125.3360	1.2104	0.4240
	6.0009	149.5710	117.9920	1.0525	0.4240
	8.0046	149.5710	110.6480	0.9725	0.4240
E	1.0010	149.5710	140.7590	1.7606	0.4240
	2.0078	149.5710	134.1490	1.5362	0.4240
	4.0032	149.5710	123.8670	1.2842	0.4240
	6.0072	149.5710	116.5240	1.1002	0.4240
	8.0016	149.5710	109.1800	1.0096	0.0000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.3 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Yellow ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0034	23.0710	21.0630	0.4002	0.0000
	2.0004	23.0710	20.4770	0.2593	0.0725
	4.0044	23.0710	19.8490	0.1609	0.0725
	6.0045	23.0710	19.4730	0.1198	0.0725
	8.0062	23.0710	19.1380	0.0982	0.0725
B	1.0018	23.0710	20.7280	0.4678	0.0725
	2.0053	23.0710	20.1420	0.2921	0.0725
	4.0076	23.0710	19.4730	0.1796	0.0725
	6.0055	23.0710	18.9710	0.1365	0.0725
	8.0049	23.0710	18.6780	0.1098	0.1255
C	1.0054	23.0710	20.3090	0.5494	0.0000
	2.0039	23.0710	19.5980	0.3466	0.0725
	4.0023	23.0710	18.9170	0.2076	0.0725
	6.0055	23.0710	18.4270	0.1547	0.0000
	8.0076	23.0710	18.0500	0.1254	0.0000
D	1.0058	23.0710	20.0170	0.6073	0.0725
	2.0037	23.0710	19.2220	0.3842	0.0725
	4.0050	23.0710	18.5520	0.2257	0.0000
	6.0025	23.0710	17.9660	0.1701	0.0725
	8.0031	23.0710	17.6320	0.1359	0.0725
E	1.0072	23.0710	19.8070	0.6481	0.0000
	2.0008	23.0710	19.1800	0.3889	0.0000
	4.0074	23.0710	18.3430	0.2360	0.0725
	6.0018	23.0710	17.7990	0.1757	0.0000
	8.0021	23.0710	17.4640	0.1401	0.0725

ตารางที่ ค.4 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟสีผสมที่ 1 ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0016	86.7570	75.8020	2.1875	0.0000
	2.0061	86.7570	72.3420	1.4371	0.0000
	4.0027	86.7570	67.1530	0.9795	0.0000
	6.0041	86.7570	63.6930	0.7683	0.0000
	8.0006	86.7570	60.2340	0.6630	0.0000
B	1.0021	86.7570	75.0330	2.3399	0.3329
	2.0053	86.7570	71.1890	1.5527	0.0000
	4.0051	86.7570	66.0000	1.0365	0.0000
	6.0029	86.7570	61.5790	0.8389	0.3329
	8.0041	86.7570	58.5040	0.7060	0.0000
C	1.0039	86.7570	73.4960	2.6419	0.0000
	2.0051	86.7570	69.4590	1.7254	0.0000
	4.0017	86.7570	63.1170	1.1815	0.0000
	6.0021	86.7570	59.6570	0.9030	0.0000
	8.0013	86.7570	56.0050	0.7687	0.3329
D	1.0034	86.7570	72.3420	2.8732	0.0000
	2.0027	86.7570	67.7300	1.9001	0.0000
	4.0004	86.7570	61.9640	1.2395	0.0000
	6.0018	86.7570	57.3510	0.9799	0.0000
	8.0032	86.7570	54.4680	0.8069	0.0000
E	1.0007	86.7570	70.6130	3.2265	0.0000
	2.0004	86.7570	66.5760	2.0177	0.0000
	4.0010	86.7570	60.2340	1.3258	0.0000
	6.0023	86.7570	55.6210	1.0375	0.0000
	8.0012	86.7570	52.7380	0.8503	0.0000

ตารางที่ ค.5 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟสีผสมที่ 2 ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0017	87.3840	72.5140	2.9690	0.0000
	2.0003	87.3840	71.0750	1.6307	0.0000
	4.0059	87.3840	68.3570	0.9499	0.2769
	6.0026	87.3840	66.7580	0.6872	0.0000
	8.0025	87.3840	65.3190	0.5515	0.0000
B	1.0049	87.3840	72.0340	3.0550	0.0000
	2.0035	87.3840	70.1150	1.7239	0.0000
	4.0025	87.3840	66.7580	1.0307	0.0000
	6.0054	87.3840	64.8390	0.7508	0.0000
	8.0023	87.3840	63.0800	0.6074	0.2769
C	1.0056	87.3840	71.7140	3.1165	0.2769
	2.0039	87.3840	69.7160	1.7634	0.1385
	4.0047	87.3840	66.2780	1.0541	0.0000
	6.0035	87.3840	64.3590	0.7671	0.0000
	8.0014	87.3840	62.4410	0.6235	0.0000
D	1.0021	87.3840	71.5540	3.1594	0.0000
	2.0028	87.3840	69.4760	1.7883	0.2769
	4.0015	87.3840	65.7980	1.0789	0.0000
	6.0018	87.3840	63.7200	0.7886	0.2769
	8.0038	87.3840	61.6410	0.6433	0.2769
E	1.0022	87.3840	71.1550	3.2387	0.1385
	2.0047	87.3840	69.0760	1.8265	0.1385
	4.0013	87.3840	65.3190	1.1029	0.0000
	6.0031	87.3840	62.9200	0.8150	0.0000
	8.0010	87.3840	61.0020	0.6595	0.0000

ตารางที่ ค.6 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟสีผสมที่ 3 ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0041	22.7730	21.6090	0.2318	0.0696
	2.0089	22.7730	21.2070	0.1559	0.0000
	4.0044	22.7730	20.7250	0.1023	0.0000
	6.0042	22.7730	20.3640	0.0802	0.0000
	8.0030	22.7730	20.1230	0.0662	0.0000
B	1.0074	22.7730	21.4080	0.2710	0.0696
	2.0044	22.7730	20.9660	0.1803	0.0000
	4.0034	22.7730	20.4840	0.1144	0.0000
	6.0035	22.7730	20.1230	0.0883	0.0000
	8.0006	22.7730	19.8410	0.0733	0.0696
C	1.0018	22.7730	21.2470	0.3047	0.0696
	2.0011	22.7730	20.8050	0.1967	0.0696
	4.0070	22.7730	20.2430	0.1263	0.0000
	6.0046	22.7730	19.9220	0.0950	0.2508
	8.0019	22.7730	19.6010	0.0793	0.2783
D	1.0044	22.7730	20.9660	0.3598	0.0000
	2.0004	22.7730	20.4840	0.2289	0.0000
	4.0013	22.7730	19.8820	0.1445	0.0000
	6.0017	22.7730	19.5200	0.1084	0.0000
	8.0029	22.7730	19.1590	0.0903	0.0000
E	1.0059	22.7730	20.6050	0.4311	0.0000
	2.0064	22.7730	20.0020	0.2762	0.0000
	4.0037	22.7730	19.4000	0.1685	0.0000
	6.0014	22.7730	18.9180	0.1285	0.0000
	8.0064	22.7730	18.6770	0.1023	0.0000

