การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผงเหล็ก

REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM DYEING WASTEWATER USING IRON WASTE PARTICLES

วรรณวิภา ผลาหาญ
WANWIPA PALAHARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1306-2

การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยใช้เศษผงเหล็ก

REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM DYEING WASTEWATER USING IRON WASTE PARTICLES

วรรณวิภา ผลาหาญ
WANWIPA PALAHARN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1306-2

REMOVAL OF REACTIVE DYES FROM DYEING WASTEWATER USING IRON WASTE PARTICLES

WANWIPA PALAHARN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

ISBN 974-15-1306-2

COPYRIGHT 2004
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก
นักศึกษา	นางสาววรรณวิภา ผลาหาญ
รหัสประจำตัว	45064506
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สุวรรณี จรรยาพูน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก โดยใช้การทดลองแบบแบทช์และคอลัมน์ การทดลองนี้ใช้สีย้อมรีแอกทีฟ 5 ชนิด คือ Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ การทดลองแบบแบทช์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม จากผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม คือ พีเอช 3, ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที, ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที, ขนาดของเศษผงเหล็ก 12-100 เมช, ความเข้มข้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของ เศษผงเหล็ก 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow คือ 99.61%, 98.61%, 97.04%, 99.00%, 98.82% และ 94.89% ตามลำดับ สำหรับการลด BOD, COD และ SS ของสีทั้งห้าสามารถลดได้ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 73%, 81% และ 72% ตามลำดับ และค่าพีเอชหลังการทดลองที่วัดได้ คือ ประมาณ พีเอช 6 นอกจากนี้ ยังพบว่าไอโซเทอมของการดูดซับ สีย้อมเป็นแบบแลงเมียร์ และจากการศึกษาทางจลนศาสตร์เคมีโดยใช้สีย้อม Reactive Blue 5 พบว่า ปฏิกิริยาการกำจัดเป็นปฏิกิริยา อันดับหนึ่ง การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบทช์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD, COD และ SS คือ 65.33%, 54.04% และ 41.47% ตามลำดับ และค่าพีเอชหลังการทดลองที่วัดได้ คือ พีเอช 6.24

ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้สีย้อม Reactive Blue 5 เป็นตัวแทนของสีย้อมรีแอกทีฟ เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที และความเข้มข้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ 99.74% ประสิทธิภาพการกำจัด BOD, COD และ SS คือ 63.62%, 66.13% และ 78.03% ตามลำดับ และค่าพีเอชหลังการทดลอง ที่วัดได้ คือ ประมาณ

พีเอช 6 การกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมได้ และประสิทธิภาพการกำจัด BOD, COD และ SS คือ 66.06%, 51.72% และ 49.97% ตามลำดับ และค่าพีเอชหลังการทดลองที่วัดได้ คือ พีเอช 6.32

คำสำคัญ : สีย้อมรีแอกทีฟ น้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม เศษผงเหล็ก

Thesis Title	Removal of Reactive Dyes from Dyeing Wastewater Using Waste Iron Particles
Student	Ms. Wanwipa Palaharn
Student ID.	45064506
Degree	Master of Science
Programme	Environmental Chemistry
Year	2004
Thesis Advisor	Dr. Suwannee Junyapoon

ABSTRACT

This research studied the removal efficiency of reactive dyes contaminated in dyeing wastewater using waste iron particles both in batch and column experiments. Reactive dyes including Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red and Reactive Yellow were used in a preparation of synthetic wastewater. Batch experiment was studied to determine optimum conditions for dye removal. It was found that the optimum conditions were pH 3, contact time 30 minutes, agitating rate 150 rpm, iron particle size 12-100 mesh, dye concentration 100 mg/l and iron dosage 20 g/l. The removal efficiencies of Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red and Reactive Yellow were 99.61%, 98.61%, 97.04%, 99.00%, 98.82% and 94.89%, respectively. The reduction efficiencies of BOD, COD and SS of five dyes were similar and were approximately 73%, 81% and 72%, respectively, whilst the pH values of treated effluent were about pH 6. Reactive dye adsorption behavior was fit with the Langmuir isotherm. Reactive Blue 5 was used to study the kinetic of degradation. It was found that the kinetic reaction was first order. Under the optimum conditions from batch experiment, dyes in dyeing wastewater were reduced and the reduction of BOD, COD and SS was 65.33%, 54.04% and 41.47%, respectively the pH value of effluent was found to be 6.24

In column experiment, Reactive Blue 5 was used as a representative dye to investigate the optimum conditions of dye removal. It was found that the optimum conditions were at flow rate of 4 ml/min and dye concentration of 100 mg/l. The removal

efficiency of dye was 99.74%, while those of BOD, COD and SS were 63.62%, 66.13% and 78.03%, respectively. The pH value of effluent was about pH 6. Dyes in dyeing wastewater were removed and the reduction of BOD, COD and SS was 66.06%, 51.72% and 49.97%, respectively. The pH of effluent was 6.32.

Keywords: Reactive Dyes, Dyeing Wastewater, Waste Iron Particles

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุวรรณี จรรยาพูน อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ ดร.อุสารัตน์ ภักดีสู่สุข อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.จันทร์ลัดดา โชติรัตนดิลก อาจารย์ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำในเรื่องความถูกต้องและความเป็นระเบียบเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท T.U.W. Textile จำกัด ต.สัมประทวน อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์สีย้อมตัวอย่าง และตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงาน

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นอกเหนือจากบุคคลที่กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้กำลังใจตลอดในการทำวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณวิภา ผลาหาญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XXIII
บทที่ 1. บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 สีย้อมผ้า	4
2.1.1 คุณสมบัติของสีย้อม	4
2.1.2 สัญลักษณ์ของสี	5
2.1.3 การตั้งชื่อสี	6
2.1.4 องค์ประกอบของสีย้อม	7
2.1.5 แหล่งกำเนิดของสีย้อม	8
2.1.6 การจำแนกประเภทของสีย้อม	8
2.1.7 สีย้อมรีแอกทีฟ	14
2.1.8 ความเป็นพิษของสีย้อม	15
2.1.9 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	16
2.1.10 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า	21
2.2 เหล็ก	24
2.2.1 ประเภทของเหล็ก	24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี..... 24

2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน..... 25

2.3.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน..... 26

2.3.2 ปฏิกิริยารีดักชัน..... 26

2.4 ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก..... 26

2.5 จลนศาสตร์เคมี..... 27

2.5.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา..... 27

2.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราของปฏิกิริยา..... 32

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 34

บทที่ 3. วิธีดำเนินงานวิจัย..... 38

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี..... 38

3.1.1 อุปกรณ์..... 38

3.1.2 สารเคมี..... 39

3.2 การดำเนินการวิจัย..... 40

3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก..... 40

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก..... 40

3.2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Reactive... 41

3.2.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5..... 41

3.2.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue..... 41

3.2.3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Black..... 41

3.2.3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม. Reactive Red..... 41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Yellow..... 41

3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม..... 42

3.2.4.1 การศึกษาผลของพีเอช..... 42

3.2.4.2 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส..... 42

3.2.4.3 การศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า..... 43

3.2.4.4 การศึกษาผลของขนาดของเศษผงเหล็ก..... 43

3.2.4.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อม..... 44

3.2.4.6 การศึกษาผลของปริมาณของเศษผงเหล็ก..... 44

3.2.4.7 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ..... 45

3.2.5 การศึกษาจลนศาสตร์เคมี..... 45

3.2.6 การศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส..... 45

3.2.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบคอลัมน์..... 46

3.2.7.1 ศึกษาการไหลที่เหมาะสม..... 46

3.2.7.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อม Reactive Blue 5..... 46

3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม.... 47

3.2.8.1 การทดลองแบบแบทช์..... 47

3.2.8.2 การทดลองแบบคอลัมน์..... 47

3.2.9 การ Regenerate ของเศษผงเหล็ก..... 48

บทที่ 4. ผลการทดลอง..... 49

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเศษผงเหล็ก..... 49

4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive..... 53

4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive..... 53

4.2.2 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive..... 54

4.2.3 ความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive.... 55

4.2.4 ขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive 56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.5 ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive 57

4.2.6 ปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ... 58

4.3 คุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็ก..... 59

4.4 ผลการศึกษาของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม..... 65

4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์เคมี..... 68

4.5.1 ผลการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 68

4.5.2 ผลการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 35, 40, 45 และ 50 ^{o}C..... 70

4.6 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส..... 74

4.7 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์..... 75

4.7.1 อัตราการไหลที่เหมาะสม..... 75

4.7.2 เวลากักเก็บ..... 75

4.7.3 อัตราภาระบรรทุก..... 76

4.7.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 77

4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม..... 79

4.8.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์..... 79

4.8.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์..... 82

4.9 ผลการ Regenerate ของเศษผงเหล็ก..... 84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ **87**

5.1 สรุปผลการวิจัย 87

5.2 ข้อเสนอแนะ 89

บรรณานุกรม **90**

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive 93

ภาคผนวก ข. ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive 99

ภาคผนวก ค. ค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนักของสีย้อม Reactive 122

ภาคผนวก ง. ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาอันดับของปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 132

ภาคผนวก จ. การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ 135

ภาคผนวก ฉ. การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม 139

ภาคผนวก ช. การวิเคราะห์ทางสถิติ 144

ภาคผนวก ซ. การ Regenerate ของเศษผงเหล็ก 148

ประวัติผู้เขียน **151**

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัญลักษณ์ของสี	5
2.2 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี	6
2.3 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี	6
2.4 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี	14
2.5 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์	19
3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของเศษผงเหล็ก	40
4.1 พื้นที่ผิวของเศษผงเหล็ก	50
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็ก	50
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue และ Reactive Black ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม	59
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Red และ Reactive Yellow ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม	59
4.5 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม	60
4.6 ค่าคงที่ต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม	67
4.7 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	71
4.8 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	72
4.9 ค่าคงที่อัตราเร็วในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	75
4.10 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์	78
4.11 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.12 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ 80

4.13 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ 80

4.14 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ 83

4.15 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ 83

4.16 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 ของการ Regenerate 85

4.17 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive Blue 5 ของการ Regenerate 85

ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5..... 94

ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue..... 95

ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Black..... 96

ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Red..... 97

ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Yellew..... 98

ข.1.1 ผลของเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที..... 100

ข.1.2 ผลของเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที..... 100

ข.1.3 ผลของเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที..... 101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.1.4 ผลของเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที..... 101

ข.1.5 ผลของเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที..... 102

ข.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 103

ข.2.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 104

ข.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 105

ข.2.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 106

ข.2.5 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที 107

ข.3.1 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที 108

ข.3.2 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที 108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3.3 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที	109
ข.3.4 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที	109
ข.3.5 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที	110
ข.4.1 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	111
ข.4.2 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	111
ข.4.3 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	112
ข.4.4 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	112
ข.4.5 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	113
ข.5.1 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที	114

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ข.5.2 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 114

ข.5.3 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 115

ข.5.4 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 115

ข.5.5 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 116

ข.6.1 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 117

ข.6.2 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 117

ข.6.3 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 118

ข.6.4 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 118

ข.6.5 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที 119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.7.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Blue 5.....	120
ข.7.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Blue	120
ข.7.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Black.....	120
ข.7.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Red.....	121
ข.7.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Yellow.....	121
ค.1.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	123
ค.1.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	123
ค.1.3 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	124
ค.1.4 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	124
ค.1.5 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	125
ค.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง).....	125
ค.2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง).....	126
ค.2.3 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง).....	126
ค.2.4 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง).....	127
ค.2.5 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง).....	127
ค.3.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง).....	128

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.3.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 128

ค.3.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 128

ค.3.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 129

ค.3.5 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 129

ค.4.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 129

ค.4.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 130

ค.4.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 130

ค.4.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 130

ค.4.5 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 131

ง.1.1 ผลของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 133

ง.1.2 ผลของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 134

จ.1.1 ผลของความเข้มต่าง ๆ ในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เศษผงเหล็กขนาด 12-100 เมช ปริมาณ 10 กรัม อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 ถึง 30 นาที..... 136

จ.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)..... 137

จ.2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)..... 137

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

จ.3.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)..... 138

จ.3.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)..... 138

ฉ.1.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 140

ฉ.1.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 140

ฉ.2.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)..... 141

ฉ.2.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)..... 141

ฉ.3.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)..... 142

ฉ.3.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)..... 142

ฉ.4.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)..... 143

ฉ.4.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)..... 143

ช.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่พีเอชต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี..... 145

ช.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี..... 145

ช.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ความเร็วรอบในการเขย่าต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี..... 146

ช.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี..... 146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ช.5 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี 147

ช.6 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ปริมาณของเศษผงเหล็กต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี 147

ช.1 ผลของการ Regenerate สีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 149

ช.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 (ก่อนการ Regenerate) 149

ช..2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 (หลังการ Regenerate) 150

ช.2.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนัก ของสีย้อม Reactive Blue 5 (ก่อนการ Regenerate) 150

ช.2.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนัก ของสีย้อม Reactive Blue 5 (หลังการ Regenerate) 150

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5	15
2.2	องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี	23
2.3	ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Acid Orange 2 โดยใช้ Fe°	26
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์	28
2.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	30
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/[A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง	32
2.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log k กับ 1/T ของอัตราการสลายตัว	33
4.1	ลักษณะทางกายภาพของเศษผงเหล็ก	49
4.2	ลักษณะของอนุภาคของเศษผงเหล็กด้วย SEM กำลังขยาย 1000 เท่า	50
4.3	โครงสร้างผลึกของเศษผงเหล็กด้วย XRD	51
4.4	โครงสร้างของเศษผงเหล็กก่อนการทดลองด้วย EDS	51
4.5	โครงสร้างของเศษผงเหล็กหลังการทดลองด้วย EDS	52
4.6	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่พีเอชต่าง ๆ	53
4.7	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ	54
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ	55
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ	56
4.10	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ความเข้มข้นของสีย้อมต่าง ๆ	57
4.11	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่เศษผงเหล็กปริมาณต่าง ๆ	58
4.12	การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์	61
4.13	การกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์	61
4.14	การกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์	61
4.15	การกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์	62
4.16	การกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์	62
4.17	สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์	63
4.18	สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์	63
4.19	สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์..... 64
4.21 สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์..... 64
4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Blue 5..... 65
4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Blue 65
4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Black..... 66
4.25 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Red..... 66
4.26 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Yellow..... 67
4.27 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 68
4.28 ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 69
4.29 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 69
4.30 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 70
4.31 ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 70
4.32 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
ที่อุณหภูมิต่าง ๆ..... 71
4.33 สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
โดยการทดลองแบบแบทช์..... 73
4.34 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ
35, 40, 45 และ 50 ^{0}C..... 74
4.35 อัตราภาระบรรทุกของปริมาณสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เข้าสู่คอลัมน์
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ..... 76
4.36 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มต่าง ๆ..... 77
4.37 การกำจัดสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์.... 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.38	สเปกตรัมของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ ก่อนและหลังการบำบัดโดยใช้เศษผงเหล็ก	79
4.39	ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยใช้เศษผงเหล็ก	81
4.40	สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์	82
4.41	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เวลาต่าง ๆ (ก่อนการ Regenerate)	84
4.42	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เวลาต่าง ๆ (ก่อนการ Regenerate)	84
ก.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5	94
ก.2	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue	95
ก.3	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Black	96
ก.4	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Red	97
ก.5	กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Yellow	98

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
Fe	เหล็ก
Cr	โครเมียม
Mn	แมงกานีส
UV-Vis	ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
AAS	อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
XRF	เอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence spectrometer)
SEM	สแกนนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope)
EDS	เอนเนอจีดิสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive Spectrometer)
XRD	เอ็กซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)
C_t	ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)
t	เวลา (นาที)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
^0C	องศาเซลเซียส
R^2	สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์
k	ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา
R	ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3143 (จูลต่อโมล)
E_a	พลังงานกระตุ้น (activation energy)
A	แฟกเตอร์การชนกันหรือความถี่ของการชนกันของ อาร์รีเนียส
BOD	ปริมาณออกซิเจนที่ถูกจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand)
COD	ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand)
SS	ตะกอนแขวนลอย (Suspended Solids)
kHz	กิโลเฮิร์ต
kJ/mole	กิโลจูลต่อโมล

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันนับเป็นอุตสาหกรรมสำคัญที่นำรายได้เข้าประเทศอย่างสูง (กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2542) อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำปริมาณมาก เนื่องจากต้องอาศัยน้ำเป็นตัวกลางในกระบวนการผลิตเกือบทุกขั้นตอน น้ำทิ้งของกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จะมีสีและสารเคมีตกค้างปนเปื้อน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยโดยทั่วไปแล้วไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด

สีย้อมที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงฟอกย้อมมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่ ซับซ้อน และอาจเป็นสารที่มีพิษ ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมจำนวนมากมีความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสีย้อมประเภทอะโซ (azo dyes) ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและจัดเป็นสารก่อมะเร็ง (ฒาลิศา, 2542) ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ ทำให้เกิดสภาพที่ไม่น่าดูส่งผลต่อความรู้สึกหรือที่เรียกว่ามลพิษทางสายตา สีที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมสามารถเห็นได้ง่ายแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไป สามารถมองเห็นการปนเปื้อนของสีได้ด้วยตาเปล่าในแหล่งน้ำที่มีปริมาณสีประมาณ 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (Brown และ Hamburger, 1987) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ สี สภาพแสง ระดับความใสของน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ อนุภาคของสีบางชนิดจะไปบดบังการแพร่กระจายของแสงลงสู่แหล่งน้ำทำให้สมดุลของระบบนิเวศในน้ำเปลี่ยนแปลง จากปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกำจัดสีในน้ำทิ้งก่อนที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีววิทยา (biodegradation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) การออกซิเดชัน (oxidation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การใช้โอโซน (ozonation) คลอรินเนชัน (chlorination) การใช้แผ่นเมมเบรน (membrane technology) เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical technique) และการดูดซับ (adsorption) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

สีรีแอกทีฟ (reactive dyes) เป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม สีประเภทนี้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ ยังสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ยากต่อการกำจัดโดยการตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมี

งานวิจัยนี้ได้ใช้เศษผงเหล็กซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงกลึงในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อม โดยเศษผงเหล็กจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่โครโมฟอร์ของโครงสร้างสีย้อม โดยเข้าไปทำลายพันธะของโครโมฟอร์ ทำให้สีถูกกำจัด นอกจากนี้ ยังสามารถลดค่าบีโอดี และซีโอดีได้ ซึ่งวิธีนี้มีต้นทุนในการบำบัดต่ำและเป็นวิธีที่ง่าย เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ โดยใช้เศษผงเหล็ก
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ โดยใช้เศษผงเหล็ก
3. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ โดยใช้เศษผงเหล็ก
4. ศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ โดยใช้เศษผงเหล็ก
5. นำเศษผงเหล็กไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเศษผงเหล็ก ได้แก่ องค์ประกอบต่าง ๆ ของเศษผงเหล็ก โดยใช้เครื่อง XRF โครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่อง XRD พื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องออโตซอร์บ (autosorb) และขนาดของอนุภาคโดยใช้เครื่อง SEM และ EDS
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เศษผงเหล็ก ได้แก่ พีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นของสีย้อม ขนาดและปริมาณของเศษผงเหล็ก โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (batch test)
3. ศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสีย้อม และอุณหภูมิของน้ำทิ้ง
4. นำเอาสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์ไปใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม
5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการทดลองแบบคอลัมน์
6. นำเอาสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบคอลัมน์ไปใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยใช้เศษผงเหล็ก
2. ได้วิธีกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟที่มีต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม
3. เป็นการใช้เศษผงเหล็ก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อมผ้า

สีย้อมผ้าโดยส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ ดังนั้นการย้อมสีให้ได้ผลดีจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งค่านี้ต้องมากกว่าความสามารถในการรวมตัวของสีกับน้ำ ภายใต้สภาวะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น ปัจจัยที่ทำให้สีย้อมเกิดการดูดติดกับเส้นใย คือ

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)
2. แรงวันเดอร์วาวล์ (Van der Waal's forces)
3. แรงอิออนิก (Ionic forces)
4. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดที่ดีที่สุดคือ พันธะโควาเลนต์ นอกจากนี้ รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการย้อมอย่างมาก เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไหร่ก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น (ราตรี และคณะ, 2543)

2.1.1 คุณสมบัติของสีย้อม

ในการย้อมแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปในสภาพสารละลายหรือสารแขวนลอย เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การรวมตัวในสารละลาย การย่อยสลายในระหว่างการย้อมสี อัตราการเกิดปฏิกิริยา การให้และรับอิเล็กตรอน สำหรับโครงสร้างทางเคมีของสีแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติของสีดังนี้

1. ความเหมาะสมต่อเส้นใยชนิดหนึ่ง ๆ จะขึ้นอยู่กับอนุมูลของเส้นใยและสีย้อม
2. ความสามารถที่จะเข้ากันได้ดีกับเส้นใยหนึ่ง ๆ
3. จลนพลศาสตร์ของสีย้อม
4. คุณสมบัติการเคลื่อนตัวและความสม่ำเสมอของสี
5. ความทนต่อแสง
6. ความทนต่อความชื้น

7. ความทนต่อความร้อน

การเลือกสีย้อมต้องเลือกตามชนิดของวัตถุที่ย้อม มีความคงทนพอดีสามารถย้อมออกมาได้เหมือนสีตามตัวอย่าง และมีราคาถูก

2.1.2 สัญลักษณ์ของสี

สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมากและมักจะมีสีสันใกล้เคียงกัน ยากต่อการจำแนก เช่น สีฟ้าอาจจะมีสีฟ้าค่อนข้างไปทางแดง หรือฟ้าค่อนไปทางเหลือง ดังนั้น จึงกำหนดให้มีสัญลักษณ์ของสีเพื่อสะดวกต่อการจำแนกสี ดังแสดงในตารางที่ 2.1-2.3 (ราตรี และคณะ, 2543)

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์	สี
บี (B)	ออกสีน้ำเงิน
จี (G)	ออกสีเขียวหรือเหลือง
เจ (J)	ออกสีเหลือง
เอม (M)	ออกสีแดงคล้ำ
อาร์ (R)	ออกสีแดง
วี (V)	ออกสีม่วง
วาย (Y)	ออกสีเหลือง
เอ (A)	เข้มข้นมาก
อี (E)	เข้มข้นมากที่สุด (Excellent)
โอ (O)	เข้มข้นมาก
เอกซ์ (X)	เข้มข้นพิเศษ (Extra)
เค (K)	เข้มข้น (Konz)

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์บอกธรรมชาติของสี	ลักษณะ
ซี (C = Chlorine)	- ทนต่อคลอรีน (ฟอกขาวด้วยไฮโปคลอไรต์ได้) บางครั้งใช้สีแอล มีความหมายเช่นเดียวกัน
ดี (D = Discharge)	- สามารถลอกสีออกได้ดี
ดี (D = Disprese)	- สีชนิดกระจายตัวได้
เอฟ (F = Fast)	- ความคงทนดี สีไม่ตก (สัญลักษณ์ตัวนี้จะระบุก่อนอย่างอื่น)
เอฟ (F = Fine)	- ให้สีสด ไม่มีสิ่งอื่นปน (ระบุเป็นตัวสุดท้าย)
เอช (H = Half wool)	- ใช้กับผ้าขนสัตว์ปนฝ้ายหรือปนเรยอนได้
เค (K = Kait)	- ใช้ย้อมเย็นได้
แอล (L = Light)	- ทนแสงได้ดี
เอน (N = Neutral)	- อาจย้อมในน้ำย้อมที่เป็นกลางได้
พี (P = Perion)	- เหมาะสำหรับใช้ย้อมไนลอน
เอส (S = Soluble)	- ละลายน้ำได้ดี
เอส (S = Silk)	- เหมาะสำหรับใช้ย้อมไหม
ที (T = Tannin)	- เหมาะสำหรับพิมพ์ลอกด้วยสีแทนนิน
ยู (U = Ultra)	- กระจายตัวได้ดีเป็นพิเศษ
ดับเบิลยู (W = Washing)	- ทนต่อการซักดี
ดับเบิลยู (W = Wool)	- สีไดเร็กซ์เหมาะสำหรับย้อมขนสัตว์

ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์บอกคุณภาพของสี (ราตรี และคณะ, 2543)

สัญลักษณ์บอกคุณภาพ	ลักษณะ
ซีพี (CP = Chemical pure)	- มีความบริสุทธิ์สูง
เอฟแซด (FZ = Free from zinc)	- ไม่มีสังกะสีปน
แซดเอฟ (ZF = Zinc free)	- ไม่มีสังกะสีปน

2.1.3 การตั้งชื่อสี

สมาคมผู้ประกอบการย้อมสี American Association of Textile Chemists and Colorists ในประเทศสหรัฐอเมริกา และ Society of Dye and Colorists ในประเทศอังกฤษ ได้ร่วมกันจัดทำทะเบียนรายชื่อสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาดขึ้นเรียกว่า Color Index โดยตั้งชื่อให้กับสีแต่ละตัวเรียกว่า C.I. Generic Name โดยมีองค์ประกอบดังนี้

C.I. + ชื่อประเภทของสี + เฉดสี + หมายเลขลำดับ

โดยที่ประเภทของสีแบ่งออกเป็น 15 ประเภทคือ Acid, Azoic, Direct, Disperse, Fluorescent brighteners, Food, Ingrain, Leather, Mordant, Oxidation, Pigment, Reactive, Solvent, Sulfur และ Vat ส่วนเฉดสีจะแบ่งออกเป็น 8 เฉดสี คือ สีเหลือง (yellow), ส้ม (orange), แดง (red), ม่วง (violet), ฟ้า (blue), เขียว (green), น้ำตาล (brown) และ ดำ (black)
(ราตรี และคณะ, 2543)

ตัวอย่างการเรียกชื่อสี เช่น C.I. Acid Yellow 1 หมายถึง สีแอซิดสีเหลืองหมายเลขหนึ่ง

2.1.4 องค์ประกอบของสีย้อม

สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

2.1.4.1 **กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group)** เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีได้โดยสามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลต (UV range) และช่วงที่มองเห็นได้ (visible range; VS) ตั้งแต่ 200-800 นาโนเมตร
ตัวอย่างโครโมฟอร์ ได้แก่

C = C	ethylene chromophores
C = O	carbonyl chromophores
- N = O	nitroso chromophores
- NO_2	nitro chromophores
- N = N -	azo chromophores

2.1.4.2 **กลุ่มออกโซโครม (Auxochrom group)** เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใย ปกติแล้วหมายถึง saturated group ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน 200 นาโนเมตร แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์ จะทำให้เกิด resonance interaction ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่ความยาวคลื่นมากขึ้น
ตัวอย่างออกโซโครม ได้แก่

- OH	hydroxyl
- NH_2	amino
- COOH	carboxylic

2.1.5 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.5.1 **สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes)** เป็นสีย้อมที่ได้จากพืชและสัตว์ เช่น สีดำจากผลมะเกลือ สีครามได้มาจากต้นคราม หรือสีม่วงแดงได้จากครั่ง นอกจากนี้ ยังมีเปลือกไม้หลายชนิดที่นำมาใช้ย้อมเสื้อได้