ตารางที่ ค.7 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟสีผสมที่ 4 ของหินดินดานแต่ละขนาด

หินดินดาน	ปริมาณหิน (กรัม)	C_0 (มิลลิกรัมต่อกรัม)	C_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	X_e (มิลลิกรัมต่อกรัม)	SD
A	1.0017	63.5120	59.0930	0.8823	0.2187
	2.0008	63.5120	57.4520	0.6058	0.0000
	4.0032	63.5120	55.4520	0.4027	0.2187
	6.0022	63.5120	53.6650	0.3281	0.0000
	8.0061	63.5120	52.1500	0.2838	0.0000
B	1.0027	63.5120	58.3360	1.0324	0.2187
	2.0011	63.5120	56.6950	0.6813	0.0000
	4.0045	63.5120	54.4220	0.4540	0.0000
	6.0002	63.5120	52.1500	0.3787	0.0000
	8.0054	63.5120	51.0140	0.3122	0.0000
C	1.0030	63.5120	57.4520	1.2084	0.0000
	2.0032	63.5120	55.8110	0.7689	0.2187
	4.0037	63.5120	53.4130	0.5045	0.2187
	6.0042	63.5120	51.3930	0.4037	0.0000
	8.0012	63.5120	49.8780	0.3408	0.0000
D	1.0020	63.5120	56.3160	1.4363	0.0000
	2.0029	63.5120	54.4220	0.9077	0.0000
	4.0023	63.5120	52.0240	0.5741	0.2187
	6.0029	63.5120	50.0040	0.4500	0.2187
	8.0062	63.5120	48.3630	0.3784	0.0000
E	1.0035	63.5120	55.5590	1.5851	0.0000
	2.0034	63.5120	54.0440	0.9452	0.0000
	4.0025	63.5120	51.0140	0.6245	0.0000
	6.0031	63.5120	49.1200	0.4795	0.0000
	8.0014	63.5120	47.6060	0.3976	0.0000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับ BET

ตารางที่ ง.1 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET

สีย้อม	ขนาดหิน	X_m (mg/g)	B	R^2
Red	A	-0.0104	-12.8498	0.8547
	B	-0.0188	-13.0347	0.9836
	C	-0.0209	-13.1182	0.9674
	D	-0.0231	-13.1787	0.9459
	E	-0.0314	-14.2039	0.9696
Blue	A	-0.8567	-0.5570	0.9265
	B	-0.5999	-1.0132	0.9507
	C	0.1693	6.1087	0.7441
	D	0.2211	4.9480	0.8302
	E	0.3993	3.0414	0.8869
Yellow	A	-0.0128	-13.6798	0.9764
	B	-0.0159	-13.8160	0.9825
	C	-0.0201	-14.0428	0.9783
	D	-0.0239	-14.1751	0.9703
	E	-0.0249	-14.2760	0.9811
สีผสมที่ 1	A	-0.2966	-2.6577	0.9782
	B	-0.3867	-2.4684	0.9807
	C	-0.4957	-2.3283	0.9900
	D	-0.5866	-2.2314	0.9866
	E	-0.6731	-2.1688	0.9920
สีผสมที่ 2	A	-0.0656	-3.7814	0.9948
	B	-0.0996	-3.6487	0.9946
	C	-0.1075	-3.6316	0.9901
	D	-0.1237	-3.5674	0.9859
	E	-0.1355	-3.5387	0.9960

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1 ค่าคงที่และความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของหินดินดานแต่ละขนาด โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET (ต่อ)

สีย้อม	ขนาดหิน	X_m (mg/g)	B	R^2
สีผสมที่ 3	A	-0.0067	-13.4076	0.9906
	B	-0.0076	-13.5435	0.9910
	C	-0.0087	-13.6266	0.9885
	D	-0.0110	-13.7517	0.9901
	E	-0.0140	-13.9621	0.9697
สีผสมที่ 4	A	-0.0515	-4.5068	0.9609
	B	-0.0648	-4.4835	0.9833
	C	-0.0702	-4.5547	0.9749
	D	-0.0817	-4.6194	0.9873
	E	-0.0912	-4.6266	0.9828

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก จ

การศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลในชุดทดลองคอลัมน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	21.073	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	10	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
2	20	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
3	30	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
4	40	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
5	50	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
6	60	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
7	70	10	21.073	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
8	80	10	21.073	0.0406	0.0196	0.0196	0.0196	0.0196
9	90	10	21.073	0.0737	0.0346	0.0196	0.0196	0.0196
10	100	10	21.073	0.1459	0.0587	0.0196	0.0196	0.0196
11	110	10	21.073	0.2451	0.1248	0.0316	0.0196	0.0196
12	120	10	21.073	0.3504	0.1369	0.0497	0.0196	0.0196
13	130	10	21.073	0.4707	0.1910	0.0948	0.0286	0.0196
14	140	10	21.073	0.5459	0.2602	0.1098	0.0436	0.0196
15	150	10	21.073	0.5970	0.3203	0.1339	0.0647	0.0256
16	160	10	21.073	0.6301	0.3895	0.1700	0.1068	0.0376
17	170	10	21.073	0.6481	0.4256	0.2091	0.1309	0.0527
18	180	10	21.073	0.6752	0.4797	0.2512	0.1639	0.0918
19	190	10	21.073	0.7083	0.5489	0.3053	0.1850	0.1248
20	200	10	21.073	0.7504	0.5760	0.3715	0.2391	0.1459
21	210	10	21.073	0.7775	0.6181	0.4286	0.2752	0.1730
22	220	10	21.073	0.8196	0.6391	0.4857	0.3324	0.2241
23	230	10	21.073	0.8316	0.6662	0.5369	0.3684	0.2572

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
24	240	10	21.07	0.8556	0.6932	0.6000	0.4015	0.3143
25	250	10	21.07	0.8707	0.7323	0.6391	0.4466	0.3474
26	260	10	21.07	0.8737	0.7504	0.6662	0.5128	0.3745
27	270	10	21.07	0.8887	0.7624	0.6932	0.5459	0.4015
28	280	10	21.07	0.8977	0.7805	0.7323	0.5820	0.4557
29	290	10	21.07	0.9098	0.7925	0.7504	0.6211	0.4797
30	300	10	21.07	0.9128	0.8075	0.7624	0.6602	0.5068
31	310	10	21.07	0.9158	0.8256	0.7805	0.7083	0.5489
32	320	10	21.07	0.9188	0.8406	0.7925	0.7353	0.5729
33	330	10	21.07	0.9278	0.8526	0.8075	0.7504	0.6000
34	340	10	21.07	0.9308	0.8587	0.8256	0.7865	0.6331
35	350	10	21.07	0.9368	0.8707	0.8406	0.8045	0.6481
36	360	10	21.07	0.9399	0.8827	0.8526	0.8286	0.6692
37	370	10	21.07	0.9459	0.8947	0.8587	0.8406	0.6963
38	380	10	21.07	0.9519	0.9068	0.8617	0.8526	0.7233
39	390	10	21.07		0.9128	0.8707	0.8677	0.7624
40	400	10	21.07		0.9188	0.8887	0.8797	0.7775
41	410	10	21.07		0.9278	0.9068	0.8887	0.7985
42	420	10	21.07		0.9399	0.9128	0.9008	0.8256
43	430	10	21.07		0.9429	0.9188	0.9098	0.8406
44	440	10	21.07		0.9519	0.9278	0.9188	0.8617
45	450	10	21.07			0.9399	0.9248	0.8827
46	460	10	21.07			0.9459	0.9308	0.8917
47	470	10	21.07			0.9519	0.9368	0.9038

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ จ.1 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Red ของหินดินดาน (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
48	480	10	21.07				0.9429	0.9128
49	490	10	21.07				0.9459	0.9218
50	500	10	21.07				0.9519	0.9338
51	510	10	21.07					0.9399
52	520	10	21.07					0.9459
53	530	10	21.07					0.9519

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดาน

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	143.94	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	10	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
2	20	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
3	30	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
4	40	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
5	50	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
6	60	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
7	70	10	143.94	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
8	80	10	143.94	0.0480	0.0327	0.0143	0.0143	0.0143
9	90	10	143.94	0.1306	0.0694	0.0143	0.0143	0.0143
10	100	10	143.94	0.1765	0.0969	0.0143	0.0143	0.0143
11	110	10	143.94	0.2286	0.1429	0.0327	0.0143	0.0143
12	120	10	143.94	0.2653	0.1704	0.0602	0.0143	0.0143
13	130	10	143.94	0.2959	0.2378	0.0908	0.0265	0.0143
14	140	10	143.94	0.3265	0.2561	0.1337	0.0388	0.0143
15	150	10	143.94	0.4153	0.2806	0.1582	0.0602	0.0143
16	160	10	143.94	0.4796	0.3143	0.2102	0.0755	0.0296
17	170	10	143.94	0.5163	0.4000	0.2531	0.0939	0.0480
18	180	10	143.94	0.6051	0.4520	0.2959	0.1337	0.0663
19	190	10	143.94	0.6265	0.5010	0.3204	0.1735	0.0908
20	200	10	143.94	0.6755	0.5531	0.3571	0.1949	0.1245
21	210	10	143.94	0.7582	0.6020	0.3939	0.2255	0.1582
22	220	10	143.94	0.8133	0.6357	0.4459	0.2684	0.1918
23	230	10	143.94	0.8806	0.6663	0.4918	0.2990	0.2194

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.2 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Blue ของหินดินดาน (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
24	240	10	143.941	0.9357	0.7184	0.5408	0.3327	0.2561
25	250	10	143.941	0.9602	0.7735	0.5745	0.3602	0.2929
26	260	10	143.941		0.8500	0.6265	0.3847	0.3173
27	270	10	143.941		0.9173	0.6541	0.4061	0.3388
28	280	10	143.941		0.9510	0.6908	0.4490	0.3663
29	290	10	143.941			0.7306	0.4949	0.3939
30	300	10	143.941			0.7765	0.5500	0.4398
31	310	10	143.941			0.8102	0.5929	0.4827
32	320	10	143.941			0.8500	0.6204	0.5408
33	330	10	143.941			0.8806	0.6571	0.5837
34	340	10	143.941			0.9173	0.6847	0.6173
35	350	10	143.941			0.9510	0.7184	0.6510
36	360	10	143.941				0.7735	0.6755
37	370	10	143.941				0.8316	0.7031
38	380	10	143.941				0.8714	0.7673
39	390	10	143.941				0.8990	0.8194
40	400	10	143.941				0.9265	0.8684
41	410	10	143.941				0.9541	0.8929
42	420	10	143.941					0.9204
43	430	10	143.941					0.9571

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดาน

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	20.54	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	10	10	20.54	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
2	20	10	20.54	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
3	30	10	20.54	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
4	40	10	20.54	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
5	50	10	20.54	0.0273	0.0065	0.0065	0.0065	0.0065
6	60	10	20.54	0.0985	0.0154	0.0065	0.0065	0.0065
7	70	10	20.54	0.1696	0.0510	0.0065	0.0065	0.0065
8	80	10	20.54	0.2527	0.1044	0.0065	0.0065	0.0065
9	90	10	20.54	0.3476	0.1548	0.0540	0.0065	0.0065
10	100	10	20.54	0.4306	0.2230	0.0807	0.0214	0.0154
11	110	10	20.54	0.5225	0.2556	0.1281	0.0273	0.0214
12	120	10	20.54	0.5670	0.3683	0.1578	0.0332	0.0332
13	130	10	20.54	0.5937	0.4632	0.2349	0.0510	0.0480
14	140	10	20.54	0.6560	0.5166	0.2972	0.0658	0.0599
15	150	10	20.54	0.7094	0.5552	0.3683	0.0777	0.0747
16	160	10	20.54	0.7420	0.5730	0.4098	0.0955	0.1163
17	170	10	20.54	0.7746	0.6115	0.4632	0.1222	0.1429
18	180	10	20.54	0.7954	0.6382	0.5136	0.1518	0.1637
19	190	10	20.54	0.8339	0.6649	0.5641	0.1756	0.1904
20	200	10	20.54	0.8547	0.7034	0.5848	0.2023	0.2260
21	210	10	20.54	0.8903	0.7242	0.6174	0.2497	0.2645
22	220	10	20.54	0.9140	0.7479	0.6560	0.3298	0.2764
23	230	10	20.54	0.9229	0.7835	0.6975	0.3713	0.3149

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.3 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟชนิด Yellow ของหินดินดาน (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
24	240	10	20.54	0.9348	0.8250	0.7390	0.4425	0.3476
25	250	10	20.54	0.9437	0.8517	0.7716	0.4958	0.3802
26	260	10	20.54	0.9526	0.8873	0.7954	0.5670	0.4217
27	270	10	20.54		0.9081	0.8280	0.5996	0.4484
28	280	10	20.54		0.9259	0.8517	0.6619	0.4840
29	290	10	20.54		0.9526	0.8903	0.7242	0.5196
30	300	10	20.54			0.9110	0.7865	0.5581
31	310	10	20.54			0.9318	0.8102	0.5789
32	320	10	20.54			0.9466	0.8577	0.6115
33	330	10	20.54			0.9585	0.8932	0.6382
34	340	10	20.54				0.9170	0.6738
35	350	10	20.54				0.9437	0.7212
36	360	10	20.54				0.9614	0.7894
37	370	10	20.54					0.8517
38	380	10	20.54					0.9081
39	390	10	20.54					0.9318
40	400	10	20.54					0.9437
41	410	10	20.54					0.9526

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.4 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีผสมที่ 1 และ 2 ของหินดินดานขนาด E