2.1.5.2 **สีสังเคราะห์ (Synthetic dyes)** William Henry Perkin เป็นคนแรกที่สังเคราะห์สีม่วงอ่อน (Mauve) ขึ้นได้โดยบังเอิญจาก Alinine ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หลังจากนั้นจึงเกิดสีสังเคราะห์นานาชนิดขึ้น เช่น สีแดง (Fuchsin) สีส้ม และเหลือง (Azo dyes) และสีชมพู (Phenolphthalein) ปัจจุบันนิยมใช้สีสังเคราะห์มากขึ้น เพราะราคาถูกกว่า สวยกว่า ทนทานกว่า มีสีให้เลือกมากมาย การย้อมให้สีสม่ำเสมอไม่เป็นด่าง เป็นดอกดวง

2.1.6 การจำแนกประเภทของสีย้อม

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ ๆ ตามลักษณะทางกายภาพ การใช้งาน และโครงสร้างทางเคมีได้ดังนี้ (กรองกาญจน์, 2530)

2.1.6.1 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ ได้เป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดละลายน้ำได้ และสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

1. สีชนิดที่ละลายน้ำได้

- สีแอซิด (Acid dyes)
- สีเบสิค (Basic dyes)
- สีไดเร็กซ์ (Direct dyes)
- สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

2. สีชนิดที่ละลายน้ำไม่ได้

- สีอะโซ (Azo dyes)
- สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes)
- สีแว้ต (Vat dyes)
- สีพิคเมนท์ (Pigment dyes)
- สีซัลเฟอร์ (Sulfur dyes)
- สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes)

2.1.6.2 **จำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี**

สีย้อมสามารถจำแนกโดยอาศัยโครงสร้างทางเคมีออกเป็น 15 ชนิด ดังนี้

1. **สีไนโตรโซ** (Nitroso dyes)

โครงสร้างทางเคมีเป็นสารอะโรมาติก (Aromatic compounds) ที่มีหมู่ไนโตรโซ (-N=O) และหมู่ไฮดรอกไซด์ (-OH) ในตำแหน่งที่ติดกันในวงเบนซีน ซึ่งในการย้อมจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก โครเมียม โคบอลต์ และนิกเกิล

2. **สีไนโตร** (Nitro dyes)

โครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตร ($-NO_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรือหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ในตำแหน่งที่ติดกัน หรือตรงกันข้ามในวงแหวนวงเบนซีน โครงสร้างของสารประกอบอะโรมาติกเป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ (Quinodoid) แบ่งออกเป็นสีซัลโฟเนตเตดไนโตร (Sulfonated nitro dyes) ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และสีอันซัลโฟเนตเตดไนโตร (Unsulfonated nitro dyes) เป็นสี pigment

3. **สีอะโซ** (Azo dyes)

เป็นสีที่มีหมู่อะโซ (-N=N-) หนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรืออะมิโน ($-NH_2$) เป็นออกโซโครม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดอะโซ (Diazo) และสารร่วมทำปฏิกิริยา (coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรดหรือด่าง ไดอะโซเนียม (Diazonium) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะริลลามีน (Arylamine) หรือเฮทเทอโรไซคลิกอะมีน (Heterocyclic amine) กับสารร่วมปฏิกิริยา สีอะโซเป็นกลุ่มสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้ใช้ย้อมได้กับเส้นใยทุกชนิด (อังคณา, 2540)

4. **สีอะโซอิก** (Azoic dyes)

เป็นสีอะโซที่ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายต่าง ๆ ต้องเตรียมขึ้นบนเส้นใย มีโครโมฟอร์และออกโซโครมเหมือนสีอะโซ

5. **สีสติลบีน** (Stilbene dyes)

โครงสร้างมีสติลบีน (C_6H_5-CH=CH-C_6H_5) และหมู่อะโซเป็นโครโมฟอร์

6. **สีคาโรทีนอยด์** (Carotenoid dyes)

โครงสร้างมีหมู่โซ่พอลิอีน (Polyene) ของคาร์บอนอย่างน้อย 18 อะตอมเป็นโครโมฟอร์ สีชนิดนี้เป็นสีทั่วไปที่พบในธรรมชาติ สำหรับสีคาโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบทา-คาโรทีน (β-Carotene) เป็นต้น

7. **สีไดฟีนิลมีเทน** (Diphenylmethane dyes)

โครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลมีเทน มีหมู่อิมมีน (-C=NH) เป็นโครโมฟอร์ และหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม ส่วนใหญ่ใช้ย้อมกระดาษ นอกจากนี้ อาจใช้ย้อมขนสัตว์ ไหม หนัง ฝ้าย หรือเส้นใยอะคริลิก

8. **สีแซนทีน** (Xanthrene dyes)

โครงสร้างหลักเป็นแซนทีน (Dibenzo-1,4-pyran) และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ นิยมเรียกสีชนิดนี้ว่า สีอะมิโนแซนทีน (Amino xanthrene dye) หรือสีไฮดรอกซิลแซนทีน (Hydroxyl xanthrene dye) สีย้อมกลุ่มนี้ให้สีสดใส เนื่องจากสารละลายให้ฟลูออเรสเซนต์ ใช้ย้อมขนสัตว์และไหมได้ ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แทนนินเป็นมอร์แดนท์

9. **สีอะคริดิน** (Acridine dyes)

โครงสร้างหลักเป็นอะคริดินและมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม มีโครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ สีชนิดนี้นิยมใช้ย้อมหนัง และใช้เป็นสีเบสิคสำหรับย้อมไหมและเซลลูโลส

10. **สีควิโนลิน** (Quinoline dyes)

โครงสร้างหลักเป็นควิโนลิน สีกลุ่มนี้มีโครโมฟอร์คือ 2(2-Quinolyl)-1,3-indandiene สีพวกนี้นิยมใช้เป็นตัวทำละลายและสีเบสิคสำหรับย้อมกระดาษ

11. **สีแอนทราควิโนน** (Anthraquinone dyes)

โครงสร้างหลักคือ แอนทราควิโนนเป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม นิยมใช้เป็นสีวัต สีแอซิด สีมอร์แดนท์

12. **สีอินดิกอยด์** (Indigoid dyes)

โครโมฟอร์ คือ -CO-C=C-CO- และมีหมู่อะมิโนหรือซัลเฟอร์เป็นออกโซโครม ใช้เป็นสีวัตในการย้อมฝ้าย

13. **สีไทอะโซล** (Thiazole dyes)

โครงสร้างหลักคือ วงแหวนไทอะโซลเป็นโครโมฟอร์ มีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม สีชนิดนี้ใช้ย้อมฝ้ายได้โดยตรง

14. **สีซัลเฟอร์** (Sulfur dyes)

เป็นสีที่มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สีซัลเฟอร์นี้ไม่ละลายน้ำและสีไม่ติดเส้นใย ต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบลิวโค (Leuco compound) โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide) หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (sodium hydrosulfide) ก่อน ทำให้สีเกาะติดเส้นใย นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ผ้าไหม และขนสัตว์

15. **สีพธาโลไซยานิน** (Phthalocyanin dyes)

สีกลุ่มนี้มี Tetrabenzoporphyrazine เป็นโครโมฟอร์ และโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถจับโลหะ มีสมบัติคงทนต่อแสง ความร้อน กรด และเบส ใช้สำหรับสีเคลือบผิว หมึกพิมพ์ พลาสติก เส้นใย ยาง เป็นต้น

2.1.6.3 **จำแนกตามลักษณะการใช้งาน**

สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 12 ชนิด ดังนี้

1. **สีย้อมแอซิด** (Acid dyes)

เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายในสารละลายกรดและใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ไนลอน หนังแท้ และกระดาษ โดยทั่วไปสีย้อมแอซิดจะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโซ ไตรเอริลมีเทน (Azo triarylmethane) หรือแอนทราควิโนน (Anthraquinone)

2. **สีย้อมอะโซอิก** (Azoic dyes)

เป็นสีย้อมที่ทำให้เกิดสีขึ้นบนเส้นใยโดยการเตรียมเป็นเกลือไดอะโซเดียม (Diazodium salt) ก่อน และเมื่อนำไปสัมผัสกับเส้นใยแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสีย้อมบนเส้นใยที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยทำให้เกลือไดอะโซเดียมไม่สลายตัวจนกระทั่งทำปฏิกิริยาควบคู่กับเส้นใยเป็นสีย้อมอะโซอิก เป็นสีย้อมที่ให้สีสดใสสว่างเจิดจ้า และมีสมบัติติดทนนาน ดังนั้นจึงทนทาน มีอายุการใช้งานนาน และใช้สำหรับงานพิมพ์บนผ้าฝ้าย

3. **สีย้อมเบสิค** (Basic dyes)

เป็นสีย้อมที่มีหมู่อะมิโนหรืออนุพันธ์ของหมู่อะมิโน สีย้อมเบสิคจะละลายในสารละลายกรด และไม่ละลายในสารละลายเบส โครงสร้างส่วนใหญ่ของสีย้อมเบสิคจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี เป็นพวกกลุ่มของสารประกอบไตรเอริลมีเทน (Triarylmethane) หรือ แซนทีนส์ (Xanthenes) สีย้อมเบสิคสามารถใช้ย้อมขนสัตว์ หรือใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ (Mordant) เพื่อย้อมฝ้าย สีย้อมเบสิคสามารถนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์กระดาษคาร์บอนสำหรับทำกระดาษสำเนา และใช้สำหรับผลิตเป็นแถบหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ดีด สีย้อมเบสิคสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นหมึกเขียนและหมึกพิมพ์

4. **สีย้อมไดเร็กซ์** (Direct dyes)

เป็นสีย้อมที่สามารถนำไปใช้สำหรับย้อมฝ้ายได้โดยตรงและไม่ต้องใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ สีย้อมไดเร็กซ์สามารถใช้สำหรับย้อมผลิตภัณฑ์ฝ้ายผสม และใช้ย้อมขนสัตว์ หรือใช้ย้อมไหม โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเร็กซ์เป็นสีย้อมกลุ่มอะโซ สมบัติการละลายโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว สามารถทำให้ลดลงโดยการเติมเกลือลงไปในอ่างย้อมสี สีย้อมไดเร็กซ์บางตัวสามารถใช้ย้อมบนเส้นใยโดยทำปฏิกิริยาการเติมเกลือไดอะโซเดียมบนวัสดุก่อน จากนั้นจึงจะทำปฏิกิริยาการควบคู่ เพื่อทำให้เกิดเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายบนเนื้อผ้าหรือเส้นใย สารประกอบที่ใช้กันโดยทั่ว ๆ ไปสำหรับการทำปฏิกิริยาควบคู่ก็คือ เบต้าแนฟทอล (β-napthol)

5. **สีย้อมดิสเพอร์ส** (Disperse dyes)

เส้นใยสังเคราะห์จำนวนมาก เช่น เส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) เส้นใยพลาสติก และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ (polyester) จะมีความยากลำบากในการย้อมติดสี สีดิสเพอร์ส

มีความสามารถในการย้อมได้ดีกับวัสดุดังกล่าว และสามารถย้อมสีได้เนื้อเนียนผิวดี โดยสีจะกระจายตัวดูดซับและแทรกตัวลงบนเส้นใย สีย้อมกลุ่มอะโซสามารถใช้เป็นสีย้อมดิสเพอร์สได้ แต่สีย้อมกลุ่มแอนทราควิโนนจะใช้ประโยชน์เป็นสีย้อมดิสเพอร์สที่ดีกว่า เนื่องจากสมบัติที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย อย่างไรก็ตาม สีย้อมกลุ่มอะโซและสีย้อมกลุ่มแอนทราควิโนนสามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในเส้นใยได้ดี โดยหมู่เอทาโนลามีน (-NH-CH_2CH_2-OH) ซึ่งเป็นหมู่ที่พบในสีย้อมดิสเพอร์ส จะช่วยในการกระจายตัวและเกิดการดูดซับเข้าไปในเส้นใยได้ดี

6. **สีย้อมรีแอ็กทีฟ** (Reactive dyes)

เป็นสีย้อมที่เกิดจากการสร้างพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างสีย้อมและเส้นใยเซลลูโลส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย้อมโดยสีชนิดนี้จะทนทานต่อการซักล้างได้ดี สีย้อมรีแอ็กทีฟเป็นสีย้อมชนิดใหม่ที่สุดซึ่งได้พัฒนาในปี ค.ศ. 1956 สามารถใช้ในการย้อมฝ้าย เรยอน และไนลอนบางชนิด

7. **สารฟลูออเรสเซนต์ไวเทนนิง** (Fluorescent whitening)

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

8. **สีอาหาร ยา และเครื่องสำอาง**

ในปัจจุบันจะมีประมาณ 52 สีเท่านั้น เนื่องจากมีการควบคุมอย่างเข้มงวดในการใช้งานโดยคณะกรรมการอาหารและยาแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ความบริสุทธิ์และความปลอดภัยจะมีการควบคุมอย่างดีเป็นพิเศษเพื่อที่จะรับรองความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค ในปัจจุบันมีการค้นคว้ากันอย่างมากในสีตระกูลนี้ เพื่อที่จะพัฒนาให้สียึดเกาะกับสารพอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อบริโภคผ่านเข้าไปในระบบการย่อยอาหารแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพหรือตกค้างภายในร่างกาย สีตระกูลนี้มีหลายตัวที่ได้ผ่านการทดสอบความเป็นพิษเรื้อรังและทดสอบผลตกค้างต่อผู้บริโภค และได้ผ่านการยอมรับแล้ว ซึ่งมีทั้งสีที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นแอนทราควิโนน อะโซ และอินดิกอยด์

9. **สีย้อมมอร์แดนต์** (Mordant dyes)

สีย้อมมอร์แดนต์บางตัวเมื่อรวมกับเกลือของโลหะจะให้ผลิตภัณฑ์สีย้อมที่ไม่ละลาย เรียกว่า เลคส์ (lakes) และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นรงควัตถุ (pigments) ถ้าหากต้องการย้อม สิ่งทอที่ผลิตจากฝ้าย ขนสัตว์ หรือเส้นใยโปรตีน ก็จะนำสิ่งทอเหล่านี้ใส่เกลือของอะลูมิเนียม เกลือโครเมียม หรือเกลือเหล็ก และเมื่อสิ่งทอดังกล่าวสัมผัสกับสีย้อมจะทำให้เกิดสีย้อมที่ไม่ละลายโดยเกลือของโลหะจะตกตะกอนบนเส้นใย ซึ่งทำให้สีย้อมมีความทนทานต่อแสง และ

ทนทานต่อการซักล้างได้ดี หมู่ –OH และหมู่ -COOH ที่เกาะอยู่บนสีย้อมอะโซ หรือแอนทราควิโนนจะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะเกิดเป็นสีมอร์แดนต์ได้

10. **สีย้อมโซเวนท์** (Solvent dyes)

เป็นสีย้อมที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) สารละลายคลอริเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated hydrocarbons) หรือสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) สีย้อมโซเวนท์เป็นสีย้อมที่ช่วยในการย้อมเส้นใยสังเคราะห์ที่มีความยากลำบากในการย้อมสี เช่น เส้นใยพอลิเอสเทอร์ (polyester) เส้นใยพอลิอะคริเลต (polyacrylate) และเส้นใยเซลลูโลสไตรอะซิเตต (Cellulose triacetate) ตัวทำละลายที่ใช้ได้ดีในปัจจุบันคือ เปอร์คลอโรเอทิลีน (Perchloroethylene) เทคโนโลยีการย้อมสีชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาของสีย้อมตกค้างในการย้อมได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการย้อมสี สีย้อมโซเวนท์สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสีที่ใส่ในน้ำมัน ขี้ผึ้ง วานิช ครีมขัดรองเท้า ลิปสติก และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

11. **สีย้อมซัลเฟอร์** (Sulfur dyes)

เป็นสีย้อมที่มีราคาถูกและใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายให้มี dull shades สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่มีความทนทานต่อการซีดจางสีเนื่องจากแสง ทนทานต่อการซักล้าง และทนกรด แต่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนสีกับคลอรีน และน้ำยาฟอกสีไฮโปรคลอไรท์ (Hypochlorite) หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์มีความยุ่งยากซับซ้อนและยังไม่เป็นที่รู้จักกันแน่นอน สีย้อมซัลเฟอร์ผลิตโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารซัลไฟด์หรือพอลิซัลไฟด์กับสารประกอบอะโรมาติกส์ที่มีหมู่คลอรีน สีย้อมซัลเฟอร์โดยทั่ว ๆ ไปจะไม่ค่อยมีสีเมื่ออยู่ในรูปรีดิวซ์ในสารละลายของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ แต่มีสีเข้มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะออกซิเดชัน สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่รู้จักกันอย่างดีและใช้กันมาเป็นเวลานาน

12. **สีย้อมแวต** (Vat dyes)

สีย้อมกลุ่มนี้จะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่ยุ่งยาก ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน (Anthraquinone) หรืออินแดนทรีน (Indanthrene) ในสารละลายที่สภาวะรีดักชันสีย้อมกลุ่มนี้จะละลายในสารละลายอัลคาไลน์ (Alkalines) และไม่มีสี ซึ่งเรียกว่า Leuco vats สารละลายดังกล่าวจะใช้ใส่ลงไปในเส้นใยฝ้าย ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสัมผัสกับอากาศจะเกิดเป็นสีขึ้นมา สีย้อมแวตเป็นสีที่มีราคาแพง สามารถใช้กับสิ่งทอที่ใช้ประจำวันที่มีการซักล้างบ่อย ๆ เช่น เสื้อเชิ้ตสุภาพบุรุษ สีย้อมแวตสามารถนำไปใช้เป็นสีพิมพ์ผ้า สีพิมพ์ผ้าจะมีส่วนผสมของโซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (Sodium hydrosulfite) และสารประกอบอัลดีไฮด์ (Aldehyde) ที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถนำไปทำการพิมพ์สีบนผ้าก่อน ต่อจากนั้นนำไปทำให้เกิดเป็นสีโดยผ่านผ้าเข้าไปในอ่างที่บรรจุสารออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไดโครเมต (Sodium dichromate) หรือโซเดียมเปอร์โบเรต (Sodium perborate)

นอกจากนี้ ประเภทของสีย้อมยังสามารถจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี (อุตสาหกรรมย้อมผ้า, 2537)

เส้นใย	ประเภทของสี
ฝ้าย	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ลินิน	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ขนสัตว์	Acid, Metal-complex, Mordant, Reactive
ไหม	Acid, Direct, Reactive, Basic
เรยอน	Direct, Reactive
อาซีเตท	Disperse
ไนลอน	Acid, Modified basic, Metal-complex
โพลีเอสเตอร์	Disperse
อะคริลิค	Modified basic, Modified acids

2.1.7 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

สีรีแอกทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอิออนลบ เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะย้อมโมเลกุลของสี จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH^-) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (cross link) กับเซลลูโลส ได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอกทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่ายคือ

S – D – T – X

เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

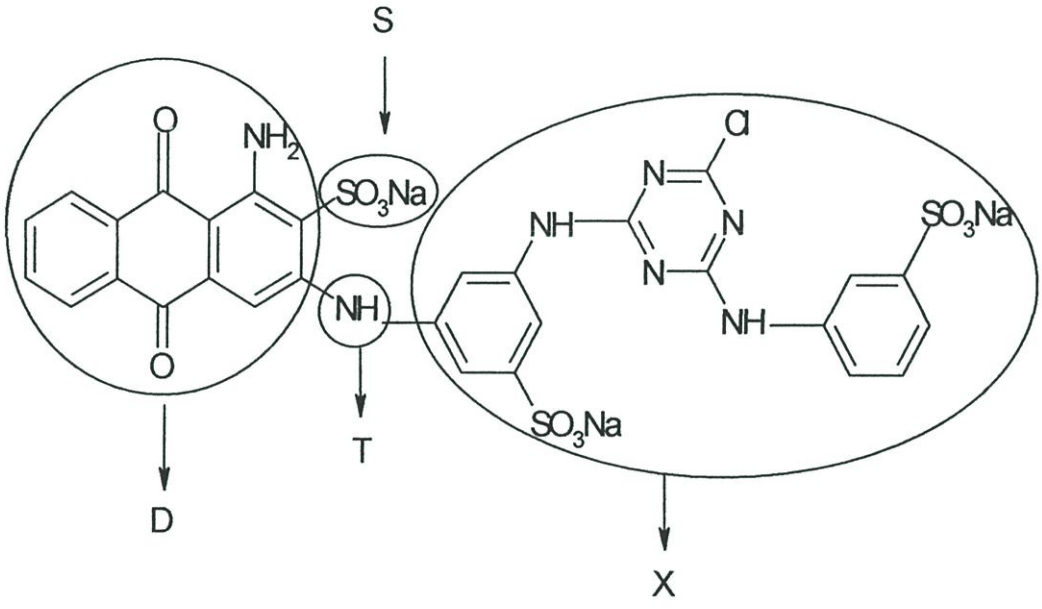
X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ

Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่ -NH , -NHCO , $-SO_2$, $-NHSO_3$และ $-NCH_3$ เป็นต้น

S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิก ($-SO_3Na$) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

ตัวอย่างสูตรโครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี bridging group ก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring

โครงสร้างเคมีที่เป็นองค์ประกอบของรีแอกทีฟมีได้ทุกประเภท ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มอะโซ (Azo) แอนทราควิโนน (Anthraquinone) ฟาลาโลไซยานีน (Phthalocyanin) เป็นต้น

2.1.8 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา, 2537) แต่สีย้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารพิษที่มีพิษได้ เช่น สีย้อมที่มีโครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งเป็นสีย้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีการใช้ถึง 60-70% ของสีที่ใช้กันอยู่ สีอะโซจะมีพันธะคู่ของ

ไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรเมติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้เป็นขั้นสุดท้ายในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วยเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมที่สมบูรณ์ (โกมล, 2541) อย่างไรก็ตาม สารอะโรมาติกอะมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งมีเพียง 15 ชนิดเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกอะมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิค (Aromatic aminosulphomic acid) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมะเร็งหรือมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก (อังคณา, 2540) สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ โดยทางหายใจ ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

สำหรับผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบัน จึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้มแม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ และจากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่าสีย้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

2.1.9 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

2.1.9.1 แหล่งกำเนิดของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียในการย้อมผ้า เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

1. **กระบวนการต้มแป้ง** เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มแป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้

2. **กระบวนการทำความสะอาด** เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า

3. **กระบวนการฟอกขาว** เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออก โดยใช้สารเคมีคือโซเดียมไฮโปคลอไรท์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อมเพื่อให้สีติดดียิ่งขึ้นและสีไม่เปลี่ยน

4. **กระบวนการซุบมัน** เป็นการทำเพื่อให้ผ้าเพิ่มความมัน และดูดสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่มทำได้โดยการซุบผ้าลงในน้ำยาโซดาที่อุณหภูมิต่ำ

5. **กระบวนการย้อมสี และการตกแต่งพิเศษ**

6. **กระบวนการพิมพ์ผ้า**

7. **น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน** นอกจากนี้กระบวนการฟอกย้อมยังอาศัยไอน้ำจากหม้อไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำที่สะอาดที่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย ส่วนน้ำหล่อเย็นในกระบวนการย้อม ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาด สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

2.1.9.2 **ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม**

น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท สามารถจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1. **สีย้อม** (Dye)

การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลาย และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5 - 50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2. **สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม**

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

3. **สารช่วยย้อม** (Auxiliary chemicals)

ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring agent) สารช่วยเปียก (Wetting agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ (Leveling agent)

4. **สารเคมีพื้นฐาน** (Basic chemicals)

เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนฟอกย้อมโดยตรงได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

5. **สารเคมีตกแต่งสำเร็จ**

ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ สารกันยับ เป็นต้น สารเคมีต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

6. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งเส้นด้ายยีนส์ เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อมและจะหลุดติดออกมาในน้ำเสีย

7. เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบสิ่งหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (polyesters) ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

8. สิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่าง ๆ ที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่น ๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปรอะเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบจำพวก Chlorinated benzene สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวอาจส่งผลกระทบอย่างมากต่อลักษณะสมบัติของน้ำเสีย

2.1.9.3 สมบัติของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียที่มาจากโรงงานต่าง ๆ จะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใยที่นำมาย้อมและการใช้กระบวนการย้อมที่แตกต่างกัน

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีลักษณะดังนี้

1. **ปริมาณสารอินทรีย์สูง** เนื่องจากมีค่า BOD, COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่ง ไขมัน และตัวทำละลายต่าง ๆ

2. **มีความเป็นด่างสูง** สารที่ทำให้น้ำมีลักษณะเป็นด่างคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

3. **มีอุณหภูมิสูง**

4. **ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูง** ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียม และกรดต่าง ๆ

5. **มีสีเข้มมาก** ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า

6. **มีโลหะเจือปน** โลหะหนักนี้มาจากสีที่ใช้ย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะพวกทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

7. **มีปริมาณ SS สูง**

จากการสำรวจจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab sample) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยมีค่าการตรวจวัด ได้แก่ ความสกปรกในรูปของค่า BOD, COD, SS, พีเอช และค่าปริมาณสี โดยใช้วิธีการเทียบสี (Platinum Cobalt Method) ซึ่งได้ผลสรุปค่าประเมินต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.5 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ตารางที่ 2.5 สมบัติของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมก่อนการบำบัดแบ่งตามผลิตภัณฑ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

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

2.1.9.4 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีดังนี้

1. **ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ**

น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา ได้แก่ สารประกอบอะนิลีน

2. **การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ**

น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภท

3. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้แม่น้ำไม่น่าดู นอกจากนี้ สีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.1.9.5 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีดังนี้

1. การเลือกสีย้อมและสารเคมีที่ใช้อย่างเหมาะสม

การเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลดของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษที่แตกต่างกัน และการใช้ปริมาณสารเคมีหรือสีย้อมในปริมาณที่เหมาะสมเป็นการลดปริมาณสารเคมีส่วนเกิน ซึ่งปริมาณสารเคมีส่วนเกินนั้นจะกลายเป็นมลพิษทางน้ำต่อไป จากการศึกษากระบวนฟอกย้อมพบว่า หากสามารถลดปริมาณสารเคมีได้ 20-50 % จะสามารถลดปริมาณของเสียในน้ำทิ้งในรูปของ BOD ได้ถึงปริมาณ 30-50 % ผลอีกประการหนึ่งที่เห็นได้ชัดเจนก็คือค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีจะลดลงด้วย

2. การนำเทคโนโลยีที่สะอาดมาใช้ในโรงงาน

เทคโนโลยีที่สะอาดหมายถึง เทคโนโลยีที่เป็นการผลิตที่ปราศจากของเสียหรือมีของเสียน้อยที่สุด แม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ ส่วนใหญ่ยังคงมีราคาแพงและอาจต้องใช้เวลาในการปรับปรุงโรงงาน เพื่อให้ใช้เทคโนโลยีนี้ให้ค่อนข้างนานแต่ระยะยาว การเลือกใช้เทคโนโลยีนี้จัดเป็นทางออกที่ดี

3. การลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้ง

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งแปรผันตามปริมาณและความสกปรกของน้ำ ดังนั้นการลดปริมาณและความสกปรกของน้ำย่อมสามารถช่วยลดภาระในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานลงได้ วิธีลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งอาจทำได้มากมายหลายทาง เช่น การใช้น้ำด้วยความประหยัด การเลือกใช้สีที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดติดในเส้นใยสูง เป็นต้น

4. การใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีความหลากหลายทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นโรงงานควรเลือกใช้กรรมวิธีในการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของโรงงาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

5. การนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการลดปริมาณสีสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือการนำกลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำอีกเท่าที่จะทำได้ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมควรจะเลือกใช้ให้เหมาะสมคือ เลือกชนิดที่สามารถใช้ซ้ำได้อีก โดยไม่ทำให้เกิดปัญหาขึ้น เช่น เกิดเป็นจุดบนผ้า (ลั่นทม, 2535)

2.1.10 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า

สีย้อมในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าสามารถถูกกำจัดไปบางส่วนจากการบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิไม่ว่าจะเป็นกระบวนการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีหรือทางชีวภาพ ความพยายามที่จะกำจัดสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งให้หมดไปหรือให้มีเหลืออยู่น้อยที่สุดได้มีการคิดค้นมาเป็นเวลานาน วิธีการบำบัดอาจใช้วิธีใดวิธีหนึ่งหรืออาจจะใช้หลายวิธีร่วมกันก็ได้ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดขึ้นอยู่กับสารเคมีที่นำมาใช้ในการผลิตสี บางครั้งพบว่าวิธีการเดียวอาจไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างเหมาะสมจึงจำเป็นต้องมีวิธีอื่นร่วมด้วย เนื่องจากโรงงานฟอกย้อมมีการใช้สีย้อมหลายประเภทด้วยกัน วิธีที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งมีดังนี้

2.1.10.1 โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)

โคแอกกูเลชันหรือการสร้างตะกอนเคมี ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ ขั้นตอนการเติมสารเคมีสร้างตะกอน (coagulant) ซึ่งได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารโพลีอิเล็กโทรไลท์ (polyelectrolyte) เป็นต้น ผสมกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยเล็ก ๆ ขั้นตอนที่สองคือ การกวนอย่างช้า ๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนแขวนลอยเล็ก ๆ กับสารสร้างตะกอน จนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ สาเหตุที่ต้องทำการกวนอย่างช้า ๆ เพราะไม่ให้สภาพการเกาะตัวกันเกิดการแตกหลุดจากกันของตะกอนเล็ก ๆ เหล่านั้น การหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้ในการสร้างตะกอนจำเป็นต้องทำการทดลองที่เรียกว่า จาร์เทส (Jar test) โดยการทดลองจะมีทั้งการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที ประมาณ 1 นาที ตามด้วยการกวนช้า 20-70 รอบต่อนาที ประมาณ 20 นาที ในกระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยโคแอกกูเลชันนั้นมีสารเคมีสร้างตะกอนให้เลือกหลายชนิด การเลือกใช้สารสร้างตะกอนขึ้นอยู่กับความเหมาะสม โดยดูปัจจัยด้านประสิทธิภาพค่าใช้จ่าย วัตถุประสงค์ และอื่น ๆ

2.1.10.2 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือติดบนผิวโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดติด (adsorbent) และเรียกกลไกตั้งแต่โมเลกุลหรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปเกาะติดกับพื้นผิวของอีกสารหนึ่งว่า การดูดติดผิว (adsorption) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waals) หรือด้วยแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยทั่วไปการดูดติดผิวในกระบวนการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำประปา และกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสีย นิยมใช้แอกติเวตเต็ดคาร์บอนซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จึงทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวสูง

2.1.10.3 **คลอริเนชัน** (Chlorination)

คลอริเนชันเป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ (*Oxidizing agent*) ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซิงสูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ คลอรีนที่ใช้จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ (Hypochlorite) และคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide)

2.1.10.4 **โอโซนเนชัน** (Ozonation)

โอโซนเนชันเป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซิงสูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า การผลิตโอโซนทำได้โดยผ่านอากาศแห้ง หรือออกซิเจนบริสุทธิ์ไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลท์ อะตอมของออกซิเจนจะถูกบังคับให้จับตัวกันใหม่กลายเป็นโอโซน (O_3) อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัม หรือเท่ากับ 1.4 % โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้ แต่นิยมใช้ในรูปก๊าซมากกว่า โอโซนเป็นก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง มนุษย์สามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 ppm โดยปริมาตร โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าให้มนุษย์ดมโอโซนเข้มข้นประมาณ 1 % (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายใน 1 นาที

2.1.10.5 **เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรน** (Membrane Technology)

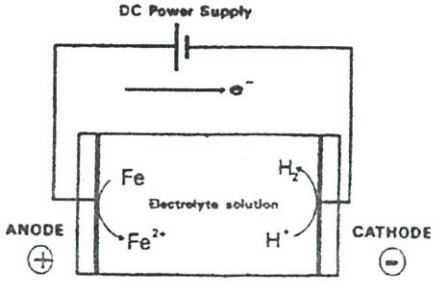
เทคโนโลยีในการใช้แผ่นเมมเบรนประกอบด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และรีเวอร์ออสโมซิส (Reverse Osmosis) วิธีอัลตราฟิลเตรชันมีหลักการทำงานของระบบคือ ใช้แผ่นเยื่อกระดาษ (membrane) แบบ porous พวกเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) หรือพอลีเมอร์สังเคราะห์ต่าง ๆ และอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1,034 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร เยื่อกรองจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500-500,000 และขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตรได้ สำหรับวิธีรีเวอร์สออสโมซิสสามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอัลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้ด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semipermeable membrane) ณ ความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซิเตต และไนลอน

ในปัจจุบันนี้ วิธีอัลตราฟิลเตรชันเป็นเทคโนโลยีในการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ พบว่าสามารถนำ PVC (polyvinyl chloride) โซดาไฟ สีย้อมอินดิโก และน้ำกลับมาใช้ใหม่ได้ผลสำเร็จ

แม้ว่าวิธีนี้สามารถกำจัดสีย้อมและสารที่เติมได้ทุกประเภท แต่ก็ยังไม่มีการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากความยุ่งยากในการแยกสีผสม

2.1.10.6 **ไฟฟ้าเคมี** (Electrochemical Technique)

วิธีไฟฟ้าเคมีหรืออิเล็คโตรเคมิคัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม วิธีนี้ใช้ในกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด BOD COD SS และสีในน้ำทิ้ง ลักษณะการทำงานมีองค์ประกอบหลักคือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power source) ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว (electrode) และสารละลายนำไฟฟ้า (electrolyte solution) เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าสู่เซลไฟฟ้าเคมีที่ผ่านแผ่นเหล็ก (Fe) เป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2 พบว่าที่ขั้วบวก (anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก ซึ่งทำให้แผ่นเหล็กเกิดการสึกกร่อนและละลายออกมาในรูปของเฟอรัสอิออน (Fe^{2+}) ที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ Fe^{2+} จะเพิ่มปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์อิออน (OH^-) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดตกตะกอนของเฟอรัสอิออนและเฟอริกอิออนซึ่งจะดูดติดและช่วยตกตะกอนของโลหะหนักสีย้อมหรือสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี

อย่างไรก็ตาม การกำจัดสีย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก (Zero-valent iron) ในการกำจัดสีโดยใช้เหล็กเป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาทำลายพันธะคู่ของกลุ่มโครโมฟอร์ของสี วิธีนี้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อย สะดวก และรวดเร็ว

2.2 เหล็ก

2.2.1 ประเภทของเหล็ก

เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด (ณัฐสม, 2532) คือ

2.2.1.1 **เหล็กอ่อน** (Wrought Iron) หมายถึง เหล็กที่ได้จากเตาพุดเดิล (Puddel Furnace) ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่ผลิตเหล็กที่เก่าแก่มาก เป็นเหล็กที่นิยมของช่างตีเหล็ก โดยเฉพาะเหล็กชนิดนี้เป็นเหล็กที่มีความบริสุทธิ์มาก คือ เป็นเนื้อเหล็กถึงประมาณ 99.99 % เมื่อเผาให้ร้อนเหล็กอ่อนจะไม่ละลาย แต่จะตีขึ้นรูปได้ง่ายมากยิ่งกว่านั้นยังสามารถตีชิ้นเหล็กให้ประสานกัน

2.2.1.2 **เหล็กกล้า** (Steel) หมายถึง สารประกอบของเหล็ก คาร์บอนและสารเจือ เหล็กบริสุทธิ์มีความอ่อนสูงมากและมีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่มีความเหนียวสูง ไม่เหมาะกับงานทางด้านวิศวกรรมทั่วไป ธาตุที่สำคัญที่สุดที่ใช้ผสมลงในเหล็กคือ คาร์บอน เพราะถ้ามีคาร์บอนผสมอยู่เล็กน้อย จะทำให้คุณสมบัติของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปได้ง่ายมาก เมื่อเทียบกับการผสมกับธาตุอื่น ๆ เช่น แมงกานีส ซิลิกอน หรือ โครเมียม อาจกล่าวได้ว่าคาร์บอนมีอิทธิพลมากกว่าสารเจือประมาณ 10 เท่า เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 2.06 % จะไม่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย เพราะมีความเปราะสูงมาก ซึ่งเหล็กที่มีคาร์บอนสูงมากนี้จะอยู่ในรูปของเหล็กหล่อ

พื้นผิวของผงเหล็กกล้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (Burris *et al.*, 1995 และ Mantha *et al.*, 2001) คือ

1. ส่วนที่เป็น Reactive sites เป็นกำจัดโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) จะเกิดปฏิกิริยาทำลายพันธะคู่ของโมเลกุล

2. ส่วนที่เป็น Nonreactive sites เป็นการกำจัดโดยการดูดซับ โดยโมเลกุลของสารละลายจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของผงเหล็ก

2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Zero Valent Iron) เท่านั้น ที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่นั้นมิใช่เหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติดีขึ้น หรือที่เรียกว่า เหล็กกล้า (Steel)

เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (Fe^0) เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+})

เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าคงที่ในการละลาย (Solubility constant) ดังปฏิกิริยา 2.1 และ 2.2

$$Fe(OH)_2(S) \rightleftharpoons Fe^{2-} + 2\,OH^- \quad ; \log K_{sp} = -14.5 \qquad (2.1)$$

$$Fe(OH)_3(S) \rightleftharpoons Fe^{3+} + 3\,OH^- \quad ; \log K_{sp} = -38.0 \qquad (2.2)$$

เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้น้อย จึงตกผลึกเป็นของแข็งสีขาวได้อย่างรวดเร็วและเคลือบอยู่บนผิวโลหะ อย่างไรก็ตามเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มีความคงตัวต่ำ จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนถูกเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็วดังปฏิกิริยา 2.3

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightleftharpoons 4\,Fe(OH)_3 \qquad (2.3)$$

เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกออกไซด์ได้โดยการดึงน้ำออก ดังปฏิกิริยา 2.4-2.5

$$2\,Fe(OH)_3 \rightleftharpoons Fe_2O_3 + 3\,H_2O \qquad (2.4)$$

$$Fe(OH)_3 \rightleftharpoons FeOOH + H_2O \qquad (2.5)$$

เหล็กสนิมที่เห็นโดยทั่วไปคือ Fe_2O_3 จากการวิจัยพบว่าเมื่อสนิมเหล็กเกาะจับอยู่บนขั้วบวก (anodic region) ไอออนอื่น ๆ ก็จะตกผลึกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อเคาะเอาสนิมเหล็กมาวิเคราะห์ดูมักปรากฏว่ามีสารประกอบประเภทความกระด้าง เศษดินทรายต่าง ๆ ปะปนอยู่ด้วยเสมอ (มั่นสิน และไพพรรณ, 2527)

2.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน–รีดักชัน

ปฏิกิริยาจำนวนมากมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่าออกซิเดชัน–รีดักชัน หรือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ เมื่อใดมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อใดมีการลดเลขออกซิเดชันเรียกว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นควบคู่พร้อมกันไปเสมอ เพื่อที่จะทำให้เลขออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นเท่ากันพอดีกับเลขออกซิเดชันที่ลดลง

2.3.1 **ปฏิกิริยาออกซิเดชัน** (Oxidation) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.6

$$Fe^{0} \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e^{-} \qquad (2.6)$$

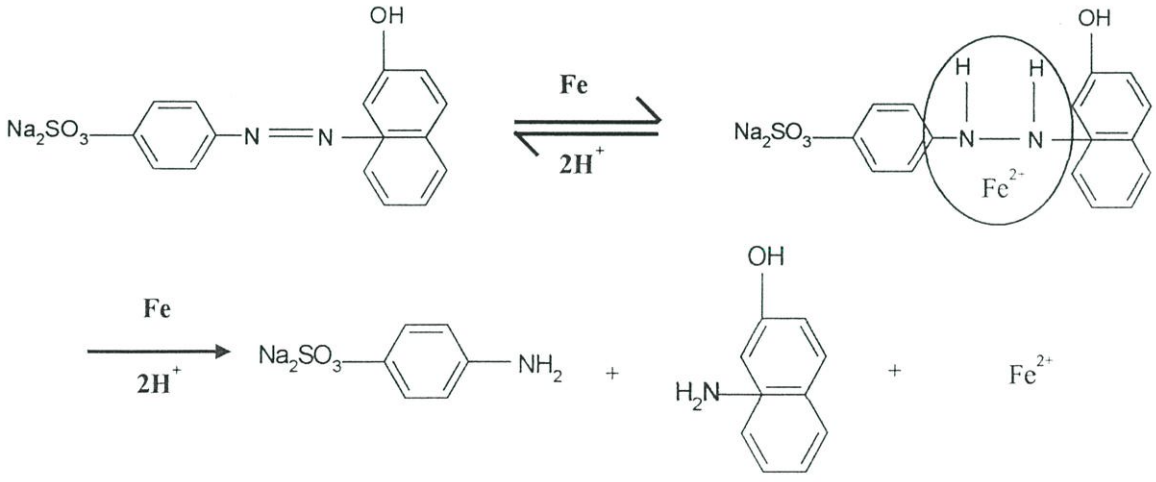
ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) หมายถึง สารที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ ปฏิกิริยา (2.6) ตัวออกซิไดซ์ คือ Fe^{2+}

2.3.2 **ปฏิกิริยารีดักชัน** (Reduction) หมายถึง ปฏิกิริยาที่มีการการรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างดังปฏิกิริยา 2.7

$$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Fe^{0} \qquad (2.7)$$

ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) หมายถึง สารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ ปฏิกิริยา (2.7) ตัวรีดิวซ์ คือ Fe^{0} (กฤษณา, 2531)

2.4 ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม โดยใช้เศษผงเหล็ก



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Acid Orange 2 โดยใช้ Fe^{0}

จากรูปที่ 2.3 โครงสร้างของสีย้อมจะมี azo chromophore (N=N) ทำให้เกิดสี ผงเหล็ก (Fe^{0}) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีในสารละลายที่เป็นกรด จะเกิดปฏิกิริยาดังปฏิกิริยา 2.6 ได้เฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) เฟอรัสไอออนจะเข้าไปทำลายพันธะคู่ของโครโมฟอร์ ทำให้สีถูกกำจัด

การใช้เหล็กกล้าในการกำจัดสีย้อม จะประกอบด้วยปฏิกิริยาต่าง ๆ หลายปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาที่สำคัญในการกำจัดสีย้อม สามารถจำแนกเป็น 2 ปฏิกิริยา ตามองค์ประกอบบนพื้นผิวของเหล็กกล้า (Burris *et al.*, 1995 และ Mantha *et al.*, 2001) คือ

1. ปฏิกิริยารีดอกซ์ เนื่องจากผงเหล็ก (Fe^0) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับพันธะคู่ของกลุ่มโครโมฟอร์

2. การดูดซับบนพื้นผิวของเหล็กกล้า เนื่องจากองค์ประกอบบนพื้นผิวของเหล็กกล้า ได้แก่ คาร์บอน

2.5 จลนศาสตร์เคมี

2.5.1 กฎของอัตราและลำดับของปฏิกิริยา

กฎอัตรา (rate law) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

ลำดับของปฏิกิริยา (order of reaction) คือผลรวมของกำลังหรือเอ็กซ์โปแนนเชียลของสารที่ปรากฏในกฎของอัตรา

กฎอัตราทั่วไปอาจเขียนได้ดังสมการ 2.8

$$\text{อัตรา} = k[A]^n[B]^m \qquad (2.8)$$

ซึ่ง [A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

n และ m เป็นเลขยกกำลังตามที่สารเข้าทำปฏิกิริยาซึ่งมีค่า = 0, ½, 1, 2, 3.....

เมื่อ $n + m = 1$ เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$n + m = 2$ เรียกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง

k ในกฎอัตรา คือค่าคงที่เฉพาะของอัตราที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ค่า k จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ

2.5.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

บางครั้งอัตราของปฏิกิริยาอาจไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยาเลย กล่าวคือ อัตราของปฏิกิริยาจะคงที่เสมอ ไม่ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่ามากน้อยเพียงใด ปฏิกิริยาประเภทนี้คือ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ และกฎอัตรา แสดงดังสมการ 2.9 - 2.11

$$\text{อัตรา} = \frac{d[A]}{dt} = -k \qquad (2.9)$$

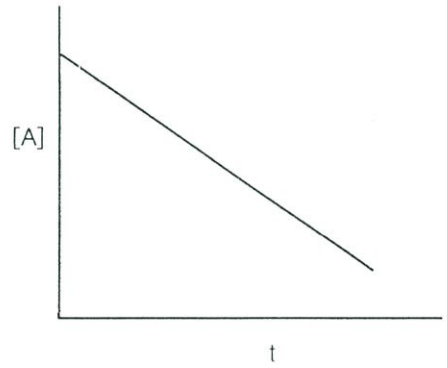
อินติเกรตสมการ (Integrate) 2.9 จะได้สมการ 2.10

$$[A]_0 - [A] = kt \qquad (2.10)$$

$$\text{ถ้า } [A] = \frac{[A]_0}{2} \quad , \quad t_{1/2} = \frac{[A]_0 / 2}{k} \qquad (2.11)$$

อัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์โดยปกติขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ เช่นในปฏิกิริยาประเภทโฟโตเคมีคัล (photochemical reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีแสงเป็นตัวเร่ง อัตราจะขึ้นกับปริมาณหรือความเข้มของแสง หรือในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ (enzyme) เป็นตัวเร่ง อัตราขึ้นกับปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้ เป็นต้น

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น ([A]) กับเวลา (t) แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์

2.5.1.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) เมื่อผลบวกของ n และ m ในกฎอัตราเท่ากับหนึ่ง ซึ่งในกรณีทั่วไป n = 1, m = 0 หรือ n = 0, m = 1 อาจเขียนกฎอัตราทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังสมการ 2.12

$$\text{อัตรา} = -k [A] \qquad (2.12)$$

ซึ่ง [A] = ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

ลำดับของปฏิกิริยาสามารถหาได้โดยทำการทดลองหลาย ๆ การทดลอง แต่ละการทดลองให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแตกต่างกันออกไป แล้วทำการวัดอัตราทำให้ทราบว่า ปฏิกิริยานั้นมีลำดับเท่าใดตามสารตั้งต้นนั้น ลำดับของปฏิกิริยาอาจหาได้โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงหนึ่งค่าแล้วติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นนี้กับเวลา ข้อมูลที่บันทึกไว้สามารถนำไปหาลำดับของปฏิกิริยาโดยวิธีการเขียนกราฟ แต่ต้องดัดแปลงสมการของกฎอัตราให้เป็นสมการที่สะดวกต่อการเขียนกราฟก่อนดังนี้

อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเขียนในรูปของการลดสารตั้งต้นกับเวลา ดังสมการ 2.13

$$\text{อัตรา} = \frac{\Delta [A]}{\Delta t} = -k [A] \qquad (2.13)$$

หรือเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.14 หรือ 2.15

$$\frac{d [A]}{dt} = -k[A] \qquad (2.14)$$

หรือ

$$\frac{d [A]}{[A]} = -kdt \qquad (2.15)$$

อินติเกรต (Integrate) สมการ 2.15 จะได้สมการ 2.16 หรือ 2.17

$$\ln [A] - \ln [A]_0 = -kt \qquad (2.16)$$

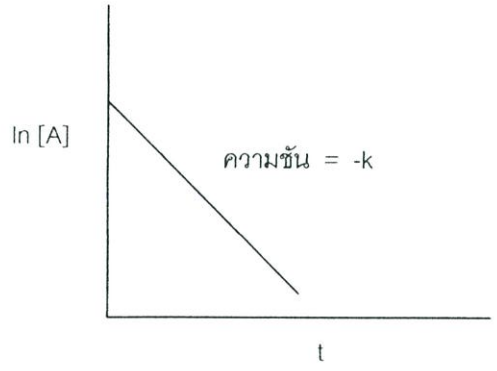
$[A]_0$ = ความเข้มข้นของ A เมื่อ t = 0

หรือ

$$2.303 \log \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \qquad (2.17)$$

ถ้าเขียนกราฟของ ln [A] หรือ log [A] กับเวลาจะได้เส้นตรงที่มีความชัน = -k (รูป 2.5) ค่า ln [A] ลดลง เมื่อเวลา t ผ่านไป และเมื่อปริมาณ [A] หมดไปครึ่งหนึ่ง เวลา t เรียกว่า

ครึ่งเวลา ($t_{1/2}$) ขึ้นอยู่กับค่า k เท่านั้น



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln [A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ครึ่งชีวิต (half life) หรือครึ่งเวลา (half time) คือ เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณสารเดิม ดังสมการ 2.18

$$[A] = \frac{[A]_0}{2} \qquad (2.18)$$

แทนค่า [A] จากสมการ 2.18 ในสมการ 2.17 จะได้สมการ 2.19 - 2.20

$$2.303 \log 2 = kt_{1/2} \qquad (2.19)$$

$$t_{1/2} = \frac{2.303 \log 2}{k} = \frac{0.693}{k} \qquad (2.20)$$

จากสมการ 2.20 จะเห็นได้ว่า $t_{1/2}$ เป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งหมายความว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงครึ่งหนึ่งในช่วงเวลาครึ่งชีวิต ไม่ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นจะเป็นเท่าใดก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปอีก $t_{1/2}$ ความเข้มข้นก็จะลดลงอีก ½ เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ อาจกล่าวได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น

2.5.1.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order reaction) คือ ปฏิกิริยาที่ผลบวกของ *m* และ *n* ในกฎอัตราเท่ากับสอง ซึ่งอาจเป็นกรณีที่ n = 1, m = 1 หรือ n = 2, m = 0 หรือ n = 0, m = 2 ดังนั้น

$$\text{อัตรา} = k[A][B] \qquad (2.21)$$

หรือ

$$\text{อัตรา} = k[A]^2 \qquad (2.22)$$

ซึ่ง [A] และ [B] เป็นความเข้มข้น (โมลต่อลิตร) ของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

k เป็นค่าคงที่เฉพาะของอัตราของปฏิกิริยาอันดับสอง

จากสมการ 2.21 และ 2.22 จะเห็นว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ A และ B สมการ 2.21 หรือความเข้มข้นของ A สมการ 2.22 เป็น 2 เท่า อัตราของปฏิกิริยาจะเพิ่มเป็น 4 เท่า ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของปฏิกิริยาอันดับสอง ดังนั้นสมมติสารที่เข้าทำปฏิกิริยามีเพียงสารเดียวคือสาร A หรือถ้ามีสองสารคือ A หรือ B แต่มี [A] = [B] วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของสาร A สมการ 2.21 หรือ 2.22 อาจเขียนในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังสมการ 2.23

$$-\frac{d[A]}{dt} = k[A]^2 \qquad (2.23)$$

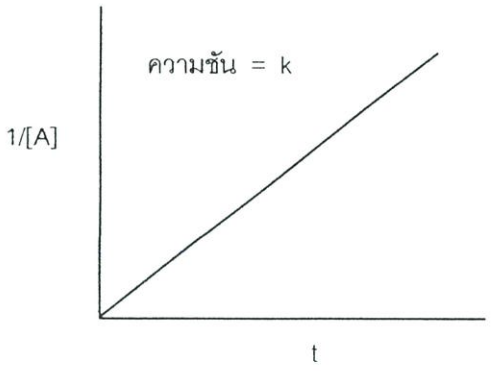
ย้ายข้าง [A] ในสมการ 2.23 จะได้สมการ 2.24

$$-\frac{d[A]}{[A]^2} = k\,dt \qquad (2.24)$$

อินติเกรต (Integrate) สมการ 2.24 จะได้สมการ 2.25

$$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt \qquad (2.25)$$

ถ้าเราเขียนกราฟของ $\frac{1}{[A]}$ กับเวลา t จะได้เส้นตรงที่มีความชัน k (รูป 2.6)



รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/[A] กับ t ของปฏิกิริยาอันดับสอง

ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันสอง สามารถหาได้ทำนองเดียวกับกรณีของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ดังสมการ 2.18

$$\text{ที่ } t_{1/2}, \quad [A] = \frac{[A]_0}{2} \qquad (2.18)$$

แทนค่าในสมการ (2.25) จะได้ สมการ (2.26)

$$\frac{1}{\frac{1}{2}[A]_0} - \frac{1}{[A]_0} = kt_{1/2} \qquad (2.26)$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{k[A]_0} \qquad (2.27)$$

จากสมการ (2.27) จะเห็นได้ว่า ครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับสอง แปรอย่างผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ($[A]_0$) ซึ่งแตกต่างกับครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งซึ่งเป็นอิสระต่อความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ปฏิกิริยาอันดับสองมีหน่วยเป็น ลิตร โมล$^{-1}$ เวลา$^{-1}$

2.5.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราของปฏิกิริยา

โดยปกติปฏิกิริยาจะมีอัตราเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิเพิ่ม โดยมีหลักคือสำหรับปฏิกิริยาทั่วไปทุกครั้งที่เพิ่มอุณหภูมิ 10 °C อัตราของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าคงที่เฉพาะของอัตราเพิ่มขึ้น ในปี ค.ศ 1889 อารีเนียส (Arrhenius) เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง k กับอุณหภูมิที่เป็นสมการเอมพิริกัล (empirical equation) ดังนี้

$$k = Ae^{Ea/RT} \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) เรียกว่าสมการของอาร์รีเนียส มี

k = ค่าคงที่เฉพาะของอัตรา

R = ค่าคงที่ของแก๊สสมมติ (ideal gas constant)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) (K = C + 273)

E_a = พลังงานกระตุ้น (activation energy)

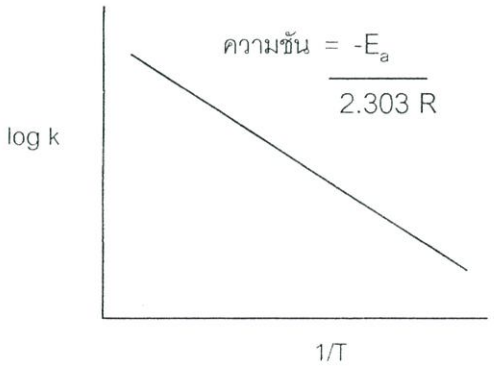
A = แฟกเตอร์การชนกันหรือความถี่ของการชนกันของอาร์รีเนียส (Arrhenius collision factor or frequency)