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o		C_e/C_o	
			สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2	สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2
0	0	0	82.45	84.72	0.00000	0.00000
1	10	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
2	20	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
3	30	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
4	40	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
5	50	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
6	60	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
7	70	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
8	80	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
9	90	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
10	100	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
11	110	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
12	120	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
13	130	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
14	140	10	82.45	84.72	0.0293	0.0289
15	150	10	82.45	84.72	0.0377	0.0459
16	160	10	82.45	84.72	0.0517	0.0912
17	170	10	82.45	84.72	0.0684	0.1139
18	180	10	82.45	84.72	0.0908	0.1620
19	190	10	82.45	84.72	0.1160	0.2101
20	200	10	82.45	84.72	0.1719	0.2809
21	210	10	82.45	84.72	0.1999	0.3432
22	220	10	82.45	84.72	0.2727	0.3970
23	230	10	82.45	84.72	0.3454	0.4678
24	240	10	82.45	84.72	0.3985	0.5159

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.4 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีผสมที่ 1 และ 2 ของหินดินดานขนาด E (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o		C_e/C_o	
			สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2	สีผสมที่ 1	สีผสมที่ 2
25	250	10	82.45	84.72	0.4517	0.5753
26	260	10	82.45	84.72	0.5104	0.6235
27	270	10	82.45	84.72	0.5664	0.7226
28	280	10	82.45	84.72	0.5972	0.7565
29	290	10	82.45	84.72	0.6699	0.8103
30	300	10	82.45	84.72	0.7203	0.8528
31	310	10	82.45	84.72	0.8098	0.9179
32	320	10	82.45	84.72	0.8405	0.9802
33	330	10	82.45	84.72	0.8797	
34	340	10	82.45	84.72	0.8965	
35	350	10	82.45	84.72	0.9077	
36	360	10	82.45	84.72	0.9385	
37	370	10	82.45	84.72	0.9776	

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.5 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีผสมที่ 3 และ 4 ของหินดินดานขนาด E

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o		C_e/C_o	
			สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4	สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4
0	0	0	22.35	66.95	0.00000	0.00000
1	10	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
2	20	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
3	30	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
4	40	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
5	50	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
6	60	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
7	70	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
8	80	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
9	90	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
10	100	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
11	110	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
12	120	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
13	130	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
14	140	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
15	150	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
16	160	10	22.35	66.95	0.0270	0.0303
17	170	10	22.35	66.95	0.0270	0.0359
18	180	10	22.35	66.95	0.0270	0.0529
19	190	10	22.35	66.95	0.0377	0.1038
20	200	10	22.35	66.95	0.0458	0.1490
21	210	10	22.35	66.95	0.0593	0.1914
22	220	10	22.35	66.95	0.0701	0.2395
23	230	10	22.35	66.95	0.1213	0.2904
24	240	10	22.35	66.95	0.1429	0.3610

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.5 ผลการศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับสีผสมที่ 3 และ 4 ของหินดินดานขนาด E (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o		C_e/C_o	
			สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4	สีผสมที่ 3	สีผสมที่ 4
25	250	10	22.35	66.95	0.1914	0.4176
26	260	10	22.35	66.95	0.2588	0.4600
27	270	10	22.35	66.95	0.3100	0.5307
28	280	10	22.35	66.95	0.3639	0.5759
29	290	10	22.35	66.95	0.4016	0.6155
30	300	10	22.35	66.95	0.4367	0.6466
31	310	10	22.35	66.95	0.4879	0.7173
32	320	10	22.35	66.95	0.5310	0.7851
33	330	10	22.35	66.95	0.5499	0.8445
34	340	10	22.35	66.95	0.5795	0.8784
35	350	10	22.35	66.95	0.6038	0.9208
36	360	10	22.35	66.95	0.6442	0.9717
37	370	10	22.35	66.95	0.6604	0.9887
38	380	10	22.35	66.95	0.6981	
39	390	10	22.35	66.95	0.7385	
40	400	10	22.35	66.95	0.7709	
41	410	10	22.35	66.95	0.7951	
42	420	10	22.35	66.95	0.8329	
43	430	10	22.35	66.95	0.8491	
44	440	10	22.35	66.95	0.8787	
45	450	10	22.35	66.95	0.9084	
46	460	10	22.35	66.95	0.9569	

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ฉ

ความสามารถในการกำจัดสีย้อมและซีโอดีในน้ำเสีย
จากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ตารางที่ ฉ.1 ความสามารถในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี ของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	20	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	30	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	40	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	60	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	70	10	2502000.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	80	10	2502000.00	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000
9	90	10	2502000.00	0.085	0.013	0.003	0.002	0.002
10	100	10	2502000.00	0.756	0.143	0.139	0.032	0.029
11	110	10	2502000.00	0.960	0.960	0.756	0.105	0.101
12	120	10	2502000.00	0.960	0.960	0.960	0.696	0.660
13	130	10	2502000.00	0.960	0.960	0.968	0.968	0.948
14	140	10	2502000.00	0.960	0.960	0.968	0.968	0.980
15	150	10	2502000.00	0.960	0.960	0.968	0.968	0.980
16	160	10	2502000.00	0.960	0.960	0.968	0.968	0.980
17	170	10	2502000.00	0.960	0.960	0.968	0.968	0.980

หมายเหตุ : C_o คือ แพลตินัมโคบอลต์

C_e คือ แพลตินัมโคบอลต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.2 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี ของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	10	45500.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	45500.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	20	10	45500.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	30	10	45500.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	40	10	45500.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	50	10	45500.00	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
6	60	10	45500.00	0.039	0.003	0.002	0.001	0.000
7	70	10	45500.00	0.171	0.009	0.008	0.008	0.007
8	80	10	45500.00	0.428	0.146	0.092	0.075	0.068
9	90	10	45500.00	0.577	0.226	0.215	0.181	0.170
10	100	10	45500.00	0.600	0.475	0.464	0.419	0.396
11	110	10	45500.00	0.634	0.566	0.554	0.532	0.487
12	120	10	45500.00	0.645	0.588	0.577	0.554	0.509
13	130	10	45500.00	0.668	0.600	0.588	0.577	0.554
14	140	10	45500.00	0.686	0.654	0.621	0.588	0.556
15	150	10	45500.00	0.735	0.670	0.654	0.605	0.572
16	160	10	45500.00	0.763	0.719	0.697	0.675	0.654
17	170	10	45500.00	0.784	0.741	0.719	0.697	0.675
18	180	10	45500.00	0.828	0.784	0.741	0.719	0.697
19	190	10	45500.00	0.872	0.806	0.828	0.784	0.741
20	200	10	45500.00	0.911	0.824	0.824	0.824	0.802
21	210	10	45500.00	0.932	0.889	0.867	0.846	0.846
22	220	10	45500.00	0.954	0.911	0.889	0.867	0.867
23	230	10	45500.00		0.954	0.951	0.889	0.889
24	240	10	45500.00				0.957	0.954

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ฉ.3 ความสามารถในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	10	2105.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
2	20	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
3	30	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
4	40	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
5	50	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
6	60	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
7	70	10	2105.00	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	80	10	2105.00	0.056	0.038	0.019	0.015	0.013
9	90	10	2105.00	0.114	0.078	0.076	0.071	0.065
10	100	10	2105.00	0.204	0.100	0.097	0.089	0.083
11	110	10	2105.00	0.388	0.182	0.161	0.157	0.151
12	120	10	2105.00	0.524	0.285	0.255	0.222	0.215
13	130	10	2105.00	0.604	0.426	0.423	0.417	0.407
14	140	10	2105.00	0.685	0.512	0.476	0.458	0.454
15	150	10	2105.00	0.888	0.800	0.724	0.539	0.535
16	160	10	2105.00	0.901	0.852	0.787	0.728	0.719
17	170	10	2105.00	0.909	0.899	0.858	0.846	0.835
18	180	10	2105.00	0.926	0.918	0.911	0.901	0.895
19	190	10	2105.00	0.937	0.932	0.924	0.914	0.911
20	250	60	2105.00	0.998	0.998	0.996	0.996	0.992

หมายเหตุ : C_o คือ แพลตินัมโคบอลต์

C_e คือ แพลตินัมโคบอลต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.4 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	2600.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
2	20	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
3	30	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
4	40	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
5	50	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
6	60	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
7	70	10	2600.00	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
8	80	10	2600.00	0.017	0.017	0.013	0.008	0.004
9	90	10	2600.00	0.047	0.047	0.042	0.042	0.025
10	100	10	2600.00	0.064	0.064	0.053	0.053	0.042
11	110	10	2600.00	0.106	0.106	0.096	0.096	0.074
12	120	10	2600.00	0.149	0.149	0.149	0.149	0.127
13	130	10	2600.00	0.212	0.202	0.191	0.191	0.180
14	140	10	2600.00	0.255	0.255	0.255	0.255	0.244
15	150	10	2600.00	0.297	0.297	0.287	0.287	0.276
16	160	10	2600.00	0.361	0.350	0.340	0.340	0.340
17	170	10	2600.00	0.382	0.382	0.382	0.382	0.361
18	180	10	2600.00	0.414	0.403	0.403	0.403	0.393
19	190	10	2600.00	0.435	0.425	0.425	0.425	0.425
20	250	60	2600.00	0.531	0.531	0.531	0.531	0.531
21	310	60	2600.00	0.740	0.712	0.712	0.712	0.712
22	370	60	2600.00	0.854	0.825	0.825	0.797	0.797
23	430	60	2600.00	0.969	0.969	0.915	0.910	0.905
24	670	60	2600.00			0.969	0.969	0.969

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.5 ความสามารถในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	420.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
2	20	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
3	30	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
4	40	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
5	50	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
6	60	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
7	70	10	420.00	0.049	0.049	0.049	0.049	0.049
8	80	10	420.00	0.063	0.053	0.049	0.049	0.049
9	90	10	420.00	0.106	0.068	0.063	0.058	0.058
10	100	10	420.00	0.182	0.120	0.110	0.096	0.082
11	110	10	420.00	0.291	0.182	0.163	0.125	0.110
12	120	10	420.00	0.458	0.277	0.244	0.206	0.191
13	130	10	420.00	0.524	0.339	0.320	0.258	0.244
14	140	10	420.00	0.643	0.401	0.353	0.301	0.282
15	150	10	420.00	0.705	0.467	0.405	0.320	0.296
16	160	10	420.00	0.710	0.505	0.458	0.334	0.329
17	170	10	420.00	0.738	0.558	0.510	0.405	0.386
18	180	10	420.00	0.748	0.572	0.562	0.453	0.429
19	190	10	420.00	0.757	0.591	0.577	0.562	0.534
20	250	60	420.00	0.762	0.605	0.596	0.577	0.567
21	310	60	420.00	0.767	0.719	0.705	0.691	0.676
22	370	60	420.00	0.843	0.776	0.762	0.743	0.729
23	430	60	420.00	0.886	0.814	0.805	0.786	0.772
24	490	60	420.00	0.900	0.853	0.833	0.810	0.800
25	550	60	420.00	0.914	0.886	0.857	0.848	0.833
26	610	60	420.00	0.929	0.910	0.891	0.876	0.867
27	670	60	420.00	0.938	0.914	0.900	0.895	0.881

หมายเหตุ : C_o คือ แพลตินัมโคบอลต์

C_e คือ แพลตินัมโคบอลต์

ตารางที่ ฉ.5 ความสามารถในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพ ของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
28	740	60	420.00	0.943	0.929	0.919	0.914	0.905
29	800	60	420.00	0.952	0.938	0.929	0.924	0.914
30	860	60	420.00		0.948	0.938	0.935	0.933
31	920	60	420.00		0.962	0.952	0.952	0.952

หมายเหตุ : C_o คือ แพลตินัมโคบอลต์

C_e คือ แพลตินัมโคบอลต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.6 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
0	0	0	750.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	10	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
2	20	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
3	30	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
4	40	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
5	50	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
6	60	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
7	70	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
8	80	10	750.00	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
9	90	10	750.00	0.044	0.015	0.015	0.015	0.015
10	100	10	750.00	0.132	0.074	0.059	0.044	0.044
11	110	10	750.00	0.346	0.140	0.132	0.125	0.081
12	120	10	750.00	0.515	0.294	0.169	0.132	0.125
13	130	10	750.00	0.589	0.442	0.405	0.294	0.221
14	140	10	750.00	0.662	0.515	0.478	0.442	0.368
15	150	10	750.00	0.736	0.552	0.515	0.515	0.478
16	160	10	750.00	0.736	0.589	0.552	0.552	0.515
17	170	10	750.00	0.736	0.626	0.589	0.589	0.552
18	180	10	750.00	0.773	0.662	0.626	0.626	0.589
19	190	10	750.00	0.773	0.699	0.662	0.626	0.626
20	250	60	750.00	0.773	0.736	0.699	0.699	0.626
21	310	60	750.00	0.789	0.789	0.750	0.710	0.631
22	370	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.750	0.671
23	430	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.750	0.710
24	490	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.750	0.710
25	550	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.750	0.710
26	610	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.750	0.750
27	670	60	750.00	0.789	0.789	0.789	0.789	0.750

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.6 ความสามารถในการกำจัดซีโอดีในน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมของหินดินดานแต่ละขนาด (ต่อ)

ลำดับ	เวลา (นาที)	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	C_o	C_e/C_o				
				A	B	C	D	E
28	740	60	750.00	0.829	0.829	0.789	0.789	0.789
29	800	60	750.00	0.829	0.829	0.829	0.789	0.789
30	860	60	750.00	0.846	0.846	0.846	0.846	0.846
31	920	60	750.00	0.868	0.868	0.868	0.868	0.868
32	980	60	750.00	0.883	0.883	0.883	0.883	0.883
33	1100	60	750.00	0.920	0.920	0.920	0.920	0.883
34	1220	60	750.00	0.960	0.958	0.951	0.947	0.932
35	1340	60	750.00				0.971	0.971