เขียนสมการ (2.28) ในรูปของลอคการิทึม (logarithm) ได้สมการ 2.29 - 2.30

$$\log k = \log e^{(-Ea/RT)} + \log A \quad (2.29)$$

$$\log k = \frac{-E_a}{2.303\,R}\frac{1}{T} + \log A \quad (2.30)$$

สมการ (2.30) เป็นสมการเส้นตรง เมื่อ พล็อต log k กับ 1/T จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $= \frac{-E_a}{2.303\,R}$, ส่วนตัดบนแกน y = log A ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log k กับ 1/T ของอัตราการสลายตัว

ค่า E_a เป็นค่าเฉพาะสำหรับแต่ละปฏิกิริยา มีความสำคัญและมีประโยชน์มาก เพราะบอกถึงพลังงานที่เปลี่ยนแปลงขณะที่โมเลกุลชนกัน จึงใช้ตัดสินว่าปฏิกิริยาใดจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วเพียงใด โดยปกติถ้าปฏิกิริยาหนึ่งมีค่า E_a ต่ำ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดเร็ว ในทางกลับกันถ้า E_a มีค่าสูงปฏิกิริยานั้นจะเกิดช้า (ชัยวัฒน์, 2530)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang Chuan-Bao และ Zhang Wei-Xian (1997) ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขนาดอนุภาคผงเหล็กระหว่างขนาดนาโนสเกล (nanoscale iron) และผงเหล็กทั่วไปในการกำจัดสารประกอบคลอรีน โดยใช้สารประกอบคลอรีนประเภท chlorinated aliphatic compounds 2 ชนิด ได้แก่ Trichloroethylene (TCE) และ Polychlorinated biphenyl (PCB_s) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคผงเหล็กขนาดนาโนสเกล ที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิว 33.5 ตารางเมตรต่อกรัม มีประสิทธิภาพสูงกว่าผงเหล็กทั่วไปที่มีพื้นที่ผิว 0.9 ตารางเมตรต่อกรัม ทั้งนี้เพราะอนุภาคผงเหล็กขนาดนาโนสเกลที่สังเคราะห์ขึ้นมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สูงกว่า และได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ผงเหล็กขนาดนาโนสเกลที่เคลือบผิวด้วยพัลลาเดียม (palladium) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบคลอรีนสูงกว่าผงเหล็กทั่วไป และผงเหล็กขนาดนาโนสเกลที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยพัลลาเดียม ทั้งนี้เพราะพัลลาเดียมทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสามารถเพิ่มปฏิกิริยาในการกำจัดสารประกอบคลอรีน โดยสามารถขัดขวางการรวมตัวของเหล็กออกไซด์ได้

Fennell Jay P. และ Robert Lynn A.(1998) ศึกษาปฏิกิริยาการกำจัด 1,1,1–trichloroethane (TCA) โดยใช้โลหะ (Zero-valent metal) ได้แก่ zinc, iron และ bimetallic (Ni-iron, Cu-iron) ทำการทดลองแบบแบทช์ในระบบไร้อากาศ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ zinc ในการกำจัดจะได้ 1,1-dichloroethane เป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) ส่วนเมื่อใช้ iron, nickel-iron และ copper-iron ในการกำจัด 1,1,1-trichloroethane ได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ 1,1-dichloroethane และ ethane

Cao Jiasheng และคณะ (1999) ศึกษาการกำจัดสีย้อม 5 ชนิด ได้แก่ Acid Orange II, Acid Orange IV, Acid Orange GG, Acid Red 3B และ Acid Orange I โดยการใช้ผงเหล็ก จากผลการศึกษาพบว่าความเป็นกรดของสารละลายและพื้นที่ผิวของผงเหล็กมีผลต่อการกำจัดสีย้อม เมื่อความเป็นกรดของสารละลาย และพื้นที่ผิวของผงเหล็กเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น

Deng N. และคณะ (2000) ศึกษาการกำจัดสีย้อมประเภทรีแอกทีฟ ได้แก่ C.I. Reactive Red 2, C.I. Reactive Black 8 โดยใช้วิธีแบบ UV/Fe^0 สภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของสีย้อม และปริมาณผงเหล็ก พบว่า การกำจัดสีย้อม โดยใช้ระบบ UV/Fe^0 สามารถกำจัดสีย้อมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ใช้ Fe^0 อย่างเดียว และใช้ UV อย่างเดียว ตามลำดับ

Tan Boon Hai และคณะ (2000) ศึกษาการกำจัดสีย้อมโดยใช้ magnesium chloride ($MgCl_2$) เปรียบเทียบกับปูนขาว และ Polyaluminium chloride (PAC) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนในน้ำเสียที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยศึกษาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบราคาของสารเคมีแต่ละชนิด รวมทั้งเทคนิคการตกตะกอนสำหรับการกำจัดสี ในการทดลองทำการตรวจวัดความเข้มข้นของสีย้อมจะโดย Visible Spectrophotometer สภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช, สารช่วยตกตะกอน และปริมาณของสารช่วยตกตะกอน พบว่า $MgCl_2$ มีประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 90 % ที่ พีเอช 11 ปริมาณของ $MgCl_2$ ที่เหมาะสมคือ 4 กรัม ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ $MgCl_2$ มากกว่าปูนขาวและ PAC ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า สามารถลดค่า COD ได้ 88 % และ SS ได้ 95 %

Feng Wu และคณะ (2000) ศึกษาการกำจัดสีย้อม C.I. Reactive Red 2, Orange 2 และ C.I. Reactive Black 8 โดยใช้ผงเหล็กและแสง UV เพื่อศึกษากลไกของปฏิกิริยาการกำจัดสี จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของสีหลังจากการทำปฏิกิริยาของสี C.I. Reactive Red 2 โดยใช้ GC/MS เพื่อที่จะทดสอบกลไกในการทำลายโครงสร้างของหมู่ Azo พบว่ามีหมู่เบนซีนและแนฟทาลีนแทนที่หมู่ Azo ในโครงสร้างของสีย้อม

Cheng Jiann-Long และคณะ (2001) ศึกษา pH ที่มีผลต่อปฏิกิริยาการกำจัดคลอรีนของ Trichloroethylene (TCE) โดยใช้ผงเหล็ก (Zero-valent iron) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ พีเอชที่ทำการศึกษาอยู่ระหว่าง 1.7-10 ความแตกต่างของค่าพีเอชมีผลต่อการตกตะกอนของ iron hydroxide ($Fe(OH)_2$) ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นเบส ทำให้เกิดการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของ TCE บนพื้นที่ผิวของผงเหล็ก ดังนั้นจึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง ผลการศึกษาพบว่า การกำจัด TCE ที่สภาวะที่ดีที่สุด คือ pH 4.9 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด

Mantha Ramkrishna และคณะ (2001) ศึกษาการใช้ผงเหล็ก (Zero-valent iron) ในการกำจัดไนโตรเบนซีนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบแบทช์และแบบคอลัมน์ ในการทดลองแบบแบทช์ ความเข้มข้นของไนโตรเบนซีนที่ใช้ในการศึกษาคือ 126 มิลลิกรัมต่อลิตร (1 มิลลิโมล) ทำการทดลองในสภาวะไร้อากาศ โดยใช้ Na_2SO_3 เพื่อกำจัดออกซิเจน และมี $CoCl_2.6H_2O$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาการดูดซับของอะนิลีน (aniline) บนพื้นผิวของผงเหล็ก ซึ่งอธิบายโดย Langmuir Isotherm ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า

ผงเหล็ก 200 กรัม (1-2 มิลลิเมตร) โดย 600 pore volume สามารถเปลี่ยน 1 มิลลิโมล ของไนโตรเบนซีน ได้ผลิตภัณฑ์คือ อะนิลีน โดยมีไนโตรเบนซีนและฟีนิลไฮดรอกซีลามีนเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) จากการทดลองจะเกิดการอุดตันของคอลัมน์ขึ้นเนื่องมาจากการกัดกร่อน และมีตะกอนสีเขียว-ดำเกิดขึ้น

บุษรา ประชุมญาติ (2545) ศึกษาการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์(sodium borohydride; $NaBH_4$) ในรูปของสารละลายที่เป็นด่าง ในการกำจัดสีย้อม จากการทดลองใช้ $NaBH_4$ ความเข้มข้น 1.2 % ใน 4 % ของ NaOH เพื่อกำจัดสีรีแอกทีฟที่มีหมู่อะโซ 3 ชนิด ได้แก่ C.I. Reactive Black 5, C.I. Reactive Red 180 และ C.I. Reactive Blue 171 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 70, 90, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ระยะเวลากวนเร็ว และปริมาณของ $NaBH_4$ เป็น 1, 3, 5 และ 7 เท่าของค่าสตอยชิโอเมตริก (stoichiometric) จากผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลากวนเร็ว สำหรับสี C.I. Reactive Black 5 คือ 30 นาที, สำหรับสี C.I. Reactive Red 180 คือ 10 นาที และ สำหรับสี C.I. Reactive Blue 171 คือ 25 นาที พีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดคือ พีเอช 10 และปริมาณ $NaBH_4$ เป็น 7 เท่าของสตอยชิโอเมตริก โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี C.I. Reactive Black 5, C.I. Reactive Red 180 และ C.I. Reactive Blue 171 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 94.08 %, 93.85 % และ 99.03 % ตามลำดับ

Tezcanli-Guyer G. และ Ince N.H. (2003) ศึกษาการกำจัดสีย้อม 4 สี ได้แก่ C.I. Reactive Red 141, C.I. Reactive Black 5, C.I. Basic Brown 4 และ C.I. Basic Blue 3 โดยใช้รังสีอัลตราโซนิค 520 kHz จากการศึกษาพบว่า อัตราการกำจัดสีย้อมเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาการกำจัดนี้จะเกิดที่หมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่โครโมฟอร์ของโครงสร้างสีย้อม ซึ่งจะทำลายพันธะของ N=N จากนั้นวิเคราะห์ความเป็นพิษของสารละลายสีย้อมพบว่า สี Reactive ไม่มีความเป็นพิษ ส่วนสี Basic จากการทดสอบพบว่ามีความเป็นพิษ ที่สำคัญระดับความเป็นพิษของสารละลายสีย้อมจะลดลงเมื่อมีการกำจัดสี และมีการทำลายวงเบนซีน

Muruganandham M. และ Swaminathan M. (2004) ศึกษาการใช้ photooxidation ในการกำจัดสีย้อม Reactive Orange 4 โดยการใช้ H_2O_2/UV-A ซึ่งทำการศึกษาผลของพีเอช ปริมาณของ H_2O_2 และกำลังของแสง UV พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมาก จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง อัตราการกำจัดสีย้อมเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order reaction) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีแบบ solar-H_2O_2 กับ UV-H_2O_2 พบว่า สิ่งที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมคือ สารเคมี เช่น NaOH, NaCl และ Na_2SO_3 ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะไปยับยั้งในการกำจัดสีย้อม

Netpradit Suchapa และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสีย้อม C.I. Reactive Red 2, C.I. Reactive Red 120 และ C.I. Reactive Red 141 โดยใช้ metal hydroxide sludge ซึ่งทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การดูดซับของสี C.I. Reactive Red 2 จะลดลง แต่สำหรับสี C.I. Reactive Red 120 และ C.I. Reactive Red 141 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การดูดซับจะเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองพบว่าสี C.I. Reactive Red 2 เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ส่วนสี C.I. Reactive Red 120 และ C.I. Reactive Red 141 เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ค่าพลังงาน Enthalpy ของการดูดซับสำหรับ C.I. Reactive Red 2 , C.I. Reactive Red 120 และ C.I. Reactive Red 141 เป็น -5.56, 2.77 และ 6.41 kJ/mol ตามลำดับ การดูดซับสำหรับ C.I. Reactive Red 2 เป็นแบบทางกายภาพ ส่วน Reactive Red 120 และ C.I. Reactive Red 141 เป็นการดูดซับทางเคมี สภาวะที่เหมาะสมของพีเอช คือ 8.6±0.3 เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง และเมื่อศึกษาปริมาณของ sludge จะพบว่าสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อม จะใช้ปริมาณ sludge มากกว่า สีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้น ส่วนน้ำ Lechates ที่ออกมาจาก metal hydroxide sludge มี โลหะหนักปะปนออกมาปริมาณน้อยมาก

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) Jenway Co., Ltd รุ่น 6405
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) Shimudzu Co., Ltd รุ่น AA-680
3. เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซ็นต์ (X-ray Fluorescence) Bruker A.G. Co., Ltd รุ่น SRS 3400
4. เครื่องออโตซอร์บ (Autosorb) Quanta Chrome Co., Ltd
5. เครื่องเอ็กเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) Bruker A.G. Co., Ltd รุ่น D8 Advance
6. เครื่องสแกนนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope) Leo Co., Ltd รุ่น 1455VP และ เอนเนอจีดิสเพอร์ซีฟสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive Spectrometer) EDAX Co., Ltd รุ่น 1455VP
7. เครื่องคัดขนาด (Sieve) Laboratory Test Sieve Co., Ltd
8. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ Sanyo
9. เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) Denver instrument Co., Ltd รุ่น Model 215
10. ฮีทติ้งบล๊อค (Heating block)
11. บุชเนอร์ (Buchner funnel)
12. ขวดซักชัน (Suction flask)
13. เครื่องกรองสุญญากาศ (Suction pump)
14. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่ 20 ±1 °C
15. เครื่องเติมอากาศ
16. ตู้บ่ม (Incubator) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ 20 ±1 °C และป้องกันไม่ให้มีแสงผ่านเข้าตู้บ่ม
17. ขวด BOD ขนาดมาตรฐาน 300 มิลลิลิตร
18. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ขนาด 16 ×100 มิลลิเมตร
19. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

20. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Single pan balance)
21. ปิเปต (Pipette) ขนาด 1, 2, 5, 10 และ 50 มิลลิลิตร
22. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10, 25,100, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
23. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Wash bottle)
24. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 100, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
25. กระบอกตวง (Graduated cylinder) ขนาด 10, 50, 100 และ 1000 มิลลิลิตร
26. ช้อนตักสาร (Spatula)
27. กระจกนาฬิกา (Watch glass)
28. หลอดหยด (Dropper)
29. แท่งแก้วคน (Stirring rod)
31. คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร

3.1.2 สารเคมี

1. ผงสีรีแอกทีฟ (Reactive Blue 5) เกรดวิเคราะห์ Sigma Co., Ltd
2. ผงสีรีแอกทีฟ สีน้ำเงิน สีดำ สีแดง และสีเหลือง Sumitomo Chemicals (Japan) Co., Ltd
3. เศษผงเหล็กจากโรงงานกลึง
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ Lab Scan Co., Ltd
6. อะซิโตน (Acetone) เกรดวิเคราะห์ Lab Scan Co., Ltd
7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
8. แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas) บริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
9. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) Carlo Erba Co., Ltd
10. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd
11. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ BHD Laboratory Supplies Co., Ltd
12. ปรอทซัลเฟต ($HgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd
13. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) เกรดวิเคราะห์ BHD Laboratory Supplies
14. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd
15. เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd
16. แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co., Ltd

3.2 การดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมเศษผงเหล็ก

3.2.1.1 คัดขนาดเศษผงเหล็กขนาด 12-35 เมช, 35-50 เมช, 50-80 เมช , 80- 100 เมช และ12-100 เมช จากนั้นนำไปหาเปอร์เซนต์ของเศษผงเหล็กแต่ละขนาดจากเศษผงเหล็กทั้งหมดที่นำมาจากโรงกลึง โดย

1. นำเศษผงเหล็กจากโรงกลึงน้ำหนัก 1 กิโลกรัม นำไปคัดแยกขนาดต่าง ๆ โดยใช้ตะแกรงร่อน
2. ชั่งน้ำหนักของเศษผงเหล็กแต่ละขนาด แล้วเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์

3.2.1.2 ชั่งเศษผงเหล็กแต่ละขนาดจำนวน 100 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.1.3 ล้างด้วย 3% HCl ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

3.2.1.4 เขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที

3.2.1.5 ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนที่กำจัดแก๊สออกซิเจนออก (โดยการเติมแก๊สไนโตรเจน) จำนวน 3 ครั้ง

3.2.1.6 ล้างด้วยอะซิโตน 1 ครั้ง

3.2.1.7 ทำให้แห้งด้วยการเป่าแห้งโดยใช้แก๊สไนโตรเจน

3.2.1.8 เก็บเศษผงเหล็กที่ผ่านการล้างและทำให้แห้งแล้วในขวดสีชา เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก

ศึกษาคุณสมบัติของเศษผงเหล็ก โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของเศษผงเหล็ก

พารามิเตอร์	**เครื่องมือในการวิเคราะห์**
องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็ก	X-ray Fluorescence Spectrometer
ลักษณะของอนุภาค	Scanning Electron Microscope
องค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ของเศษผงเหล็ก	Energy Dispersive Spectrometer
พื้นที่ผิว	Autosorb
โครงสร้างผลึก	X-ray Diffraction Spectrometer

3.2.3 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อม Reactive

3.2.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

1. สี Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 20, 30, 60, 90 และ 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนด้วย UV-Vis วัดที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (โดยการสแกนหา λ_{max})

3.2.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue

1. สี Reactive Blue ความเข้มข้น 2, 10, 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนด้วย UV-Vis วัดที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (โดยการสแกนหา λ_{max})

3.2.3.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Black

1. สี Reactive Black ความเข้มข้น 2, 10, 20, 40 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนด้วย UV-Vis วัดที่ความยาวคลื่น 570 นาโนเมตร (โดยการสแกนหา λ_{max})

3.2.3.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Red

1. สี Reactive Red ความเข้มข้น 5, 15, 25, 35 และ 45 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนด้วย UV-Vis วัดที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร (โดยการสแกนหา λ_{max})

3.2.3.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Yellow

1. สี Reactive Yellow ความเข้มข้น 5, 20, 40, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนด้วย UV-Vis วัดที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร โดย (โดยการสแกนหา λ_{max})

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของแต่ละสีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานไม่เท่ากัน เนื่องจากความสามารถในการดูดกลืนแสงของสีต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน

3.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

3.2.4.1 การศึกษาผลของพีเอช

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอช เป็น 3, 5, 7, 9 และ 12 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.2 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60 และ 90 นาที
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.3 การศึกษาผลของความเร็วรอบในการเขย่า

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็ว 60, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.4 การศึกษาผลของขนาดของเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็ก 1 กรัม ขนาด 12-35 เมช, 35-50 เมช, 50-80 เมช , 80-100 เมช และ 12-100 เมช ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 ตามเวลาที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อม

1. ชั่งเศษผงเหล็ก 1 กรัม โดยใช้ขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 ตามเวลาที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.6 การศึกษาผลของปริมาณของเศษผงเหล็ก

1. ชั่งเศษผงเหล็ก 0.1, 0.3, 0.5, 1 และ 3 กรัม โดยใช้ขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตรในแต่ละขวด
2. เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (จะได้ปริมาณของเศษผงเหล็กเป็น 2 กรัมต่อลิตร, 6 กรัมต่อลิตร, 10 กรัมต่อลิตร, 20 กรัมต่อลิตร และ 60 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ)
3. ปรับพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 และเวลาที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 แต่ใช้สี Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow แทน

3.2.4.7 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

1. วิเคราะห์หาค่า BOD, COD, SS, พีเอช และโลหะหนักของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการกำจัดสีย้อมโดยใช้เศษผงเหล็กภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดลองโดยค่า BOD, COD, SS, พีเอช และโลหะหนัก วิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐาน
2. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.5 การศึกษาจลนศาสตร์เคมี

ศึกษาจลนศาสตร์เคมี โดยใช้สีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์

3.2.5.1 ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

3.2.5.2 เติมสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

3.2.5.3 ปรับพีเอชเป็นพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH

3.2.5.4 เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 เป็นเวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

3.2.5.5 ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

3.2.5.6 กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

3.2.5.7 นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}

3.2.5.8 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.6 การศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส

ศึกษาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส โดยใช้สีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบทช์

3.2.6.1 ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร

3.2.6.2 เติมความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 35, 40, 45 และ 50 ^{0}C

3.2.6.3 ปรับพีเอชเป็นพีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH

3.2.6.4 เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 เป็นเวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

3.2.6.5 ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

3.2.6.6 กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

3.2.6.7 นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}

3.2.6.8 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบคอลัมน์

3.2.7.1 ศึกษาอัตราการไหลที่เหมาะสม

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 10 กรัม ใส่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
2. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 (ที่ปรับพีเอชให้ได้พีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ขวดน้ำเกลือ
3. ปล่อยสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 จากขวดน้ำเกลือผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเศษผงเหล็ก
4. วัดอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 โดยอัตราการไหลเข้าคอลัมน์ เท่ากับอัตราการไหลออกจากคอลัมน์

3.2.7.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อม Reactive Blue 5

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 10 กรัมใส่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
2. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100, 300, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้ได้พีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH ใส่ในขวดน้ำเกลือ
3. ปล่อยสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 จากขวดน้ำเกลือผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเศษผงเหล็ก
4. ปรับอัตราการไหลที่เหมาะสมของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.7.1
5. เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ หลังจากผ่านคอลัมน์ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที

6. กรองสารละลายสีย้อมที่ไหลผ่านคอลัมน์จากการทดลองข้อ 5 ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. วิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนัก ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการกำจัดสีย้อมภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง

3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

3.2.8.1 การทดลองแบบแบทช์

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
3. ปรับพีเอชให้ได้พีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. เขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.3 เป็นเวลา ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.2
5. ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
6. กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. วิเคราะห์หาค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนักของน้ำทิ้ง โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง
9. ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.2.8.2 การทดลองแบบคอลัมน์

1. ชั่งเศษผงเหล็กขนาดที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.4 จำนวน 10 กรัมใส่ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร
2. นำน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม ปรับพีเอชให้ได้พีเอช ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.4.1 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH ใส่ในขวดน้ำเกลือ
3. ปล่อยน้ำทิ้งจากขวดน้ำเกลือผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเศษผงเหล็ก
4. ปรับอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ไดจากการทดลองข้อ 3.2.7.1
5. เก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานฟอก หลังจากผ่านคอลัมน์ ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที
6. กรองน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์จากข้อ 5 ด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42

7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis ที่ λ_{max}
8. วิเคราะห์หาค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนักของน้ำทิ้ง โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง

3.2.9 การ Regenerate ของเศษผงเหล็ก

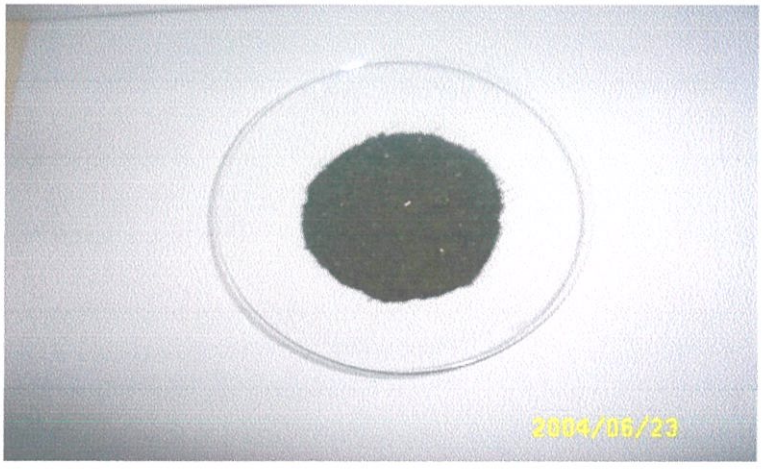
3.2.9.1 การ Regenerate ของเศษผงเหล็กโดยใช้สีย้อม Reactive Blue 5

1. นำคอลัมน์จากการทดลองข้อ 3.2.7.2 เมื่อหมดประสิทธิภาพการกำจัดแล้ว ล้างด้วย 3% HCl เป็นเวลา 30 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง และล้างด้วยอะซิโตน 1 ครั้ง (ที่อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที)
2. นำสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดน้ำเกลือ
3. ปล่อยสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5 จากขวดน้ำเกลือผ่านคอลัมน์
4. ปรับอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2.7.1
5. เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที
6. กรองสารละลายสีย้อมที่ไหลผ่านคอลัมน์จากข้อ 5 ผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
7. นำส่วนใสมาวิเคราะห์ UV-Vis λ_{max}
8. วิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนักของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการกำจัดสีย้อมโดยการ Regenerate ที่ได้จากการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการทดลอง

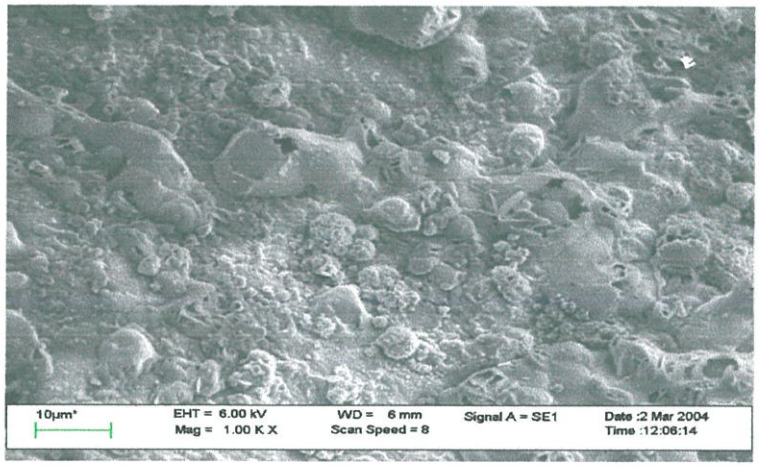
บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเศษผงเหล็ก

จากการทดลองใช้เศษผงเหล็กจากโรงกลึง (รูปที่ 4.1) เป็นตัวรีดิวซ์ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ศึกษาโดยการวัดพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Autosorb จากผลการทดลองพบว่าเศษผงเหล็กที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูงกว่าขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่วนลักษณะของอนุภาคเศษผงเหล็กวัดโดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่าพื้นผิวของเศษผงเหล็กมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุน (รูปที่ 4.2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็กโดยใช้ XRF พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น Fe_2O_3 รองลงมา Cr_2O_3 และ SiO_2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าเศษผงเหล็กมีการจัดเรียงตัวเป็นอสันฐาน (amorphous) คือมีการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษผงเหล็ก



รูปที่ 4.2 ลักษณะของอนุภาคของเศษผงเหล็กด้วย SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า

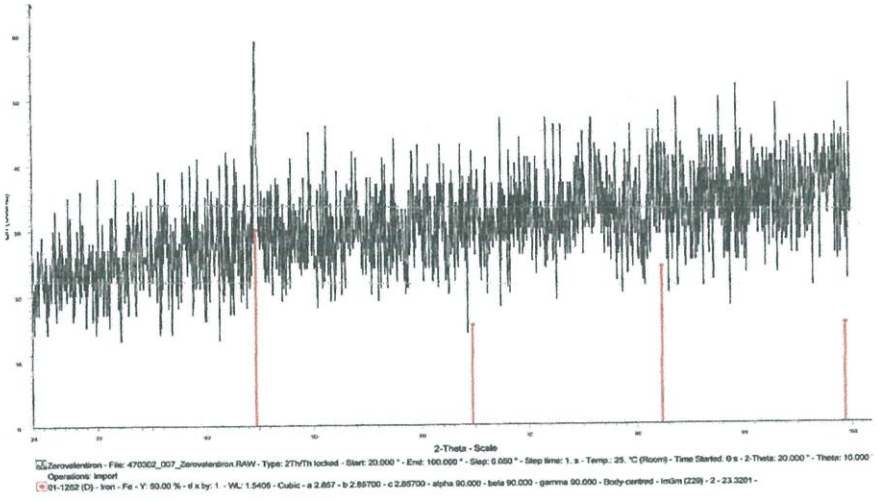
ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวของเศษผงเหล็ก

ขนาดของเศษผงเหล็ก	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)
เศษผงเหล็กขนาด 12-35 เมช	1.85
เศษผงเหล็กขนาด 35-50 เมช	2.05
เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช	3.02
เศษผงเหล็กขนาด 80-100 เมช	5.28
เศษผงเหล็กขนาด 12-100 เมช	2.31

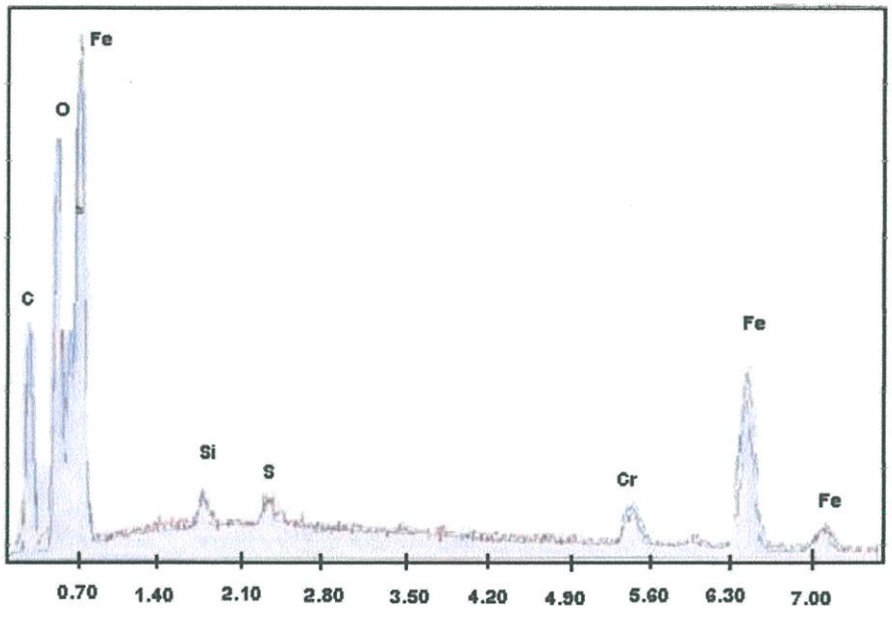
* เศษผงเหล็กขนาด 12-100 เมช ประกอบด้วย : เศษผงเหล็กขนาด 12-35 เมช 33%, 35-50 เมช 33%, 50-80 เมช 33% และ 80-100 เมช 1%

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษผงเหล็ก

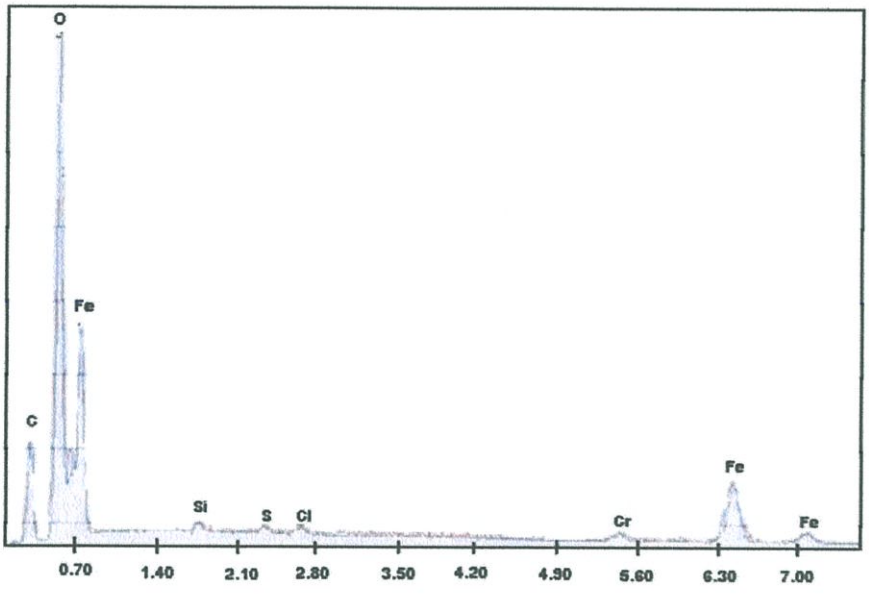
องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซนต์
Fe_2O_3	90.70
Cr_2O_3	5.41
SiO_2	1.16
MoO_3	0.86
MnO	0.55
Al_2O_3	0.42
อื่น ๆ	0.91



รูปที่ 4.3 โครงสร้างผลึกของเศษผงเหล็กด้วย XRD



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของเศษผงเหล็กก่อนการทดลองด้วย EDS



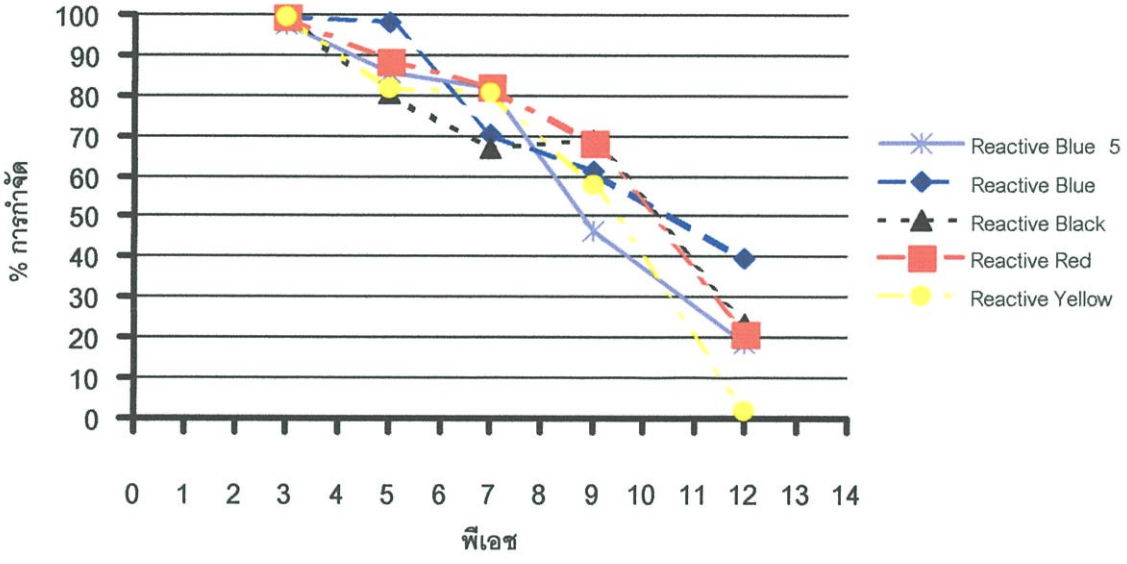
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเศษผงเหล็กหลังการทดลองด้วย EDS

จากรูป 4.4 แสดงโครงสร้างของเศษผงเหล็กก่อนการทดลองด้วย EDS พบว่า องค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในเศษผงเหล็กส่วนใหญ่เป็นเหล็ก รองลงมาเป็นออกซิเจน คาร์บอน โครเมียม ซิลิกอน และ ซัลเฟอร์ ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเศษผงเหล็กหลังการทดลอง (รูปที่ 4.5) พบว่า ปริมาณของเหล็ก คาร์บอน โครเมียม ซิลิกอน และซัลเฟอร์ ลดลงเนื่องจากการทำปฏิกิริยาในระหว่างการกำจัดสีย้อม ส่วนปริมาณของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษผงเหล็กหลังการทดลองเกิดเป็น $Fe(OH)_2$ ทำให้มีออกซิเจนหลังการทดลองเพิ่มขึ้น สำหรับคาร์บอนที่ลดลงเนื่องจากสีย้อมบางส่วนถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของเศษผงเหล็ก และคลอรีนที่เกิดขึ้นหลังการทดลองเกิดจากการถูกดูดซับของสีย้อมบนพื้นผิวของเศษผงเหล็ก เนื่องจากคลอรีนเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้างของสีย้อม (รูปที่ 2.1)

4.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี โดยการวัดค่าดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis Spectrophotometer ซึ่งคำนวณ % การกำจัดโดยใช้กราฟมาตรฐานในภาคผนวก ก

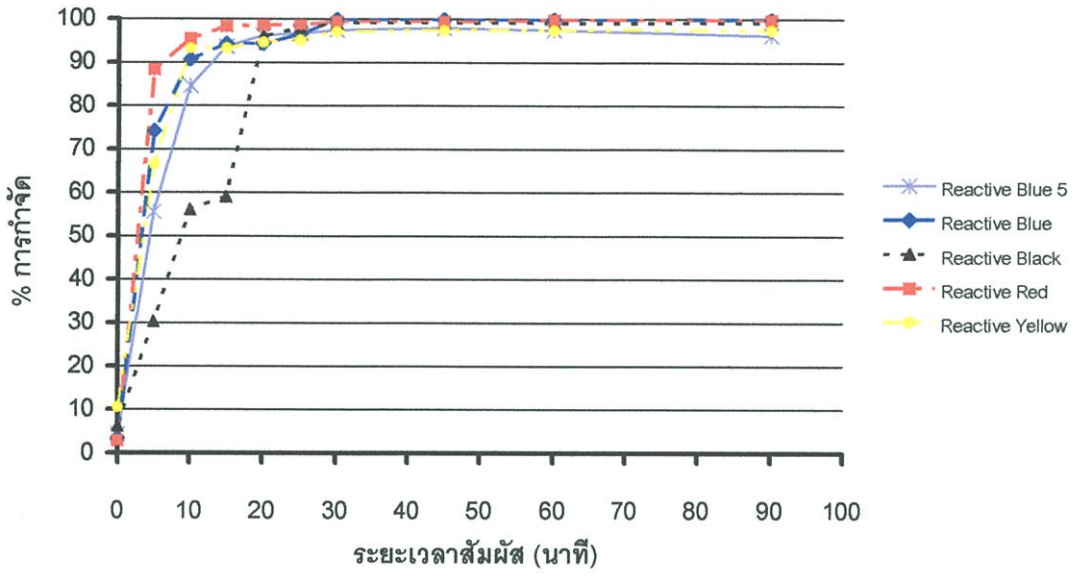
4.2.1 พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่พีเอชต่าง ๆ

รูป 4.6 (รายละเอียดดูตาราง ข.1.1-ข.1.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow ที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ ข.1ในภาคผนวก ข) เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการตกตะกอนของ iron hydroxide ($Fe(OH)_2$) ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นเบส ดังปฏิกิริยา 2.1 ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมบนพื้นผิวของเศษผงเหล็ก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง จะเห็นได้ว่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี คือ พีเอช 3 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng *et al.* (2001) เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Red, Reactive Black และ Reactive Yellow มากกว่า 98%

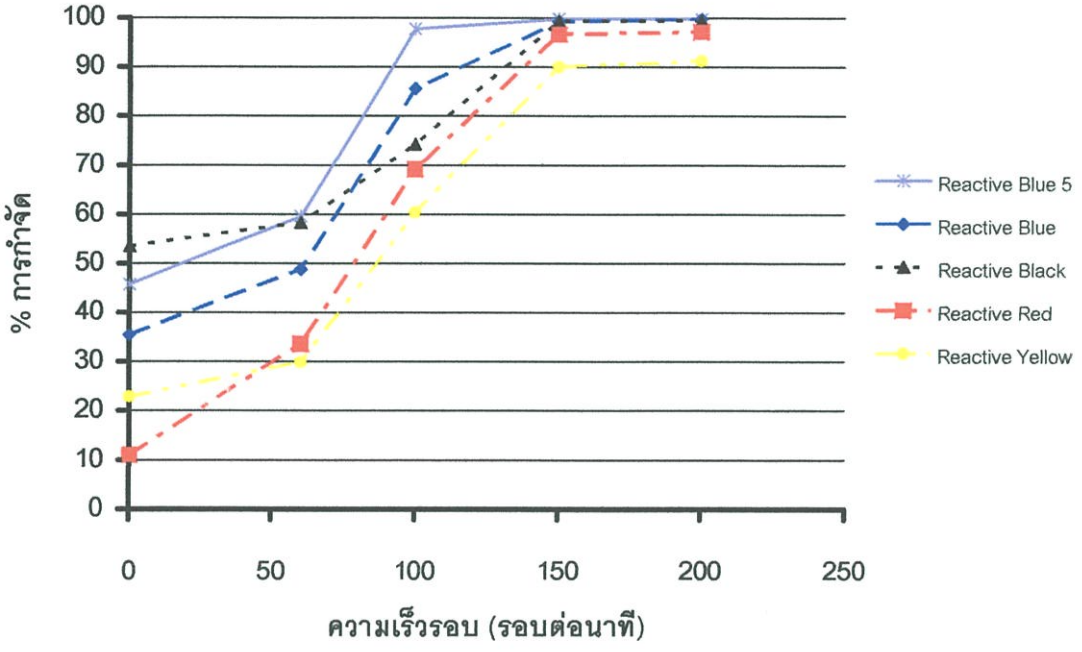
4.2.2 ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ

รูป 4.7 (รายละเอียดดูตาราง ข.2.1-ข.2.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow ที่ระยะเวลาสัมผัส 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60 และ 90 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ดูตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Deng *et al.* (2000) เนื่องจากเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมได้มากขึ้น จากรูป 4.7 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี คือ 30 นาที หลังจาก 30 นาที เปอร์เซ็นต์การกำจัดเริ่มคงที่ เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Red, Reactive Black และ Reactive Yellow ที่เวลา 30 นาที สามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 97% ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมโดยใช้เศษผงเหล็กจะเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นข้อดีในการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีนี้

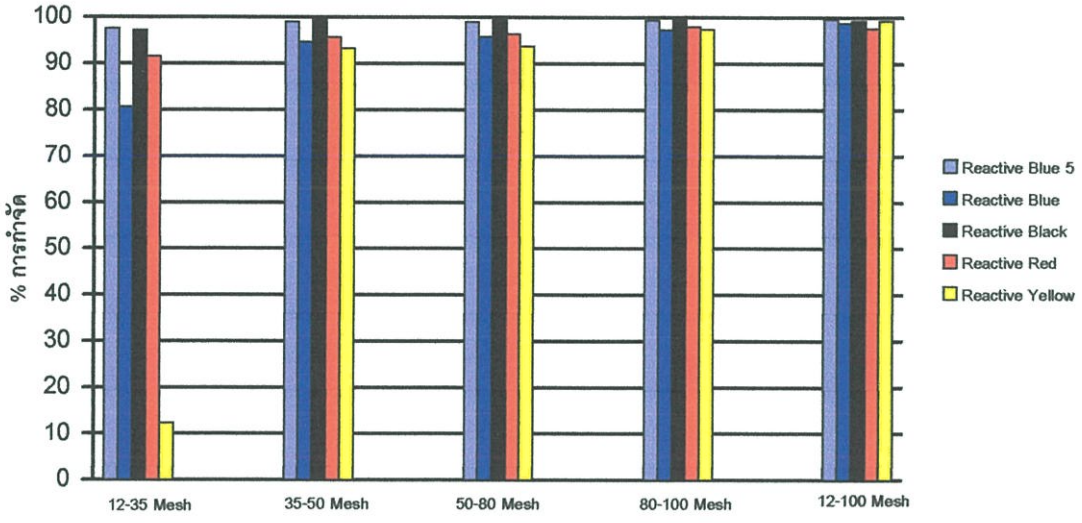
4.2.3 ความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

รูป 4.8 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.3.1- ข.3.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow ที่ความเร็วรอบในการเขย่า 0, 60, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ ข.3 ในภาคผนวก ข) เนื่องจากความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของเศษผงเหล็กได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมได้ดีขึ้น จากรูป 4.8 จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี คือ ที่ 150 รอบต่อนาที สามารถการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black และ Reactive Red มากกว่า 98% ส่วนการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow สามารถกำจัดได้มากกว่า 90%

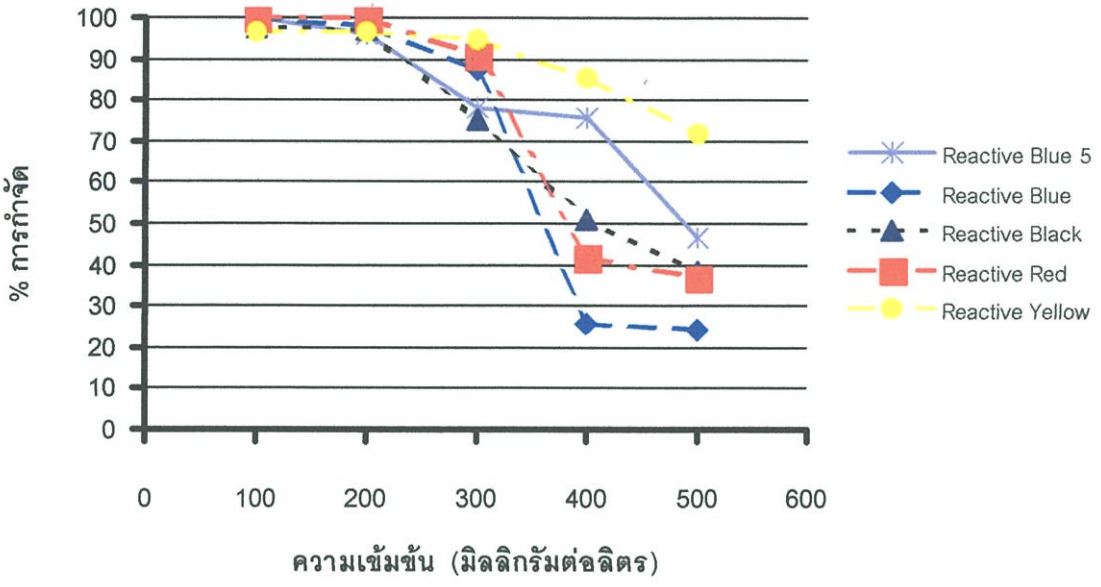
4.2.4 ขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ

รูป 4.9 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.4.1-ข.4.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow ที่เศษผงเหล็กขนาด 12-35 เมช, 35-50 เมช, 50-80 เมช, 80-100 เมช และ 12-100 เมช พบว่า การกำจัดสีย้อมของผงเหล็กขนาด 12-100 เมช ซึ่งเป็นเศษผงเหล็กจากโรงกลึงที่ไม่ต้องคัดแยกขนาด มีประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ ข.4 ในภาคผนวก ข) โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัด สีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Red, Reactive Black และ Reactive Yellow มากกว่า 98% อย่างไรก็ตามการกำจัดสีเหลือง ที่เศษผงเหล็กขนาด 12-35 เมช พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างจากสีอื่น คือมีเปอร์เซนต์การกำจัดน้อยกว่า 15% ในขณะที่สีอื่น ๆ ที่เศษผงเหล็กขนาดเดียวกันมีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 80% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะชนิดของสีอาจจะมีผลต่อการกำจัด เนื่องจากกลไกการกำจัดสีย้อมส่วนใหญ่เป็นการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มากกว่าการดูดซับ ขนาดจึงไม่มีผลต่อการกำจัดมากนัก

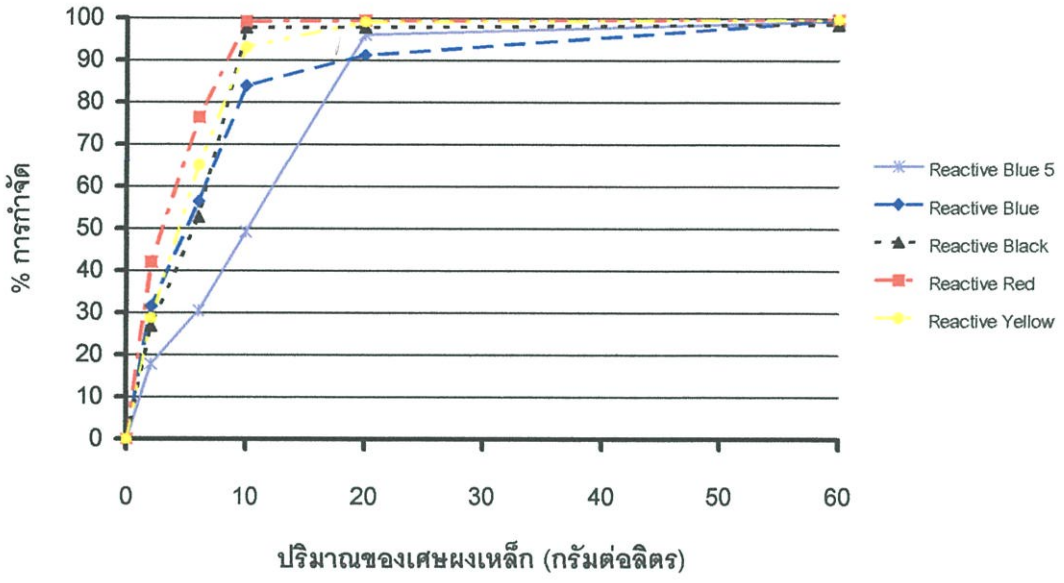
4.2.5 ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่ความเข้มข้นของสีย้อมต่าง ๆ

รูป 4.10 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.5.1-ข.5.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ ช.5 ในภาคผนวก ช) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Deng *et al.* (2000) เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กเป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก จึงทำให้เกิดการขัดขวางกันของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็ก การกำจัดสีย้อมจึงมีค่าลดลง จากรูป 4.10 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Red, Reactive Black และ Reactive Yellow มากกว่า 98%

4.2.6 ปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ที่เศษผงเหล็กปริมาณต่าง ๆ

รูป 4.11 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.6.1-ข.6.5 ในภาคผนวก ข) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow ที่ปริมาณของเศษผงเหล็ก 2 กรัมต่อลิตร, 6 กรัมต่อลิตร, 10 กรัมต่อลิตร, 20 กรัมต่อลิตร และ 60 กรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ ช.6 ในภาคผนวก ช) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Deng *et al.* (2000) เนื่องจากปริมาณของเศษผงเหล็กมากขึ้น มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของเศษผงเหล็กมากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อมได้ดีขึ้น จากรูป 4.11 จะเห็นได้ว่าปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี คือ 20 กรัมต่อลิตร มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow มากกว่า 97% ส่วนเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue มากกว่า 90%

4.3 คุณลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็ก

วิเคราะห์ BOD, COD, SS, พีเอช และโลหะหนัก ก่อนและหลังบำบัดด้วยเศษผงเหล็กในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue และ Reactive Black ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

พารา มิเตอร์	Reactive Blue 5			Reactive Blue			Reactive Black		
	ก่อน	หลัง	% กำจัด	ก่อน	หลัง	% กำจัด	ก่อน	หลัง	% กำจัด
BOD	5.49 ±0.06	1.71 ±0.49	68.85	5.28 ±0.54	0.31 ±0.12	94.13	6.68 ±0.17	2.33 ±0.13	65.12
COD	106.67 ±0.00	33.77 ±3.08	68.34	97.78 ±3.08	42.67 ±0.00	56.36	124.44 ±3.08	40.89 ±3.08	67.14
SS	3.57 ±0.19	0.85 ±0.41	76.19	6.11 ±0.64	1.49 ±0.72	75.61	6.37 ±0.39	2.84 ±0.58	55.42
พีเอช	3.03 ±0.03	6.00 ±0.06	-	3.00 ±0.00	6.08 ±0.11	-	3.03 ±0.01	6.04 ±0.01	-

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Red และ Reactive Yellow ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

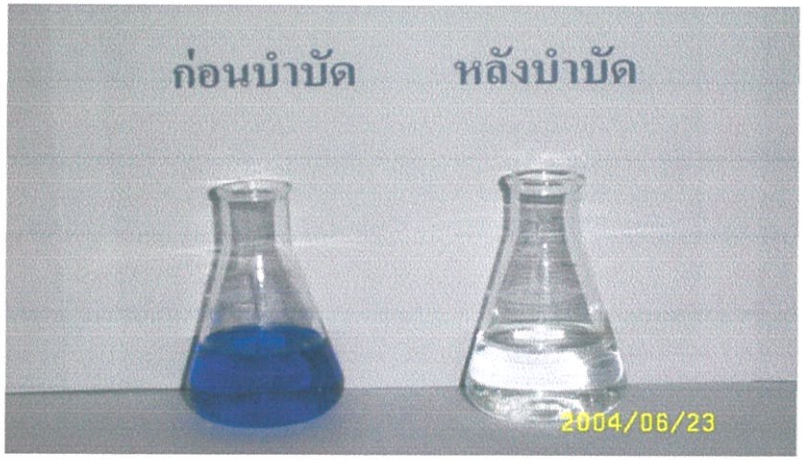
พารามิเตอร์	Reactive Red			Reactive Yellow		
	ก่อน	หลัง	% กำจัด	ก่อน	หลัง	% กำจัด
BOD	5.24±0.30	0.63±0.09	87.98	5.13±0.18	2.56±0.16	50.09
COD	113.78±3.08	35.56±3.08	68.75	131.56±3.08	40.89±3.08	68.92
SS	5.43±0.27	1.55±0.23	71.45	4.36±0.29	0.83±0.10	81.00
พีเอช	3.02±0.02	5.93±0.20	-	3.01±0.01	6.04±0.09	-

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ก่อนและหลังการทดลองภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

โลหะหนัก	Reactive Blue 5		Reactive Blue		Reactive Black		Reactive Red		Reactive Yellow	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Fe	0.19 ±0.06	15.18 ±0.39	0.79 ±0.36	17.61 ±0.55	0.13 ±0.04	15.83 ±0.28	0.18 ±0.05	11.46 ±3.39	0.56 ±0.70	26.17 ±1.57
Cr	0.27 ±0.05	0.32 ±0.06	0.03 ±0.00	0.05 ±0.00	0.03 ±0.00	0.04 ±0.01	0.02 ±0.00	0.03 ±0.00	0.02 ±0.00	0.02 ±0.01
Mn	0.04 ±0.00	0.26 ±0.00	0.07 ±0.04	0.27 ±0.00	0.04 ±0.00	0.33 ±0.00	0.19 ±0.22	0.39 ±0.11	0.04 ±0.00	0.43 ±0.00

ตารางที่ 4.3–4.5 (ดูรายละเอียดในตาราง ค.1.1-ค.4.5 ภาคผนวก ค) พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow โดยใช้เศษผงเหล็ก สามารถลดค่า BOD, COD, SS ได้ และค่า พีเอช หลังการบำบัดมีค่าประมาณ 6 ทำให้สามารถปล่อยน้ำทิ้งหลังการบำบัดสู่แหล่งน้ำโดยตรง ปริมาณเหล็กหลังผ่านการบำบัดเพิ่มขึ้น (วัดในรูป Total Fe) อย่างไรก็ตาม เหล็กเป็นธาตุที่พบมากในธรรมชาติ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนโลหะหนัก Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้

รูปที่ 4.12-4.16 แสดงผลการบำบัดสีย้อม Reactive ต่าง ๆ ด้วยเศษผงเหล็ก และรูปที่ 4.17-4.21 แสดงผลสเปกตรัมของสีย้อม Reactive ต่าง ๆ ก่อนและหลังการบำบัดด้วยเศษผงเหล็ก พบว่า เศษผงเหล็กสามารถกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สีได้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดจะใส สเปกตรัมที่แสดงการดูดกลืนแสงของสี จะลดลง