หมายเหตุ : C_o คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

C_e คือ มิลลิกรัมต่อลิตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ช

ผลการทดสอบทางสถิติประสิทธิภาพการกำจัดของหินดินดาน ในชุดทดลองคอลัมน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.1 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

หินดินดาน	ซีโอดี		สี	
	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
A-B	ไม่พบความแตกต่าง	0.969	ไม่พบความแตกต่าง	0.993
A-C	ไม่พบความแตกต่าง	0.937	ไม่พบความแตกต่าง	0.978
A-D	ไม่พบความแตกต่าง	0.857	ไม่พบความแตกต่าง	0.950
A-E	ไม่พบความแตกต่าง	0.817	ไม่พบความแตกต่าง	0.878
B-C	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-D	ไม่พบความแตกต่าง	0.997	ไม่พบความแตกต่าง	0.998
B-E	ไม่พบความแตกต่าง	0.992	ไม่พบความแตกต่าง	0.985
C-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
C-E	ไม่พบความแตกต่าง	0.998	ไม่พบความแตกต่าง	0.996
D-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.999

ตารางที่ ช.2 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

หินดินดาน	ซีโอดี		สี	
	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
A-B	ไม่พบความแตกต่าง	0.982	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
A-C	ไม่พบความแตกต่าง	0.966	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
A-D	ไม่พบความแตกต่าง	0.954	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
A-E	ไม่พบความแตกต่าง	0.925	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-C	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-E	ไม่พบความแตกต่าง	0.999	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
C-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
C-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
D-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.3 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดทางชีวภาพของหินดินดานแต่ละขนาด ที่ระดับเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

หินดินดาน	ซีโอดี		สี	
	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
A-B	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.999
A-C	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.998
A-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.993
A-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.993
B-C	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
B-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
C-D	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
C-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
D-E	ไม่พบความแตกต่าง	1.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000

ตารางที่ ช.4 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยระยะเวลาในการเดินระบบจากเริ่มต้นจนถึงจุดหมดสภาพในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุด ของหินดินดานแต่ละขนาด ที่ระดับเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

น้ำเสีย	ซีโอดี		สี	
	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
1-2	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง	0.000
1-3	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง	0.000
2-3	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง	0.000

หมายเหตุ : 1 คือ น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

2 คือ น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

3 คือ น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.5 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุด ช่วงระยะเวลา 80 นาทีแรกของการเดินระบบ และที่จุดหมดสภาพ ที่ระดับเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

น้ำเสีย	หินดินดาน	ช่วงระยะเวลา 80 นาทีแรกของการเดินระบบ		ที่จุดหมดสภาพ	
		ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
1-2	A	พบความแตกต่าง	0.023	ไม่พบความแตกต่าง	0.135
1-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.987	ไม่พบความแตกต่าง	0.567
2-3		พบความแตกต่าง	0.033	ไม่พบความแตกต่าง	0.503
1-2	B	พบความแตกต่าง	0.001	ไม่พบความแตกต่าง	0.121
1-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.082	ไม่พบความแตกต่าง	0.516
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.508
1-2	C	พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.113
1-3		พบความแตกต่าง	0.003	ไม่พบความแตกต่าง	0.478
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.520
1-2	D	ไม่พบความแตกต่าง	00.994	ไม่พบความแตกต่าง	0.065
1-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.463	ไม่พบความแตกต่าง	0.390
2-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.404	ไม่พบความแตกต่าง	0.457
1-2	E	ไม่พบความแตกต่าง	0.995	ไม่พบความแตกต่าง	0.079
1-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.459	ไม่พบความแตกต่าง	0.340
2-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.405	ไม่พบความแตกต่าง	0.554

หมายเหตุ : 1 คือ น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

2 คือ น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

3 คือ น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ซ.6 ผลการทดสอบทางสถิติ ANOVA ของความแตกต่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้ง 3 จุด ช่วงระยะเวลา 80 นาทีแรกของการเดินระบบ และที่จุดหมดสภาพ ที่ระดับเชื่อมั่นร้อยละ 95.000

น้ำเสีย	หินดินดาน	ช่วงระยะเวลา 80 นาทีแรก ของการเดินระบบ		ที่จุดหมดสภาพ	
		ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ	Significance
1-2	A	ไม่พบความแตกต่าง	0.737	ไม่พบความแตกต่าง	0.776
1-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.578
2-3		ไม่พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.962
1-2	B	ไม่พบความแตกต่าง	0.972	ไม่พบความแตกต่าง	0.995
1-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.995
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.931
1-2	C	พบความแตกต่าง	0.984	ไม่พบความแตกต่าง	0.968
1-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.966
1-2	D	พบความแตกต่าง	0.989	ไม่พบความแตกต่าง	0.999
1-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.997
1-2	E	พบความแตกต่าง	0.993	ไม่พบความแตกต่าง	0.991
1-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	1.000
2-3		พบความแตกต่าง	0.000	ไม่พบความแตกต่าง	0.993

หมายเหตุ : 1 คือ น้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมสี

2 คือ น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด

3 คือ น้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัด

ภาคผนวก ซ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

REMOVE REACTIVE DYES FROM TEXTILE WASTEWATER BY SHALE

S. NOPKHUNTOD[1*], S. DARARAT[2] and J. YIMRATTANABOVORN[1]

[1] School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon ratchasima, 30000, Thailand.
[2] Department of Environment, Ecology and Energy, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Bangkok, 10900, Thailand.

E-mail: Nopkhuntod_s@hotmail.com

Keywords: Reactive dyes, Shale, Adsorption, Textile wastewater

Abstract

Textile wastewater effluents are highly colored and the disposal of these wastes into receiving waters causes damage to the environment and aquatic living organisms. Reactive dyes are the largest single group of dyes used in the textile industry. Therefore, this study aimed to remove this dye by using shale. The ability of shale to adsorb synthetic reactive dye solution and actual textile wastewater in batch and fixed bed systems was investigated. The results of the batch experiment showed that the adsorption capacity increased with increasing contact time, initial dye concentration, and temperature and decreasing particle size and initial pH. Equilibrium data were fitted to the Langmuir and Freundlich isotherms. The adsorption capacities of shale are 0.0114-0.0322 mg/g for Remazol Deep Red RGB (Red), 0.4479-1.1409 mg/g for Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) and 0.0133-0.0255 mg/g for Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow), respectively. For the fixed bed system, the bed depth of 30 cm and hydraulic loading rate of 2.939 m^3/m^2-d was used in the actual textile wastewaters experiments. The average COD and color removal efficiency were higher than 97% and 90%, respectively, for all actual textile wastewater. The life expectancy of systems for removal COD and color of effluent wastewater were higher than dyebath wastewater and raw textile wastewater. The adsorption of shale is suitable for remove COD and color in the effluence wastewater.