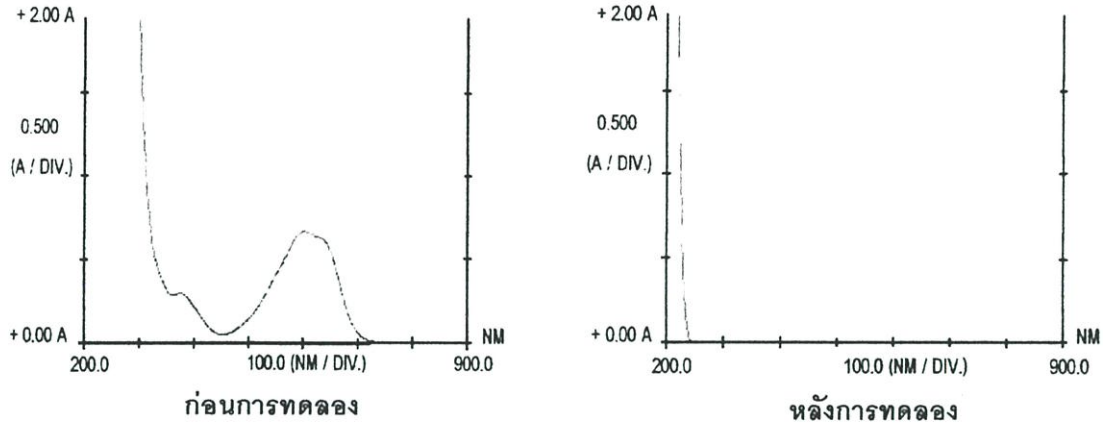
รูปที่ 4.12 การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์

รูปที่ 4.13 การกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์

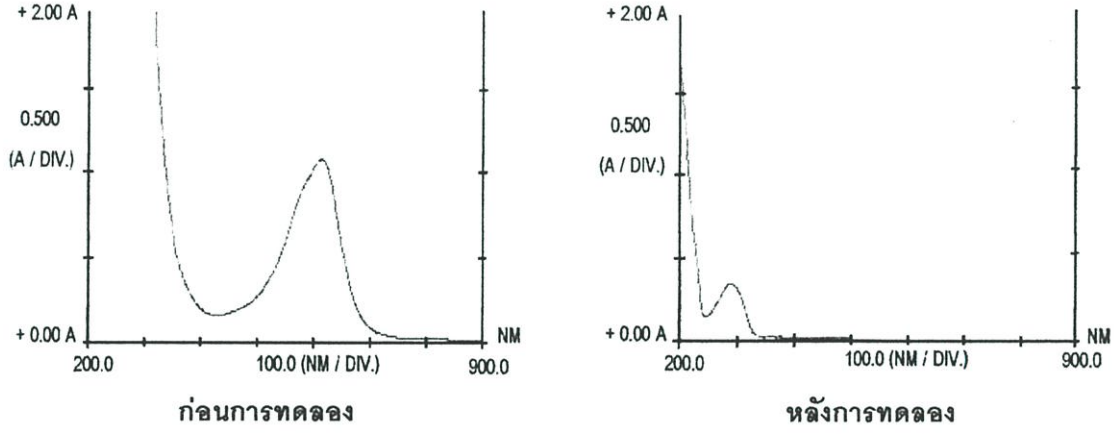
รูปที่ 4.14 การกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์

รูปที่ 4.15 การกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์

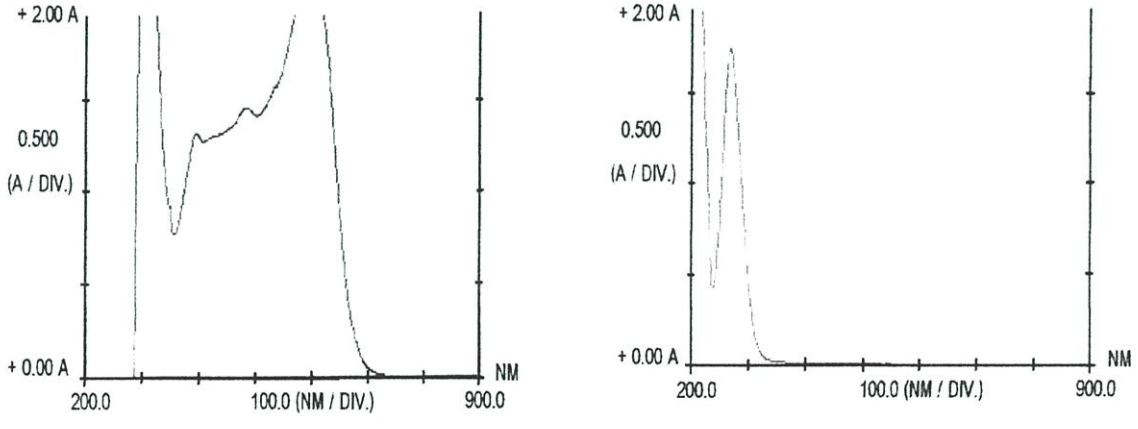
รูปที่ 4.16 การกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์



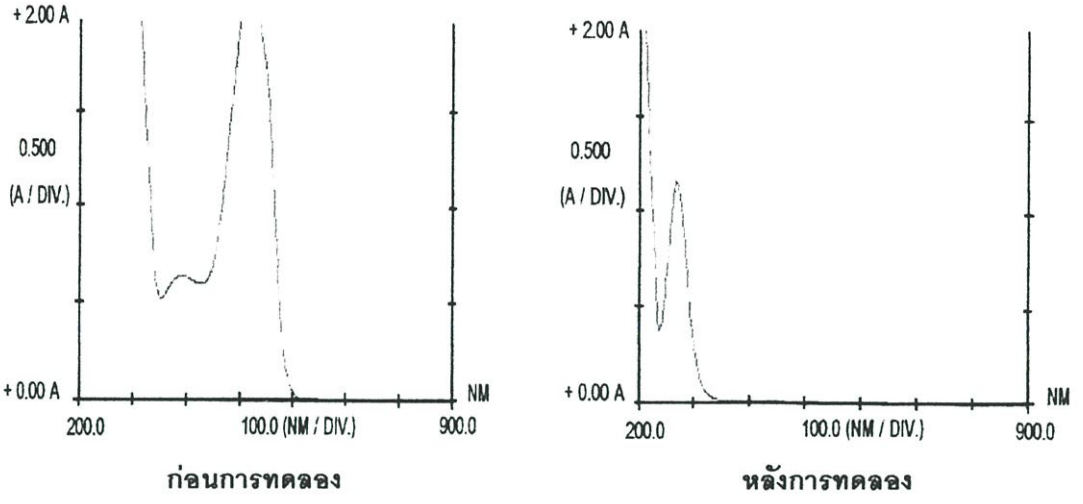
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์



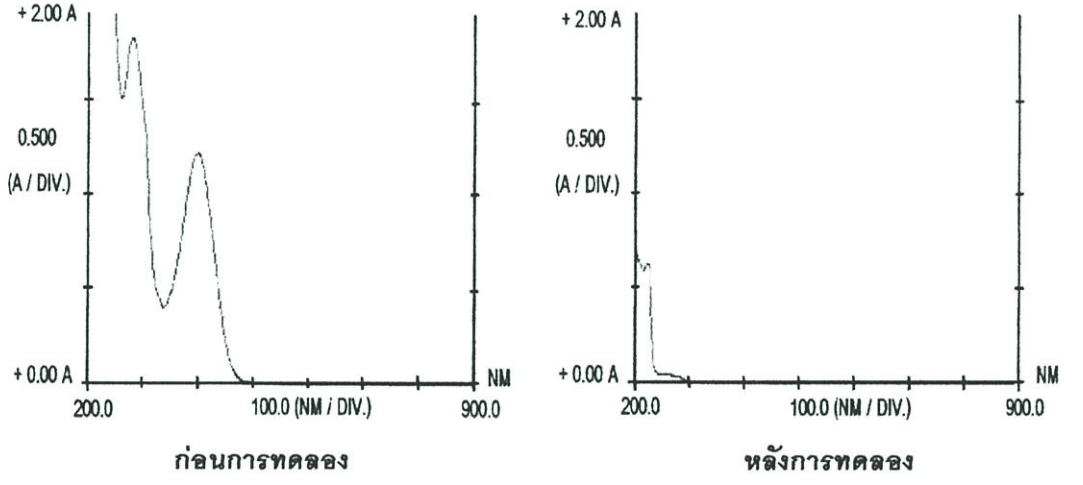
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์



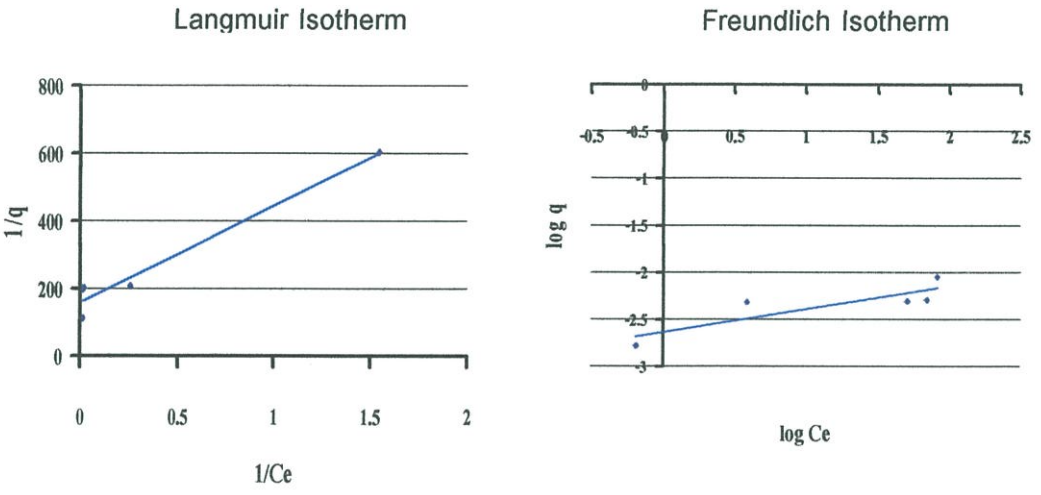
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์



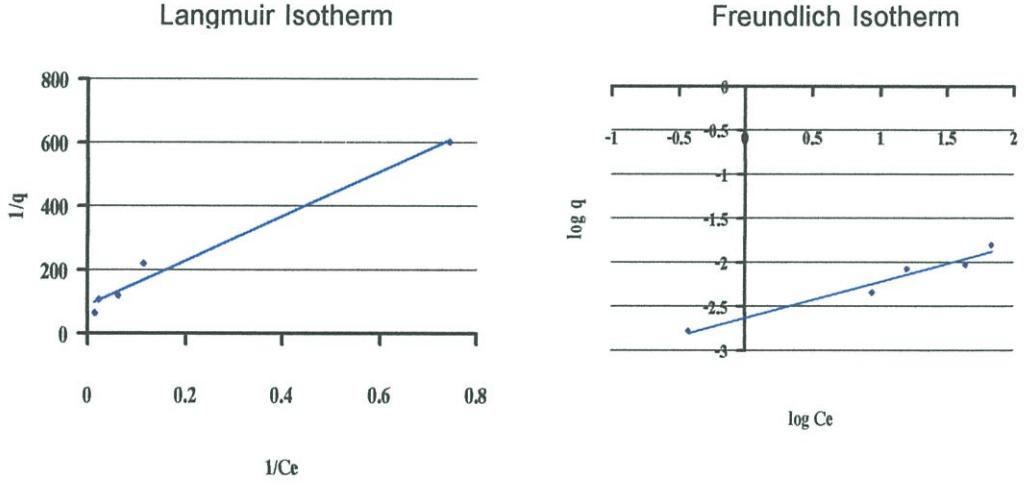
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์

4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม

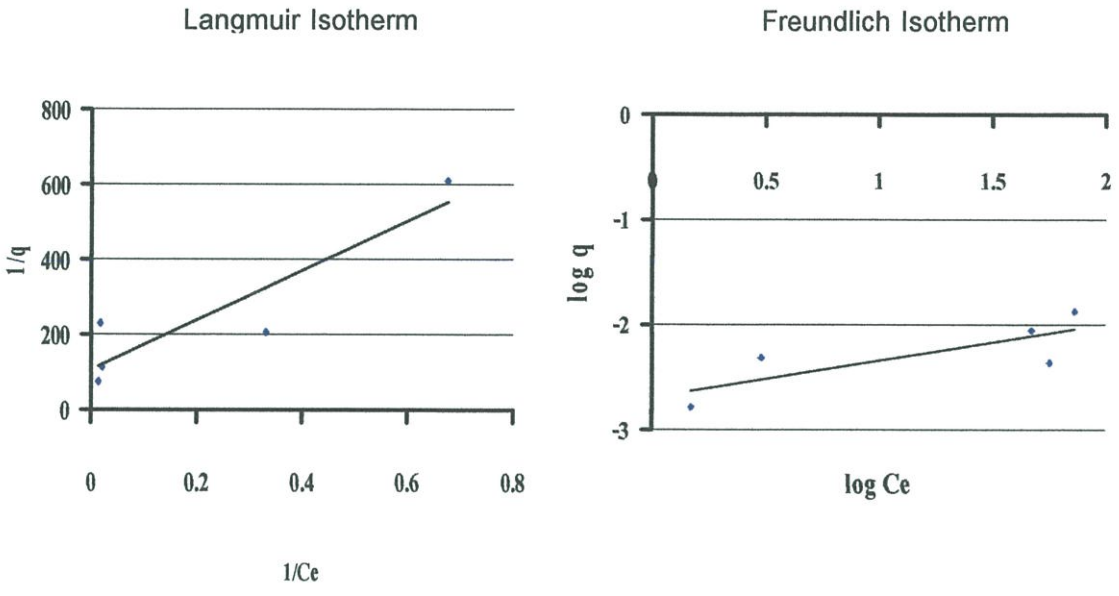
ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ของเศษผงเหล็ก แสดงดังรูป 4.22 - 4.26 (ดูรายละเอียดในตารางที่ ข.7.1–ข.7.5 ในภาคผนวก ข)



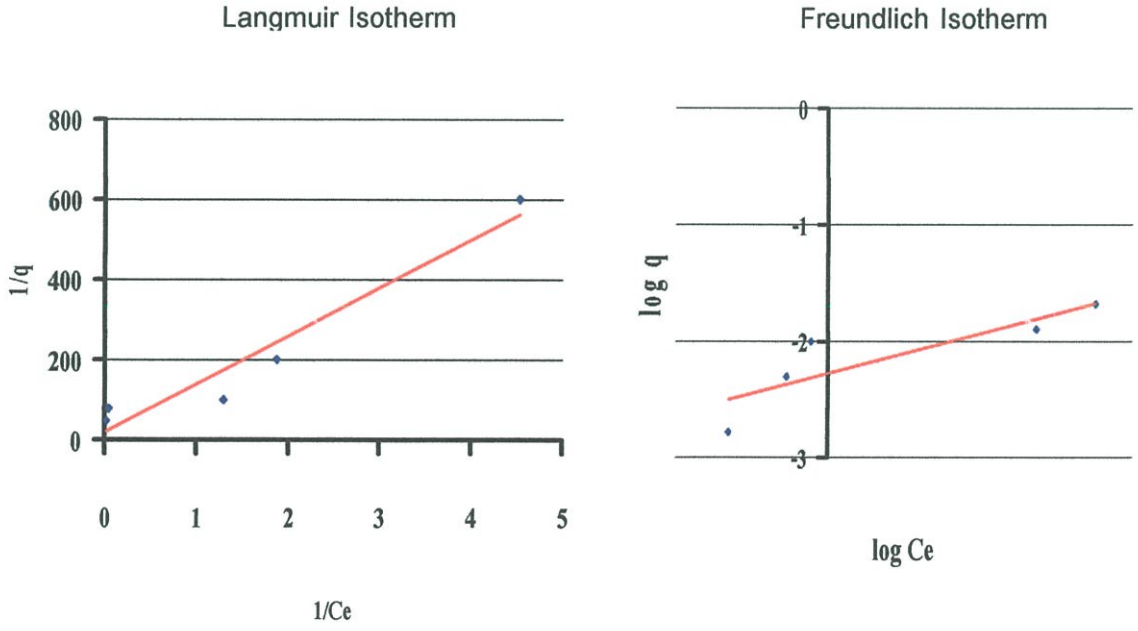
รูปที่ 4.22 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Blue 5



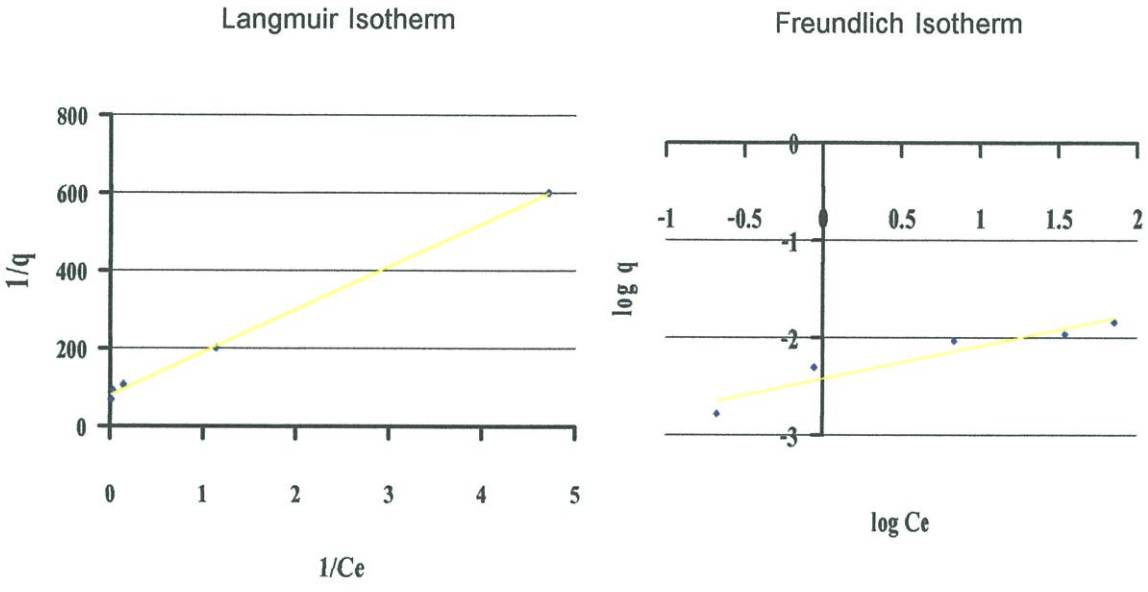
รูปที่ 4.23 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Blue



รูปที่ 4.24 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Black



รูปที่ 4.25 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Red



รูปที่ 4.26 ไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อม Reactive Yellow

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ต่างๆ ของไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม

สี	Langmuir Isotherm			Freundlich Isotherm		
	K	R^2	Q_{max}	K	R^2	1/n
Reactive Blue 5	0.5568	0.9619	0.0063	0.0023	0.7405	0.2451
Reactive Blue	0.1254	0.9791	0.0114	0.0023	0.9568	0.4104
Reactive Black	0.2041	0.8259	0.0070	0.0013	0.6297	0.3422
Reactive Red	0.1658	0.9406	0.0503	0.0053	0.7438	0.3419
Reactive Yellow	0.7394	0.9982	0.0122	0.0038	0.9049	0.3343

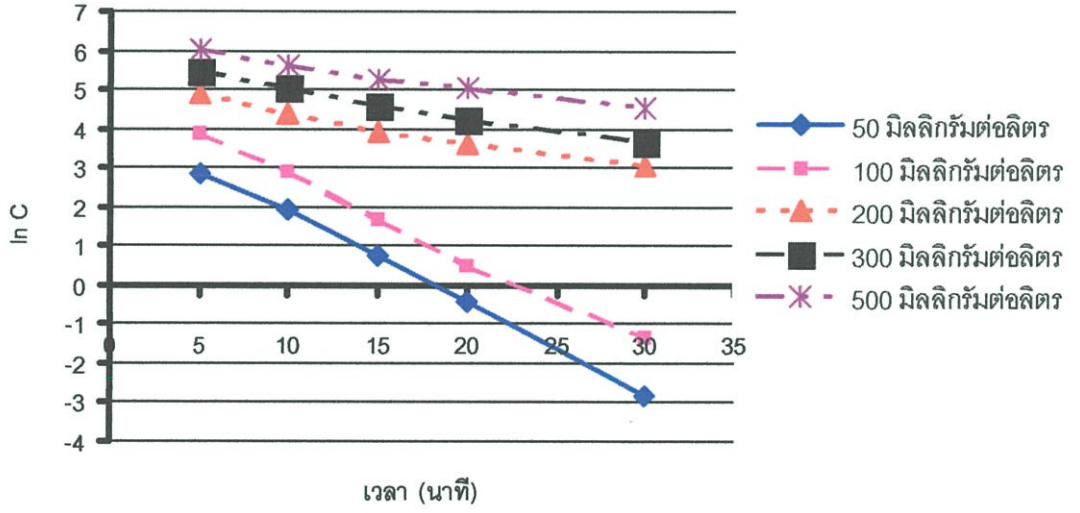
จากผลการทดลอง (ตารางที่ 4.6) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิความสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังนั้นแสดงว่าการดูดซับของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี ด้วยเศษผงเหล็กเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Cao *et al.*, 1999 และ Mantha *et al.*, 2001 คือการดูดซับด้วยเศษผงเหล็กที่มีตำแหน่งการดูดซับปกคลุมแบบชั้นเดียว (monolayer coverage) และมีค่า Q_{max} ซึ่งบอกถึงปริมาณของสีย้อมต่อปริมาณเศษผงเหล็กที่จัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวเศษผงเหล็ก และเมื่อเกิดการดูดซับแล้วโมเลกุลของสีย้อมจะไม่เกิดการซ้อนทับซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการทดลองของ Nam และ Tratnyek

(2000) ที่พบว่าเศษผงเหล็กสามารถดูดซับสีย้อมได้ประมาณ 4% ทั้งนี้เนื่องจากสีย้อมจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของเศษผงเหล็กบริเวณ nonreactive sites แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีตำแหน่งการดูดซับแบบซ้อนทับกันได้ พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue และ Reactive Yellow มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่นกัน และเมื่อพิจารณาค่า 1/n พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นที่การดูดซับบนพื้นผิวเศษผงเหล็กมีปริมาณจำกัดนั่นเอง ดังนั้นการดูดซับของสีย้อม Reactive Blue และ Reactive Yellow ด้วยเศษผงเหล็กเป็นการดูดซับทั้งแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

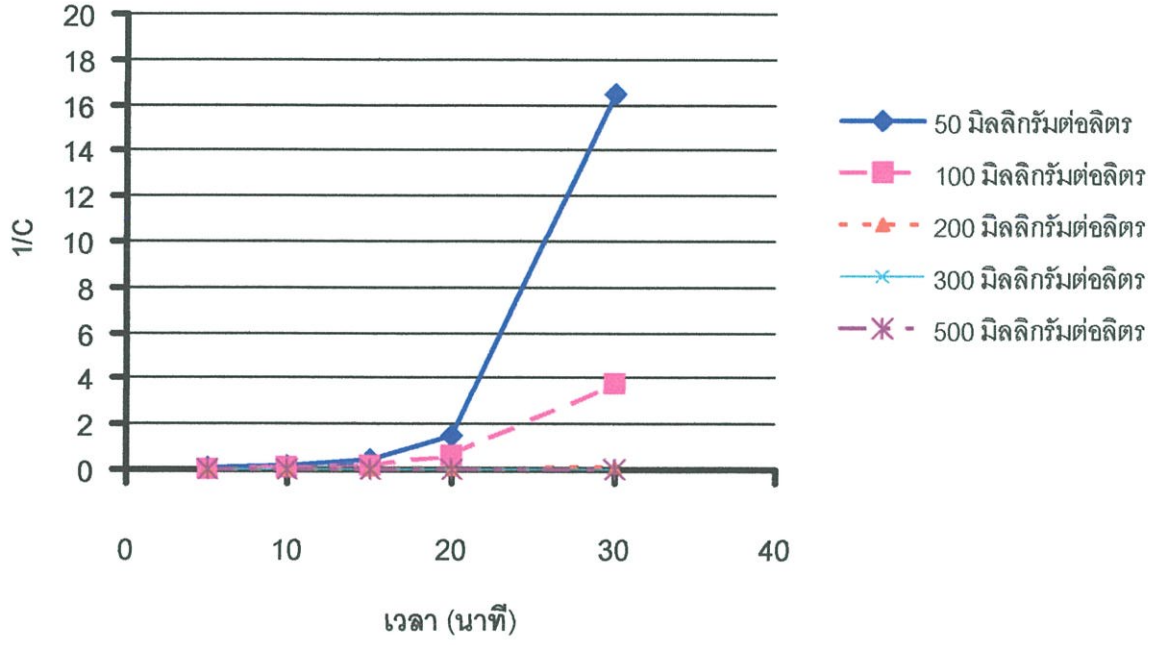
4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์เคมี

ศึกษาจลนศาสตร์เคมีในการกำจัดสีย้อม Reactive ด้วยเศษผงเหล็กโดยใช้ Reactive Blue 5 เป็นตัวแทนของสีย้อม Reactive

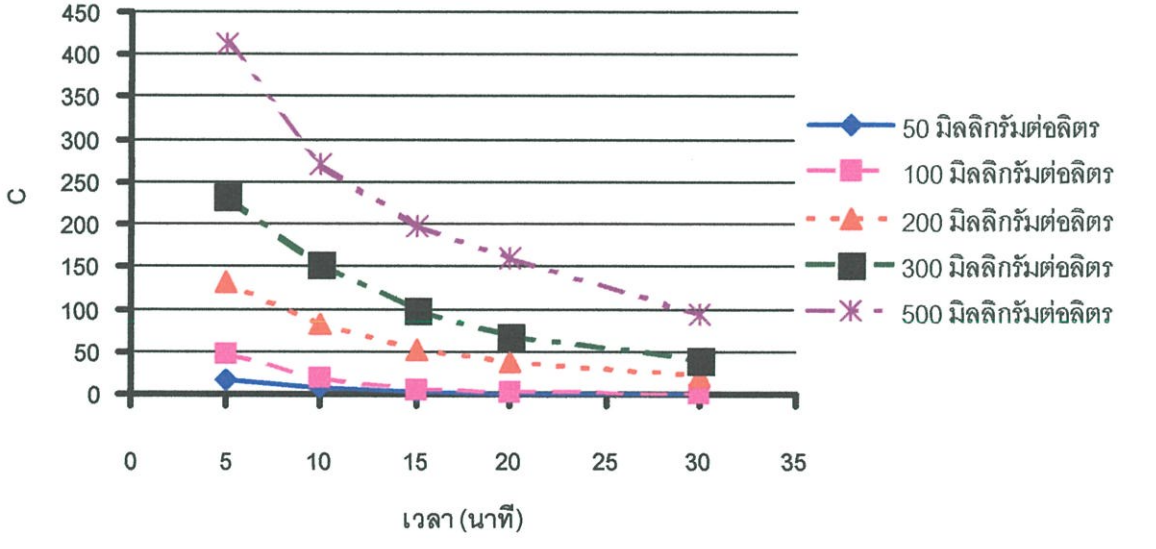
4.5.1 ผลการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.27 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