1. Introduction

The wastewaters of textile industries are different in quality and quantity depending on the type of textile industries, dyestuff and dyeing methods. The textile wastewater generally contains high biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), Suspended solids (SS), heat, pH, color and other soluble substances (Choi and Cho, 1996). However, the major problem of textile wastewater involves color wastes. The release of color wastes into receiving water causes damage to the environment as they may significantly affect photosynthetic activity in aquatic life due to reduced light penetration. They may also be toxic to some aquatic lives because they contain metals, chlorides, etc. Reactive dyes are the most common dyes used due to their advantages, such as bright colors, excellent colorfastness and ease of application (Yang and Al-Durf, 2001; Mahony et al., 2002). Elimination of dyes in the textile dying process is very difficult using conventional wastewater treatment methods. Various methods for dye and colour removal, such aerobic and anaerobic microbial degradation, coagulation and chemical oxidation, membrane separation process, electro-chemical, filtration, softening

and reverse osmosis have been proposed from time to time (Robinson et al., 2001). However, all of the methods suffered from one or another limitation and none of the processes described above were successful in removing colour from wastewater completely. Adsorption is probably the simplest process for dye removal. Currently, activated carbon is believed to be the most effective adsorbent. However, high cost in production and regeneration make it uneconomical (Wang et al., 2005). At present, there is growing interest in using low cost and available materials for the adsorption of reactive dyes. Shale has been reported the potential media to remove pollutants from wastewater because of their chemical characteristics and inexpensive material. This had led to a search for low-cost materials, which could be considered as adsorbents alternative to low cost adsorbent and utilization with biological treatment system.

2. Materials

2.1 Shale

The shale used as adsorbent was obtained from The Siam Cement Public Company Limited, Saraburi Province, Thailand. The shale was washed with distilled water and dried using hot air oven at 105°C for 24 hours. The particle size of shale was measured by dry sieving into five different sizes, ranging from 0.15 to 2.00 mm. The physical characteristics of shale and method analysis are shown in Table 1. The chemical analysis of shale was carried out by using an energy dispersive X-ray spectrometer (Oxford ED 2000). The chemical composition of shale was shown in Table 2. It was shown that the major compositions of shale were 57.80% SiO_2, 17.20% Al_2O_3 and 11.80% CaO. It was found that the absorbent which contained Si and Al give a high adsorption capacity of reactive dye (Basava Rao and Ram Mohan Rao, 2006; Ozacar and Sengil, 2003).

2.2 Reactive Dyes

Reactive Remazol Deep Red RGB (Red), Remazol Brilliant Blue RN gran (Blue) and Remazol Yellow 3RS 133% gran (Yellow) were used as an adsorbate. They were obtained from DyStar Thai Co., Ltd. Thailand. The synthetic reactive dye wastewater with 600 mg/l was prepared by dissolving 0.6 g of reactive dye in 900 cm^3 of distilled water; 40 g of NaCl were added at room temperature and the mixture was stirred until complete dissolution; the solution was heated to 60ºC and 1.5 g of NaOH were added; the mentioned temperature was maintained for 2 h, with the addition of 2 g of Na_2CO_3 after the first hour; the solution was cooled to room temperature and distilled water added to complete the volume.

3. Experiments

3.1 Bath studies of adsorption

Batch adsorption experiments were performed as a function of contact time, pH, temperature and initial dye concentration. The conditions of batch experiment are shown in Table 3. The concentration of dyes was measured with spectrophotometer at 465 nm. Prior to measurement for dye concentration, the dye solutions were centrifuged and filtered through Whatman GF/C filters.

3.2 Column studies

Fixed bed column studies were conducted using plastic columns having 2.5 cm diameter and 50 cm length. The columns were packed with different particle size of

shale on supporting layer of glass wool at the bed depth of 30 cm. The schematic diagram of the column study is shown in Figure 1. Three types of textile wastewaters from textile industry in Prachinburi Province, Thailand were used in this experiment. The first one was dyebath wastewater was collected from dyebath water of dyeing process, the second one, raw textile wastewater was collected from the equalizing tank after preliminary process, and the last one, effluent wastewater was collected from sedimentation tank after the aeration tank of activated sludge system. The compositions of actual textile wastewaters were shown in Table 4. The columns were loaded with actual textile wastewaters which up-flow mode at hydraulic loading rate of 2.939 m^3/m^2-d.

4. Results and Discussion

4.1 Batch studies

4.4.1 Effect of contact time on adsorption equilibrium

The effect of contact time on adsorption of reactive dyes onto shale A-E was shown in Figure 2. It was shown that dye adsorption capacity of shale was increased with an increasing of the contact time. The adsorption capacity of shale was quite rapid in the first 48 hours, then gradually increased with the prolongation of contact time. After 72 hours of contact, no obvious variation in dye adsorbed was examined. Based on these results, 72 hours was taken as the equilibrium time in each batch adsorption experiments. At equilibrium, the adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye was found in range of 0.0411-0.0894 mg/g, 1.6729-2.1127mg/g and 0.3082-0.4513 mg/g respectively. The rate of removal is higher in the beginning due to larger surface area available of adsorbent. After adsorption, the rate of dye uptake is controlled by the rate of dye transported from the exterior to the interior sites of the adsorbent particles (Amin, 2008).

4.1.2 Adsorption isotherms

Langmuir and Freundlich isotherms were used to describe the equilibrium nature of reactive dyes adsorption by shale, and are represented by Equation (1) and (2), respectively.

Langmuir isotherm:
$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{Qb}\frac{1}{C_e} \quad (1)$$

Freundlich isotherm:
$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n}\log C_e \quad (2)$$

where C_e is the equilibrium concentration (mg/l), Q is maximum adsorption capacity (mg/g) and b is the constant related to the affinity between sorbent and sorbate. K_f is the saturation capacity and n is Freundlich exponent.

The linearized Langmuir and Freundlich isotherm for the adsorption of reactive dyes onto shale A-E are shown in Figures 3 and 4. The values of Q and b were calculated from the slope and interception of Langmuir plots, while n and K_f values were calculated from the slope and interception of Freundlich plots, as shown in Table 5.The maximum adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye solutions were found in range of 0.0110-0.0322 mg/g, 0.4479-1.1409 mg/g and 0.0133-0.0255 mg/g respectively. The maximum adsorption capacity of reactive dye onto shale was found near the value

presented in the literature for untreated Alunite (2.8500-2.9200 mg/g) and Clinoptilolite (3.1860 mg/g) (Ozacar and Sengil, 2003; Sismanoglu et al., 2010)

4.1.3 Effect of initial pH

The pH value of the dye solution is an important parameter for the adsorption of reactive dye solution. The effect of initial pH on adsorption of Red, Blue and Yellow onto shale was shown in Figure 5. Equilibrium adsorption capacity decreased with increasing of pH values for all dyes solutions. The maximum adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye solutions at pH 2 was found in rage of 0.1795-0.2813 mg/g, 1.5804-2.0553 mg/g and 0.1421-0.2711 mg/g respectively. Adsorption of reactive dyes onto shale is the electrostatic interactions between the adsorbent and dye molecules, Adsorption increases due to increasing of electrostatic attraction between negative charged dye molecules and positive charged active group of adsorbent (Ozacar and Sengil, 2003). In the aqueous solution, the sulphonate groups of reactive dyes ($D\text{-}SO_3Na$) are dissociated and converted to anionic dye ion. Shales are materials with amphoteric character. Thus, depending on the pH solution, their surfaces might be positively or negatively charged, which have a direct influence on electrostatic interactions.The initial pH the affected adsorption of Blue dye more than Red and Yellow dye.