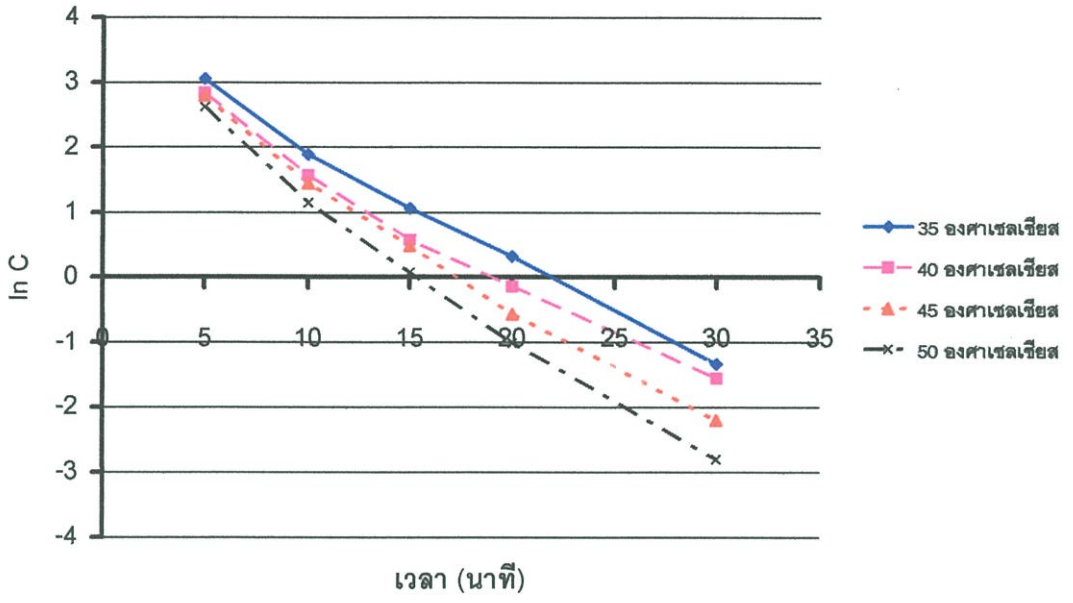


รูปที่ 4.28 ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

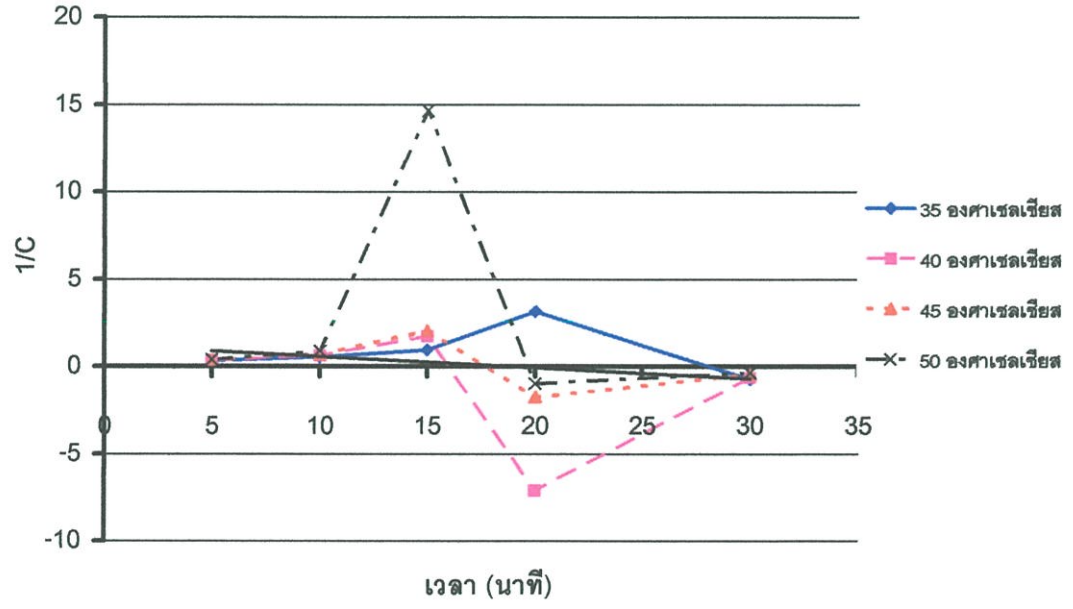


รูปที่ 4.29 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

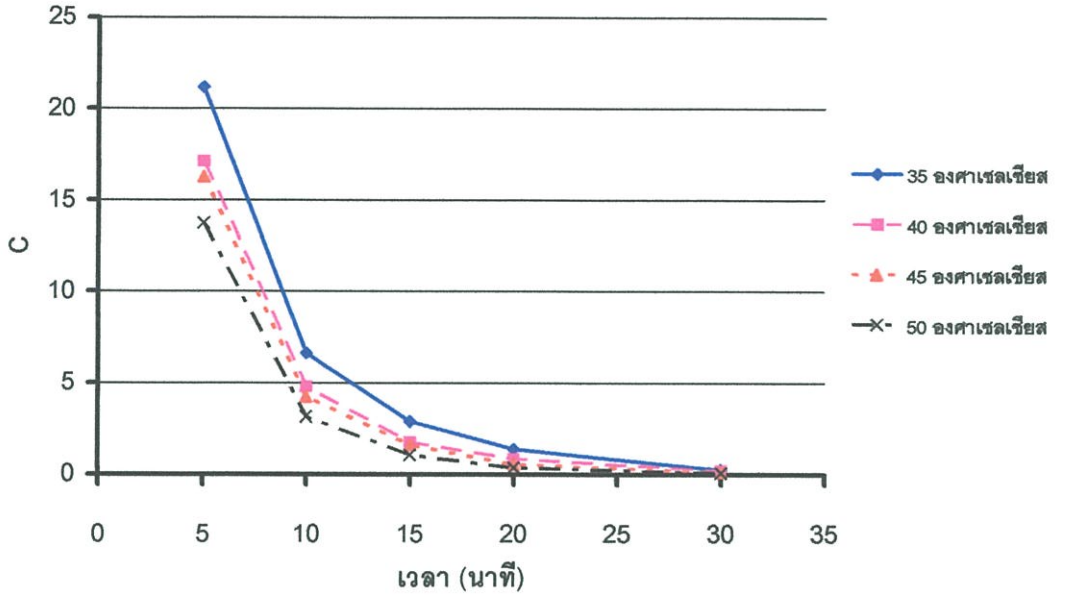
4.5.1 ผลการศึกษาอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 35, 40, 45 และ 50 ^{o}C



รูปที่ 4.30 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.31 ปฏิกิริยาอันดับสองของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.32 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูปที่ 4.27-4.32 แสดงปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง อันดับสอง และอันดับศูนย์ (ดูรายละเอียดในตาราง ง.1.1- ง.1.2 ในภาคผนวก ง)

จากสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ สามารถหาค่าคงที่ต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง		ปฏิกิริยาอันดับสอง		ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	
	k	R^2	k	R^2	k	R^2
50	0.2238	0.9981	0.5493	0.7282	3.3313	0.6982
100	0.1981	0.9967	0.1266	0.7747	3.3246	0.6801
200	0.0747	0.9802	0.0014	0.9820	2.6246	0.8463
300	0.0670	0.9855	0.0007	0.9820	1.9933	0.8741
500	0.0558	0.9862	0.0002	0.9787	0.2104	0.8830

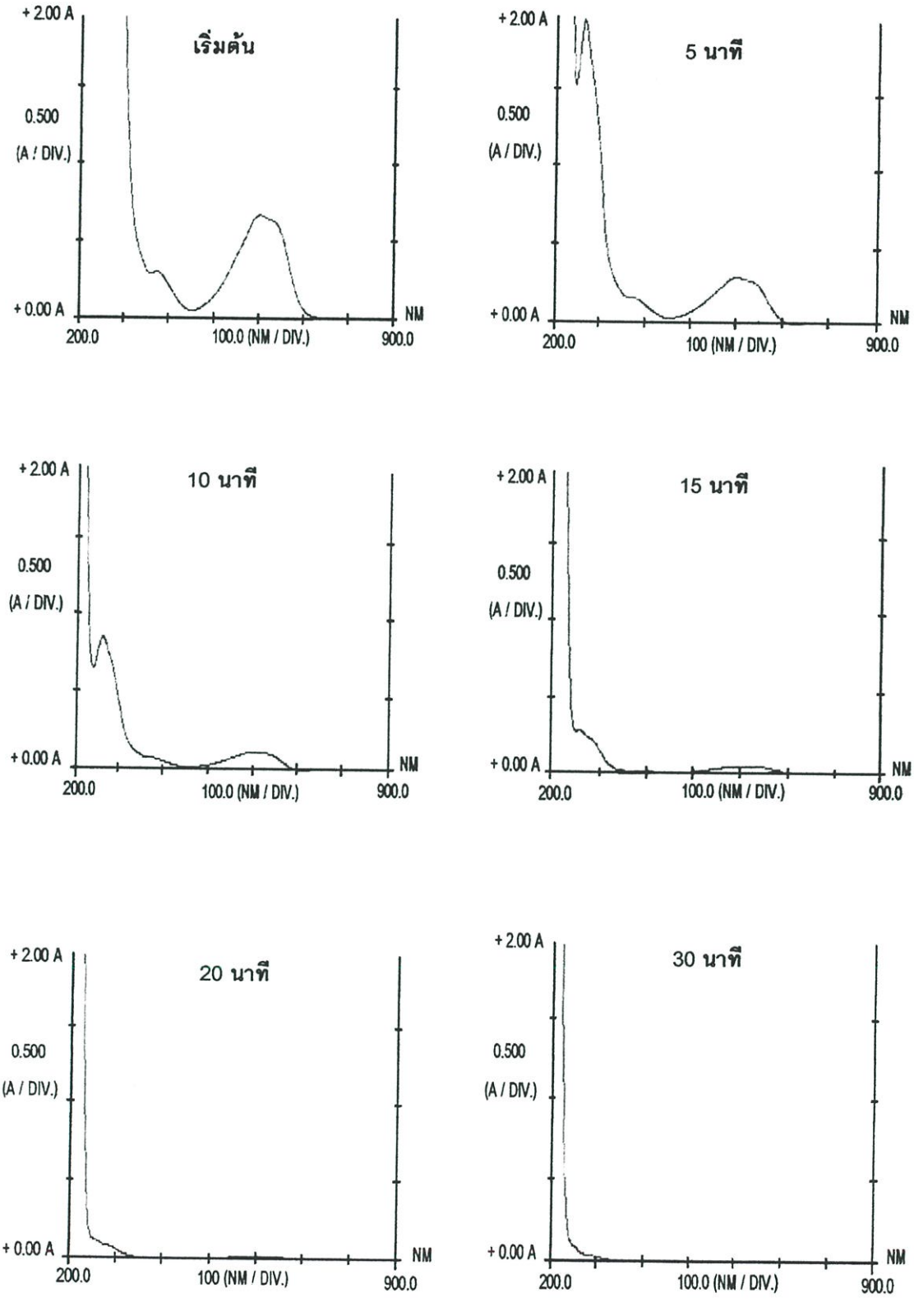
ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (^{o}C)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง		ปฏิกิริยาอันดับสอง		ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	
	k	R^2	k	R^2	k	R^2
35	0.1981	0.9942	-0.0322	0.0103	3.3246	0.6534
40	0.2052	0.9806	-0.0287	0.1202	3.3263	0.6185
45	0.2267	0.9905	-0.0224	0.1881	3.3296	0.6091
50	0.2470	0.9899	-0.0191	0.0169	3.3313	0.5812

จากตารางที่ 4.7-4.8 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของการกำจัดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ พบว่าการกำจัดสีย้อมด้วยเศษผงเหล็กที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าปฏิกิริยาอันดับสอง และปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ดังนั้นแสดงว่าการกำจัดสีย้อมด้วยเศษผงเหล็กเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

เมื่อพิจารณาค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็น 100, 200, 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ลดลงเรื่อย ๆ คือจาก 0.2238 ไปเป็น 0.1981, 0.0747, 0.0670 และ 0.0558 ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กเป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากทำให้เกิดการขัดขวางกันของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็ก มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กได้น้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง

เมื่อพิจารณาค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่า k จะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิ เริ่มต้นจากอุณหภูมิ 35 ^{o}C ไปเป็น 40 ^{o}C, 45 ^{o}C และ 50 ^{o}C ตามลำดับ พบว่าค่าคงที่เฉพาะของอัตรา (k) เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ คือจาก 0.1981, 0.2052, 0.2267 และ 0.2470 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มพลังงานจลน์ของสีย้อม ทำให้จำนวนโมเลกุลของสีย้อมมีพลังงานสูงกว่าพลังงานต่ำสุดของค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ทำให้อัตราเร็วในการกำจัดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์

การกำจัดสีย้อมเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.33 เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น สเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร มีค่าลดลง แสดงว่าหมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม Reactive Blue 5 ถูกทำลายพันธะ จึงทำให้เกิดการกำจัดสีย้อมได้

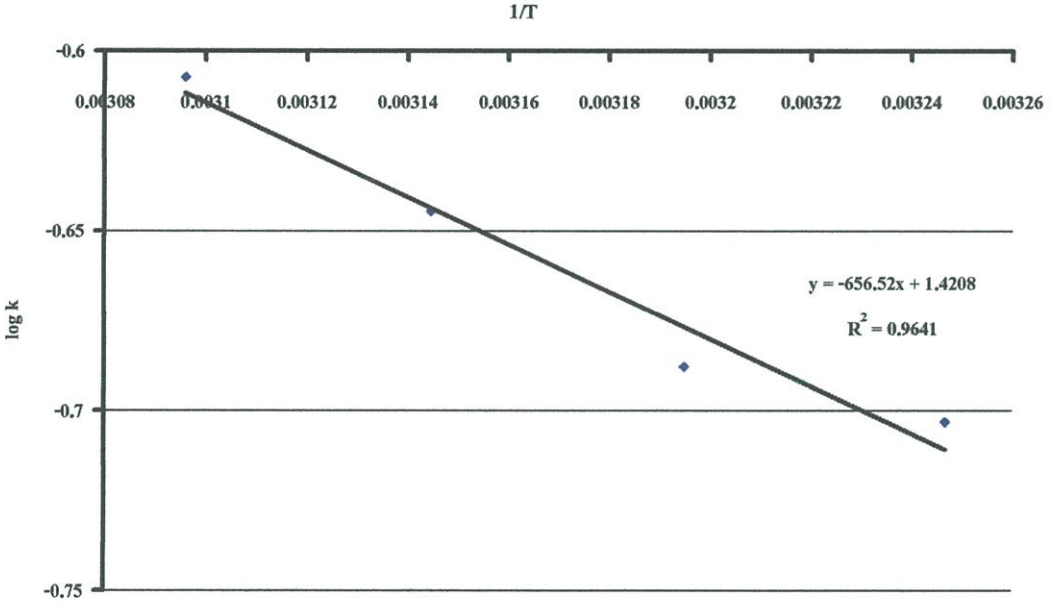
4.6 ผลการศึกษาพลังงานกระตุ้นจากสมการของอาร์เรเนียส

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ในสมการ 2.31

$$\log k = \frac{-E_a}{2.303\,R}\frac{1}{T} + \log A$$

โดยที่ความชันของกราฟ คือ $\frac{-E_a}{2.303\,R}$ และจุดตัดแกน y คือ log A

เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างเมื่อ พล็อต log k กับ 1/T ทำให้สามารถหาค่ากระตุ้น (E_a) จากสมการ 2.31



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 35, 40, 45 และ 50 ^{0}C

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่อัตราเร็วในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (^{0}C)	k	E_a	$t_{1/2}$ (นาที)	R^2
35	0.1981	498.7257	3.4982	0.9942
40	0.2052	495.7930	3.3771	0.9806
45	0.2267	472.0021	3.0569	0.9905
50	0.2470	451.7516	2.8057	0.9899

จากปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (รูปที่ 4.34) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 35, 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของการกำจัดสีย้อม Reactive 5 เพิ่มขึ้นจาก 35 องศาเซลเซียส ไปเป็น 40, 45 และ 50 ^{0}C ตามลำดับ มีผลทำให้ค่าคงที่อัตราเร็ว (k) ในการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 0.1981 ไปเป็น 0.2052, 0.2267 และ 0.2470 ตามลำดับ ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าครึ่งชีวิตของสีย้อมจะลดลงเป็น 3.4982, 3.3771, 3.0569 และ 2.8057 นาที ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ลดลงจาก 498.7257 ไปเป็น 495.7930, 472.0021 และ 451.7516 ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มพลังงานจลน์ของสีย้อม ทำให้จำนวนโมเลกุลของสีย้อมมีพลังงานสูงกว่าพลังงานต่ำสุดของค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ทำให้อัตราเร็วในการกำจัดเพิ่มมากขึ้น นั่นแสดงว่าค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ยิ่งมีค่าต่ำ ปฏิกิริยายิ่งเกิดได้ดี

4.7 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์

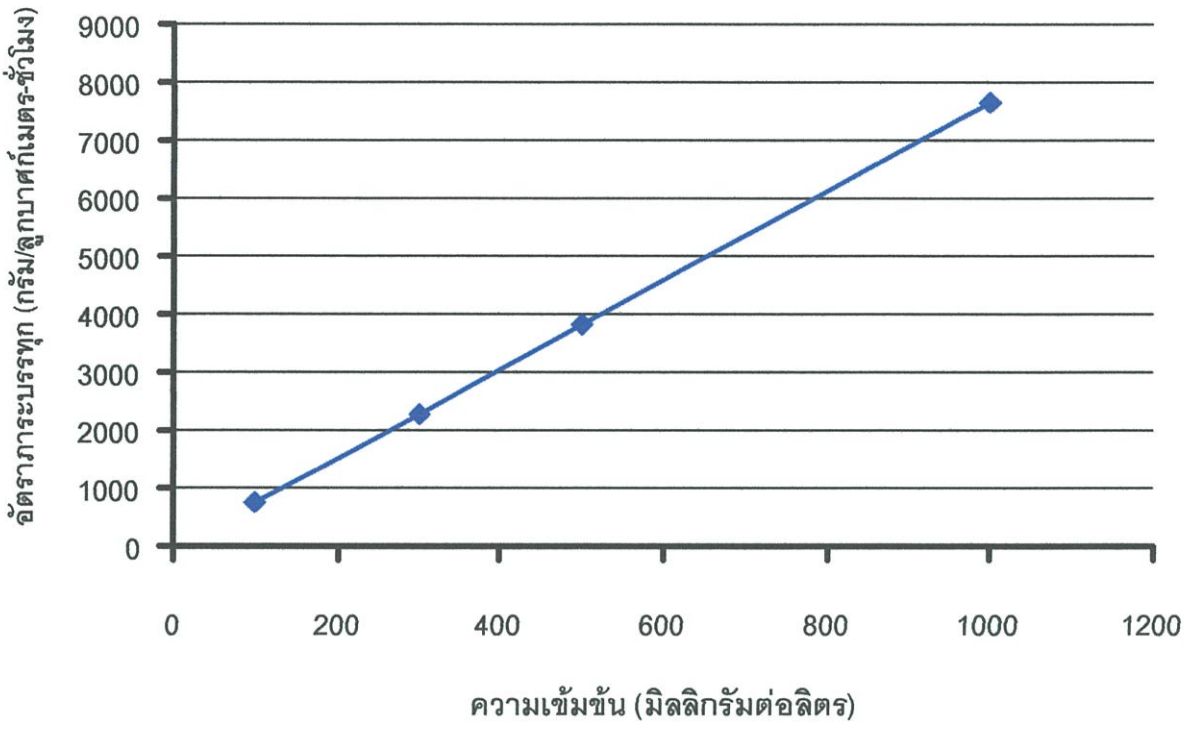
4.7.1 อัตราการไหลที่เหมาะสม (Flow rate)

อัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อนาที

4.7.2 เวลากักเก็บ (Empty Bed Residence Time, EBRT)

ระยะเวลากักเก็บ เท่ากับ 7.86 นาที

4.7.3 อัตราภาระบรรทุก (Mass Loading Rate)

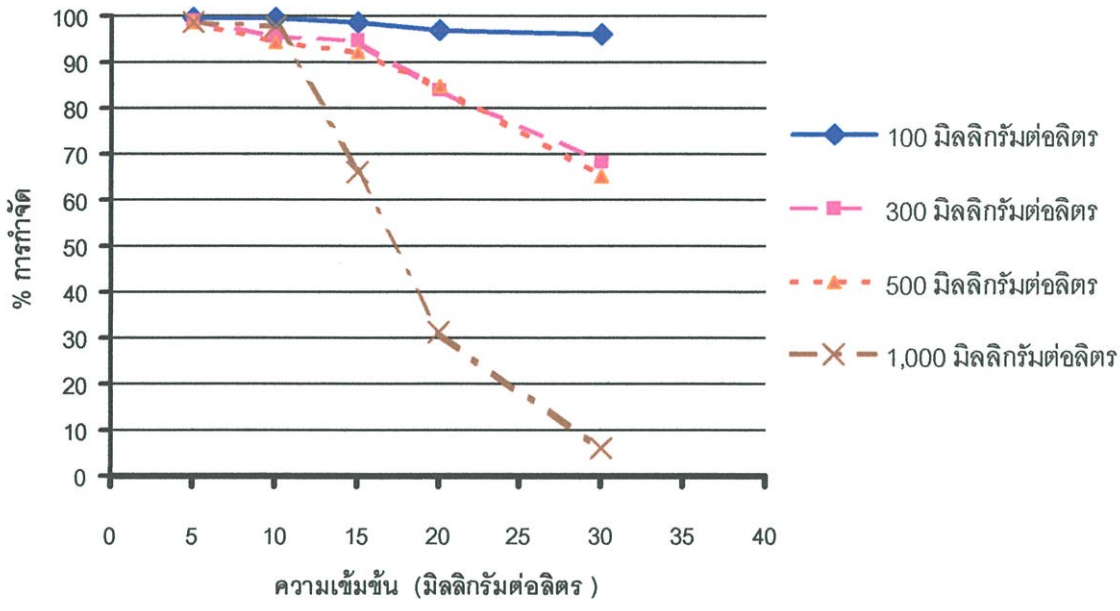


รูปที่ 4.35 อัตราภาระบรรทุกของปริมาณสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เข้าสู่คอลัมน์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูป 4.35 แสดงอัตราภาระบรรทุกปริมาณของสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เข้าสู่คอลัมน์ที่ความเข้มข้น 100, 300, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราภาระบรรทุกที่ได้เป็น 763.84, 2,291.53, 3,819.22 และ 7,638.44 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง

จากการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อัตราภาระบรรทุกก็จะเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้นนั่นเอง

4.7.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.36 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

รูป 4.36 (ดูรายละเอียดในตาราง จ.1.1 ในภาคผนวก จ) แสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100, 300, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Deng *et al.* (2000) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นมีต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสีย้อมจากสารละลายเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กเป็นไปได้ยาก เพราะโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากจึงทำให้เกิดการขัดขวางกันของของโมเลกุลสีย้อมที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็ก มีผลทำให้โมเลกุลของสีย้อมเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวของเศษผงเหล็กได้น้อยลง การกำจัดสีย้อมจึงมีค่าลดลง และเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมก็มีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น $Fe(OH)_2$ จะจับอยู่บนพื้นผิวของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของสีย้อม

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	Reactive Blue 5		
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	% การกำจัด
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.38±0.14	1.96±0.21	63.56
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	110.22±3.08	37.33±5.33	66.13
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4.30±1.33	0.94±0.56	78.14
พีเอช	3.02±0.02	6.05±0.14	-

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์

โลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Reactive Blue 5	
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
Fe	0.02±0.02	158.10±1.60
Cr	0.19±0.03	0.21±0.03
Mn	0.06±0.02	2.05±0.08

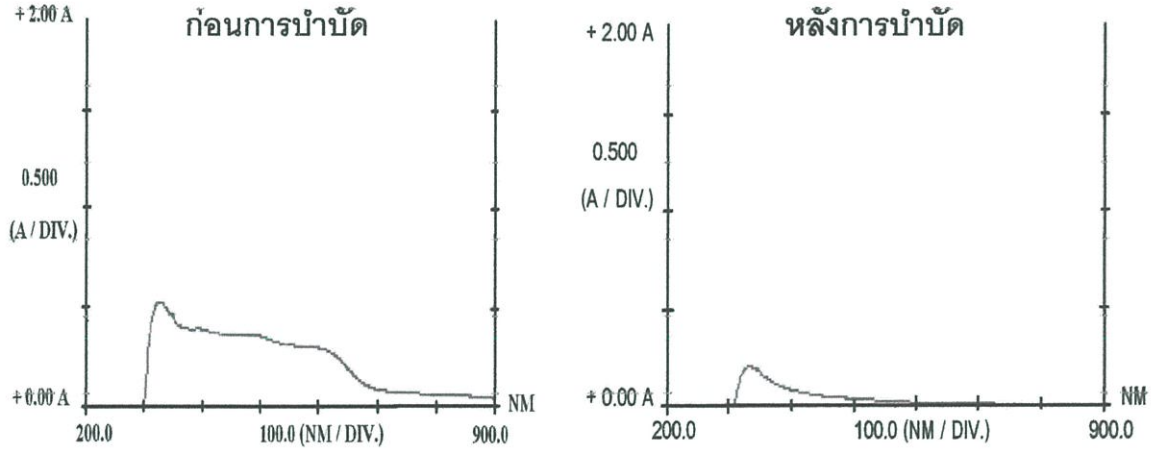
ดังแสดงในตารางที่ 4.10 (ดูรายละเอียดในตาราง จ.2.1- จ.2.2 และ จ.3.1 – จ.3.2 ในภาคผนวก จ) การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยใช้เศษผงเหล็ก สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ จากผลการทดลองพบว่า สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ 63.56%, 66.13%, 78.14% ตามลำดับ และ ค่า พีเอช ของน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดมี พีเอช ประมาณ 6

ตารางที่ 4.11 แสดงโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้หลังจากกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยใช้เศษผงเหล็กมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ จากผลการทดลองพบว่าโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองคือ 158.10, 0.21, 2.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

4.8.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์

รูปที่ 4.37 การกำจัดสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์



รูปที่ 4.38 สเปกตรัมของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ ก่อนบำบัดและหลังบำบัดโดยใช้เศษผงเหล็ก

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์

พารามิเตอร์	สีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม		
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	% การกำจัด
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	199.25±0.90	69.08±0.76	65.33
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	506.67±0.00	232.89±3.08	54.04
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	45.11±0.96	26.40±0.37	41.48
พีเอช	3.03±0.01	6.24±0.07	-

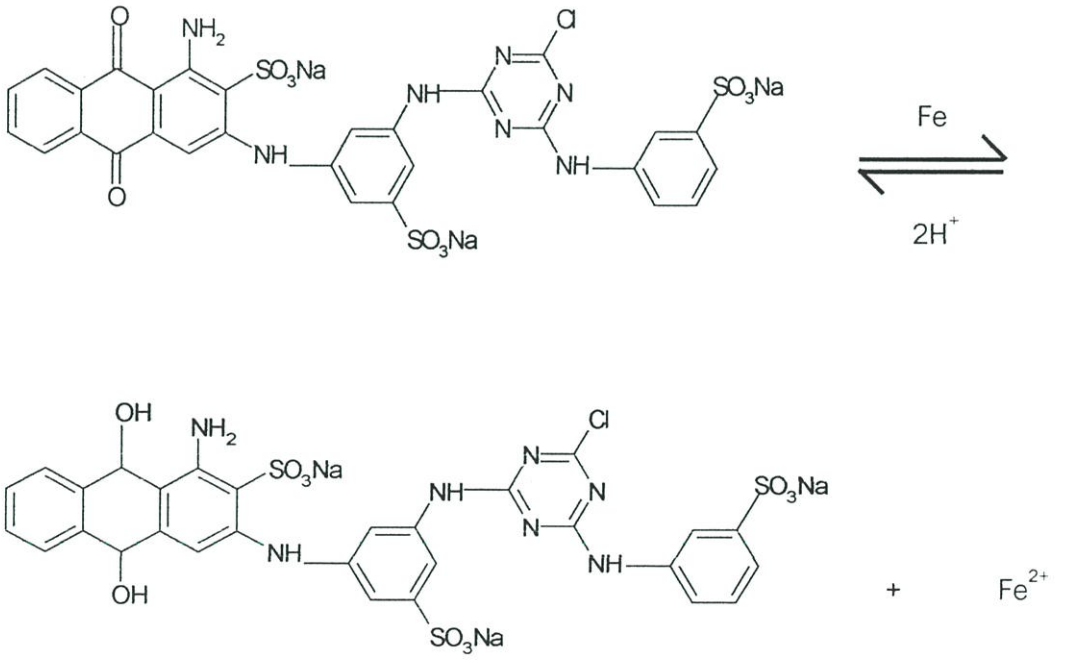
ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์

โลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม	
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
Fe	1.41±0.17	16.05±2.55
Cr	0.03±0.00	0.03±0.00
Mn	0.09±0.03	0.53±0.15

การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบแบทช์ (ดูรายละเอียดในตารางภาคผนวก ฉ.1.1-ฉ.1.2 ในภาคผนวก ฉ) พบว่าสีย้อมถูกกำจัดได้โดยพิจารณาจากการลดลงของสีโดยใช้สายตา (รูปที่ 4.37) และการลดลงของค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสี (รูปที่ 4.38) สามารถลด BOD, COD และ SS ได้ 65.33%, 54.04%และ 41.48% ตามลำดับ สำหรับค่า BOD, COD และ SS ที่มีค่าลดลง เนื่องจากโครงสร้างของสีย้อมหลังจากเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยเศษผงเหล็ก ทำให้โครงสร้างของสีย้อมมีขนาดเล็กลงไม่ซับซ้อน ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ นอกจากนี้เศษผงเหล็กยังสามารถดูดซับสีย้อม ดังแสดงในรูป 4.4 จึงทำให้ค่า BOD, COD และ SS ลดลง ส่วนพีเอชหลังการทดลอง มีค่า 6.24 ซึ่งที่พีเอชนี้ สามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้โดยตรง (ตารางที่ 4.12) ส่วนปริมาณ Fe, Cr และ Mn (ดูรายละเอียดในตาราง ฉ.2.2 ในภาคผนวก ฉ) หลังการทดลอง คือ 16.05, 0.03, 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร

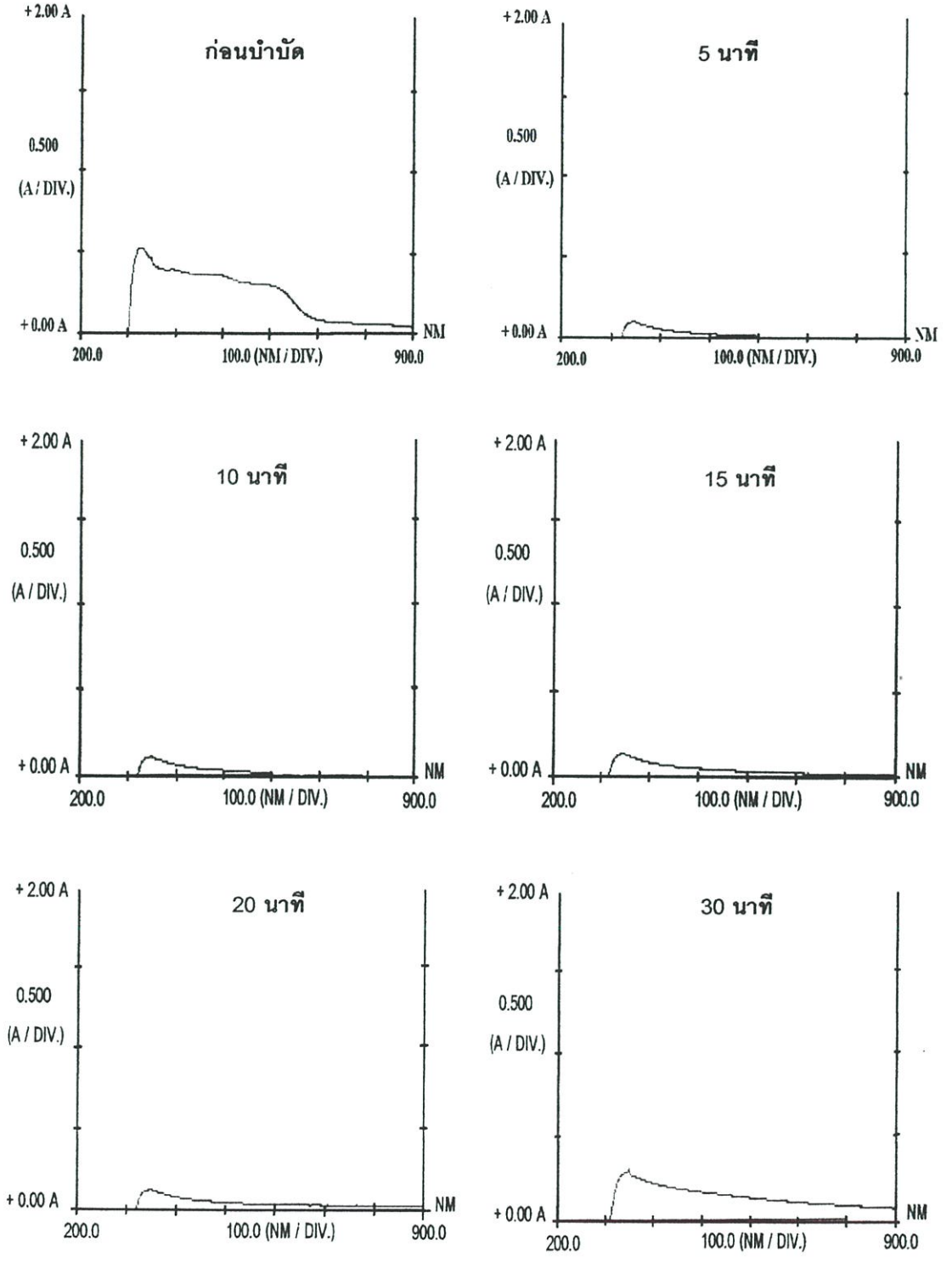
ตามลำดับ (ตารางที่ 4.13) ซึ่งค่าของ Cr และ Mn นี้ มีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้

โลหะหนักหลังการทดลองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก โลหะหนักเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในเศษผงเหล็กในสภาวะที่เป็นกรด โลหะหนักเหล่านี้จะถูกละลายออกมา จึงทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับค่าพีเอช ที่เพิ่มขึ้นหลังการบำบัดของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี และน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น หลังจากการกำจัดสีย้อมมีความเป็นเบสเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัด มีหมู่ OH เข้าแทนที่หมู่โครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีย้อม Reactive Blue 5 ทำให้โครงสร้างของสีย้อมมีความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.39 ปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยใช้เศษผงเหล็ก

4.8.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมของการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์

พารามิเตอร์	สีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม		
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	% การกำจัด
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	210.90±3.48	71.58±1.67	66.06
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	511.82±5.07	247.11±8.15	51.72
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	46.44±1.36	23.23±0.92	49.98
พีเอช	3.07±0.02	6.32±0.05	-

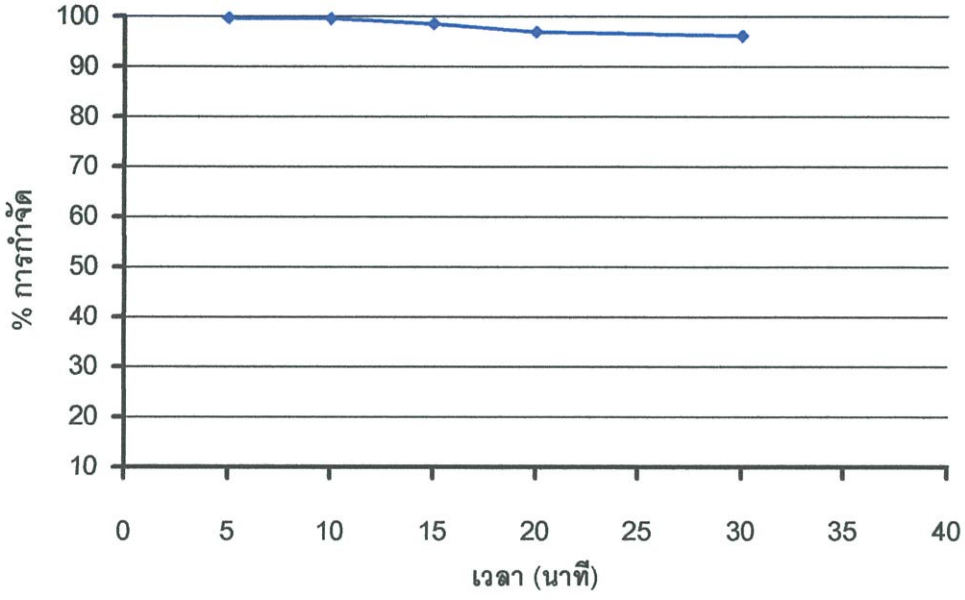
ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยการทดลองแบบคอลัมน์

โลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม	
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
Fe	1.43±0.42	160.92±2.55
Cr	0.06±0.03	0.22±0.13
Mn	0.09±0.06	0.83±0.86

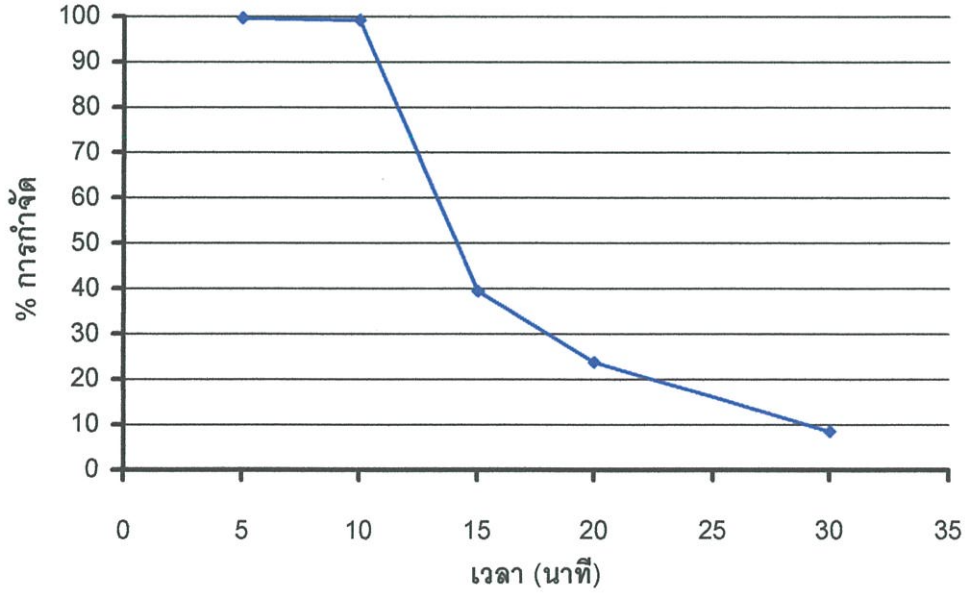
จากรูปที่ 4.40 แสดงสเปกตรัมของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม จากการทดลอง พบว่า สีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมถูกกำจัด โดยพิจารณาจากสเปกตรัมของสีย้อมมีค่าการดูดกลืนที่ลดลง เมื่อเทียบกับสเปกตรัมของสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมก่อนการทดลอง นอกจากนี้พบว่า ที่ความเข้มข้นของสีย้อมคงที่ เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น $Fe(OH)_2$ จะจับอยู่บนพื้นผิวของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของสีย้อม ทำให้เศษผงเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ลดลง และสามารถลด BOD, COD และ SS ได้ 66.06%, 51.72% และ 49.98% ตามลำดับ และ พีเอช หลังการทดลองมีค่า 6.32 ดังแสดงในตารางที่ 4.14 (ดูรายละเอียดในตาราง ฉ.3.1-ฉ.3.2 ในภาคผนวก ฉ) ส่วนปริมาณ Fe, Cr และ Mn หลังการทดลอง คือ 160.92, 0.22, 0.83

มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 (ดูรายละเอียดในตาราง ฉ.4.1-ฉ.4.2 ในภาคผนวก ฉ) ซึ่งค่าของ Cr และ Mn นี้ มีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้

4.9 ผลการ Regenerate ของเศษผงเหล็ก



รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เวลาต่าง ๆ (ก่อนการ Regenerate)



รูปที่ 4.42 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เวลาต่าง ๆ (หลังการ Regenerate)

รูป 4.41 (ดูรายละเอียดในตาราง ช.1 ในภาคผนวก ช) แสดงผลการ Regenerate สีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า หลังจากการ Regenerate เศษผงเหล็ก มีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมได้ประมาณ 10 นาที ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดมากกว่า 99% หลังจากนั้นเปอร์เซนต์การกำจัดลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปถึง 30 นาที เปอร์เซนต์การกำจัดสีย้อมได้ประมาณ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับเศษผงเหล็กก่อนการ Regenerate เปอร์เซนต์การกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 95% (รูปที่ 4.42) เนื่องจากเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น $Fe(OH)_2$ จะจับอยู่บนพื้นผิวของเศษผงเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของสีย้อม ทำให้เศษผงเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมลดลง

อย่างไรก็ตาม ในการ Regenerate ควรจะมีการ Regenerate หลาย ๆ ครั้ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเศษผงเหล็กหลังการ Regenerate มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดกี่ครั้ง

ตารางที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 ของการ Regenerate

พารามิเตอร์	Reactive Blue 5		
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	% การกำจัด
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.38±0.14	2.04±0.21	62.08
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	110.22±3.08	46.22±6.16	58.07
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4.30±1.33	0.87±0.53	79.78
พีเอช	3.03±0.03	6.35±0.51	-

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์โลหะหนักของสีย้อม Reactive Blue 5 ของการ Regenerate

โลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Reactive Blue 5	
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง
Fe	0.20±0.00	159.40±1.12
Cr	0.10±0.02	0.22±0.03
Mn	0.06±0.02	2.03±0.09

ดังแสดงในตารางที่ 4.16 - 4.17 (ดูรายละเอียดในตาราง ช.2.1 - ช.2.4 ในภาคผนวก ช) การ Regenerate สีย้อม Reactive Blue 5 สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ จากผลการทดลองพบว่า สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ 62.08%, 58.07%, 79.78% ตามลำดับ และค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดมีพีเอชประมาณ 6 ตารางที่ 4.17 แสดงโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้หลังจากกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยใช้เศษผงเหล็กมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ จากผลการทดลองพบว่า โลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองคือ 159.40, 0.22, 2.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้เศษผงเหล็กก่อนการ Regenerate ซึ่งการทดลองนี้เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเศษผงเหล็กกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดลองแบบแบทช์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive โดยการทดลองแบบแบทช์ สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1.1 ผลของพีเอชต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 98%

5.1.1.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 97%

5.1.1.3 ผลของความเร็วรอบในการเขย่าต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 98%

5.1.1.4 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ เศษผงเหล็กขนาด 12-100 เมช ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 98%

5.1.1.5 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red, และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 98%

5.1.1.6 ผลปริมาณของเศษผงเหล็กต่อการกำจัดสีย้อม Reactive พบว่าแสดงผลการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณของเศษผงเหล็ก 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 97%

5.1.1.7 การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow โดยใช้เศษผงเหล็ก สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ และค่าพีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

5.1.1.8 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมทั้ง 5 สี พบว่าเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ สำหรับสีย้อม Reactive Blue และ Reactive Yellow เป็นไปตามทั้งไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

5.1.1.9 การศึกษาจลนศาสตร์ของการกำจัดสีย้อม พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

5.1.1.10 การทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม เศษผงเหล็กสามารถกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมได้ โดยพิจารณาจากค่าสเปกตรัมการดูดกลืนที่ลดลง และสามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ และค่าพีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

5.1.2 การทดลองแบบคอลัมน์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive โดยการทดลองแบบคอลัมน์ สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.2.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เท่ากับ 4 มิลลิลิตรต่อนาที ระยะเวลากักเก็บ เท่ากับ 7.86 นาที

5.1.2.2 อัตราภาระบรรทุกปริมาณของสีย้อม Reactive Blue 5 ที่เข้าสู่คอลัมน์ที่ความเข้มข้น 100, 300, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราภาระบรรทุกที่ได้เป็น 763.84, 2,291.53, 3,819.22 และ 7,638.44 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง จากการทดลอง พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อัตราภาระบรรทุกก็จะเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้น

5.1.2.3 ผลของความเข้มข้นต่อการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ สภาวะที่เหมาะสม คือ ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากกว่า 98%

5.1.2.4 การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 จากการทดลองแบบคอลัมน์ โดยใช้เศษผงเหล็ก สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ และค่า พีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง

ส่วนโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

5.1.2.5 การทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม เศษผงเหล็กสามารถกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมได้ โดยพิจารณาจากค่าสเปกตรัมการดูดกลืนที่ลดลง และสามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ และค่าพีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

5.1.2.6 การ Regenerate ของเศษผงเหล็ก ประสิทธิภาพของเศษผงเหล็กหลังการ Regenerate สามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 98% ที่เวลา 10 นาที สามารถลดค่า BOD, COD และ SS ได้ และค่า พีเอชเข้าใกล้พีเอชที่เป็นกลาง ส่วนโลหะหนัก Fe, Cr และ Mn ที่วิเคราะห์ได้หลังการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด อย่างไรก็ตามอายุการใช้งานของเศษผงเหล็กจะลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาอัตราการกัดกร่อนของเศษผงเหล็กในการกำจัดสีย้อม

5.2.2 ศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมของเศษผงเหล็ก เช่น ออกซิเจนละลายน้ำได้ (DO)

5.2.3 วิเคราะห์โครงสร้างของสีย้อมหลังกำจัดด้วยเศษผงเหล็ก ด้วย LC-MS, HPLC-MS เพื่อศึกษาว่าสารตัวกลาง (Intermediate) มีความเป็นพิษหรือไม่

5.2.4 ศึกษาการใช้โลหะอื่น ๆ ในการกำจัดสีย้อม เช่น สังกะสี ควบคู่กับการใช้เศษผงเหล็ก

5.2.5 ศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิดอื่น ๆ ด้วยเศษผงเหล็ก เช่น สีย้อมไดเร็กซ์ สีย้อมเบสิก เป็นต้น

5.2.6 ศึกษาการใช้พัลลาเดียมในการเคลือบเศษผงเหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของเศษผงเหล็ก

บรรณานุกรม

กฤษณา ชุติมา. 2531. **หลักเคมีทั่วไป เล่ม 1.** พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพ ฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม.** กรุงเทพ ฯ : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแสดล้อม.

กรมเศรษฐกิจการพานิชย์. 2542. **สถิติการค้าระหว่างประเทศของไทย ปี 2539-2542 (ม.ค.-ก.ย.).**

กรองกาญจน์ ภูระรัตน์. 2530. **"การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดพาราควอทโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีและการดูดซับด้วยถ่าน."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โกมล เอี่ยมเสมอ. 2541. **"ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอะโซกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีบีพีอาร์."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2530. **หลักเคมี 2.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. กรุงเทพ ฯ : โอเดียนสโตร์.

ฒาลิสา เนียมมณี. 2542. **"การกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 2 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยแบคทีเรียเด่นในกระบวนการเอสบีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐสม สงวนวงศ์. 2532. **"ศึกษาการหาคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของโลหะเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมการทาง."** กองวิเคราะห์ และวิจัย. กรมทางหลวง.

นันทยา ยานุมาศ. 2537. "ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ." **วารสารคัลเลอร์เวย์.** 1(6):42-47

บุษรา ประชุมญาติ. 2545. **"การกำจัดสีรีแอกทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2527. **การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อน้ำระบบหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร**. กรุงเทพ ฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ราตรี ปิ่นทอง และคณะ. 2543. **"การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและมันสำปะหลัง."** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ลั่นทม จอนจอบทรง. 2535. "การบำบัดและการจัดการน้ำเสียจากการย้อมสี." **วารสารเทคโนโลยีที่เหมาะสม**. (ต.ค.-ธ.ค.) : 38-43.

อังคณา ตุลไตรรัตน์. 2540. "สุขภาพและสิ่งแวดล้อมกับการใช้สีอินทรีย์." **คัลเลอร์เวย์**. 2 (มีนาคม-เมษายน): 29-37.

อุตสาหกรรมย้อมผ้า, 2537. **วารสาร TTIS Textile Digest**. ฉบับที่ 17 (กันยายน): 14-18.

Brown, D. and Hamburger, B. 1987. "The degradation of dyestuffs: Part III-Investigations of Their Ultimate Degradability." **Chemosphere**. 16(7), 1539-1553.

Burris David, R. Campbell Timothy, J. and Manoranjan Valipuram, S.1995. "Sorption of Trichloroethylene and Tetrachloroethylene in a Batch Reactive Metallic Iron-Water System." **Environmental Science and Technology.** 29(11), 2580-2855.

Cao Jiasheng, Wei Liping, Huang Qingguo, Wang Liansheng and Shuolcui Han.1999. "Reduction Degradation of Azo Dye by Zero-Valent Iron in aqueous solution." **Chemosphere**. 38(3), 565-571.

Chen Jiann-Long, Wei Liping, Huang Qingguo, Wang Liansheng and Shuolcui Ham. 2001."Effect of pH on dechlorination of trichloroethylene by zero-valent iron." **Journal of Hazardous Materials**. B83, 243-254.

Deng, N. Luo, F. Wu, F. Xiao, M. and Wu, X. 2000. "Discoloration of Aqueous Reactive Dye Solution in The UV/Fe^0 System." **Water Research**. 34(8), 2408-2411.

Fennelly Jay, P. and Roberts Lynn, A.1998. "Reaction of 1,1,1-Trichloroethane with Zero-Valent Metals and Bimetallic Reductants." **Environmental Science and Technology**.32(13), 1980-1988.

Feng Wu, Nansheng Deng and Helin Hua. 2000. "Degradation *mechanism of azo dye* C.I.reactive red 2 by iron powder reduction and photooxidation in aqueous solutions." **Chemosphere**. 41, 1233-1238.

Mantha Ramkrishna, Taylor Keith, E., Biswas Nihar and Bewtra Jatinder, K. 2001. "A Continuous System for Fe^0 Reduction of Nitrobenzene in Synthetic Wastewater." **Environmental Science and Technology.** 35(15), 3231-3236.

Muruganandham, M. and Swaminathan, M. 2004. "Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H_2O_2 process." **Dye and Pigments.** 62, 271-277.

Nam Sangkil and Tratnyek Paul, G. 2000. "Reduction of Azo Dyes with Zero-Valent Iron." **Water Research.** 34(6), 1837-1845.

Netpradit Suchapa, Thiravetyan Paitip and Towprayoon Sirintornthep. 2004. "Adsorption of three azo reactive dyes by metal hydroxide sludge : effect of temperature, pH, and electrolytes." 270, 255-261.

Tan Boon Hai, Teng Tjoon Tow and Omar A.K.Mohd. 2000. "Removal of Dyes and Industrial Dye Wastes by Magnesium Chloride." **Water Research.** 34(2), 597-601.

Tezcanli-Guyer, G. and Ince, N.H. 2003. "Degradation and toxicity reduction of textile dyestuff by ultrasound." **Ultrasonic Sonochemistry.** 10, 235-240.

Wang Chuan-Bao and Zhang Wei-xian. 1997. "Synthesizing Nanoscale Iron Particles for Rapid and Complete Dechlorination of TCE and PCB_S." **Environmental Science and Technology.**31(7), 2154-2156.

ภาคผนวก ก

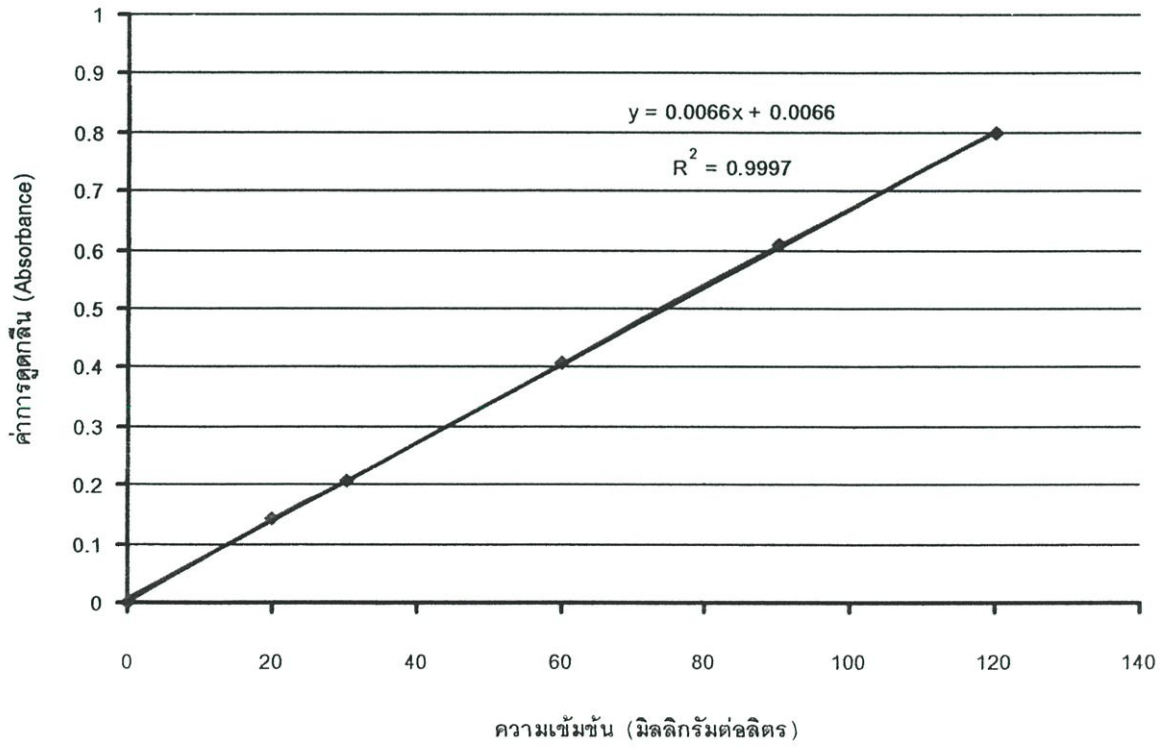
กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive

ก.1 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Blue 5

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 600 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
20	0.142
30	0.208
60	0.409
90	0.608
120	0.798