4.1.4 Effect of Temperature

The effect of temperatures on the adsorption of Red, Blue and Yellow onto shale was shown in Figure 6. In addition, changing the temperature had affected the adsorption capacity of the adsorbent for a particular adsorbate. The adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye on shale were increased with the increase in the temperatures. The maximum adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye solutions at 45 °C were found in range of 0.0942-0.1704 mg/g, 0.5275-0.8778 mg/g and 0.1155-0.2661 mg/g respectively. The temperature has two major effects on the adsorption process. Increasing the temperature is known to increase the rate of diffusion of the adsorbate molecules across the external boundary layer and in the internal pores of the adsorbent particle, owing to the decrease in the viscosity of the solution (Al-Qodah, 2000; Karaoglu et al., 2010).

4.1.5 Effect of initial reactive dye concentrations

The effect of initial reactive dye concentrations on adsorption of Red, Blue and Yellow onto shale was shown in Figure 7. It was shown that reactive dye adsorption capacities of shale were increased with increasing of the initial reactive dye solutions. Initial concentration provides an important driving force to overcome all mass transfer resistance of the reactive dye between the aqueous and solid phases (Karaoglu et al., 2010). Hence a higher initial concentration of dye will enhance the adsorption process. The maximum adsorption capacity of Red, Blue and Yellow dye solutions at 700 Pt-Co dye concentrations was found in range of 0.1212-0.2234 mg/g, 0.9903-1.8728 mg/g and 0.1406-0.2650 mg/g respectively.

4.2 Application of shale on reactive dye removal

Actual textile wastewaters were fed through the column in an up-flow mode by a peristaltic pump at hydraulic loading rate of 2.939 m^3/m^2-d with no pH adjustment. Influent and effluent samples were collected at the regular time interval and analyzed for concentration of COD and color. The operation on the column was stopped when the effluent color intensity approached to the influent color intensity.

4.2.1 COD removal efficiency

The average COD removal efficiency of three actual textile wastewater increased with the decreasing of particle size of shale as shown in Table 6. The removal efficiencies of COD for shale A-E were in range of 97.31-99.14% for dyebath wastewater, 98.428-99.336% for raw textile wastewater and 98.201-98.529% for effluent wastewater. The life expectancy of column systems for removal COD of shale A-E increased with the decrease of particle size of shale. The life expectancy of systems for removal COD of shale A-E was in range of 218.18-239.70 min for dyebath wastewater, 420.09-472.19 min for raw textile wastewater and 1190.00-1245.96 min of effluent wastewater.

4.2.2 Color removal efficiency

The average color removal efficiency of three actual textile wastewater were increased with the decreasing particle size of shale as shown in Table 6. The removal efficiencies of color for shale A-E were in range of 91.512-98.805% for dyebath wastewater, 98.449-98.983 % for raw textile wastewater and 94.969-95.147% for effluent wastewater. The life expectancy of systems for removal color of shale A-E increased with the decrease of particle size of shale. The life expectancy of systems for removal color of shale A-E were 109.51-130.62 min for dyebath wastewater, 192.131-194.558 min for raw textile wastewater and 786.67-913.68 min of effluent wastewater.

5. Conclusions

The present investigation showed that shale was a promising adsorbent for the removal of reactive dyes from aqueous solutions over a wide range of concentrations. The adsorbed amounts of reactive dyes increased with an increasing of contact time and reached a maximum at equilibrium within 72 hrs. Equilibrium data were fitted to the Langmuir and Freundlich isotherms and the equilibrium data were best described by the Langmuir isotherm, with the maximum monolayer adsorption capacities of in range of 0.0114-0.0322 mg/g for Red, 0.4479-1.1409 mg/g for Blue and 0.0133-0.0255 mg/g for Yellow, respectively. The maximum adsorption capacities of reactive dyes by shale occurred at an initial pH of 2, initial concentration of 700 Pt-Co and temperature 45 °C. Reactive dye adsorption capacities increased with increasing of the initial dye concentration and temperature whereas decreasing of pH. For the fixed bed system, the average COD and color removal efficiency were higher than 97% and 90%, respectively, for all actual textile wastewater. The life expectancy of systems for removal COD and color of effluent wastewater was higher that of than dyebath wastewater and raw textile wastewater. The adsorption of shale is suitable for remove COD and color in the effluence wastewater. The results of this study will provide information on the usability of shale as application the adsorption of shale in secondary treatment process or used as substrate in wetlands system to remove reactive dye from textile wastewater.

6. Acknowledgements

This study was supported by Suranaree University of Technology and Thailand Institute of Scientific and Technological Research

References

[1] Choi, Y.S. and Cho, J.H. (1996). Color removal from dye wastewater using Vermiculite. Environmental Technology. 17, 1169-1180.

[2] Yang, X. and Al-Durf, B. (2001). Application of branched pore diffusion model in the adsorption of reactive dyes on activated carbon. Chemical Engineering. 83, 15-23.

[3] Mahony, T.O., Guibal, E. and Tobin, J. (2002). Reactive dye biosorption by Rhizopus arrhizus biomass. Enzyme and Microbial Technology. 31, 456-463.

[4] Robinson, T. McMullan, G. and Nigam, P. (2001). Remediation of dye in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresource Technology. 77, 247-255.

[5] Wang, S.B., Boyjoo, Y., Choueib, A. and Zhu, Z.H. (2005). Removal of dye from aqueous solution using fly ash and red mud. Water Research. 39, 129-138.

[6] Basava Rao, V.V. and Ram Mohan Rao, S. (2006). Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by flyash. Chemical Engineering. 116, 77-84.

[7] Ozacar, M. and Sengil, I.A. (2003). Adsorption of reactive dyes on calcined alunite from aqueous. Hazardous Materials. 98, 211-224.

[8] Amin, N.K. (2008). Removal of reactive dye from aqueous solution by adsorption onto activated carbon prepared from sugarcane bagasse pith. Desalination. 223, 152-161

[9] Sismanoglu, T., Kismir, Y. and Karakus, S. (2010). Single and binary adsorption of reactive dyes from aqueous solutions onto clinoptilolite. Hazardous Materials. 184, 164-169

[10] Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes using shale oil ash. Water Research. 34 (17), 4295-4303

[11] Karaoglu, M.H., Dogan, M. and Alkan M. (2010). Kinetic analysis of reactive blue 221 adsorption on kaolinite. Desalination. 256, 154-165

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสายรุ้ง นพขุนทด เกิดเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านต่างตา ชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา ๒ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2548 และในปีการศึกษา 2550 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยในขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษา 1 ทุนวิจัย 1 ทุนบัณฑิต และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอก ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) เพื่อทำวิจัยเรื่อง **"การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน"**

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังภาคผนวก ซ.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี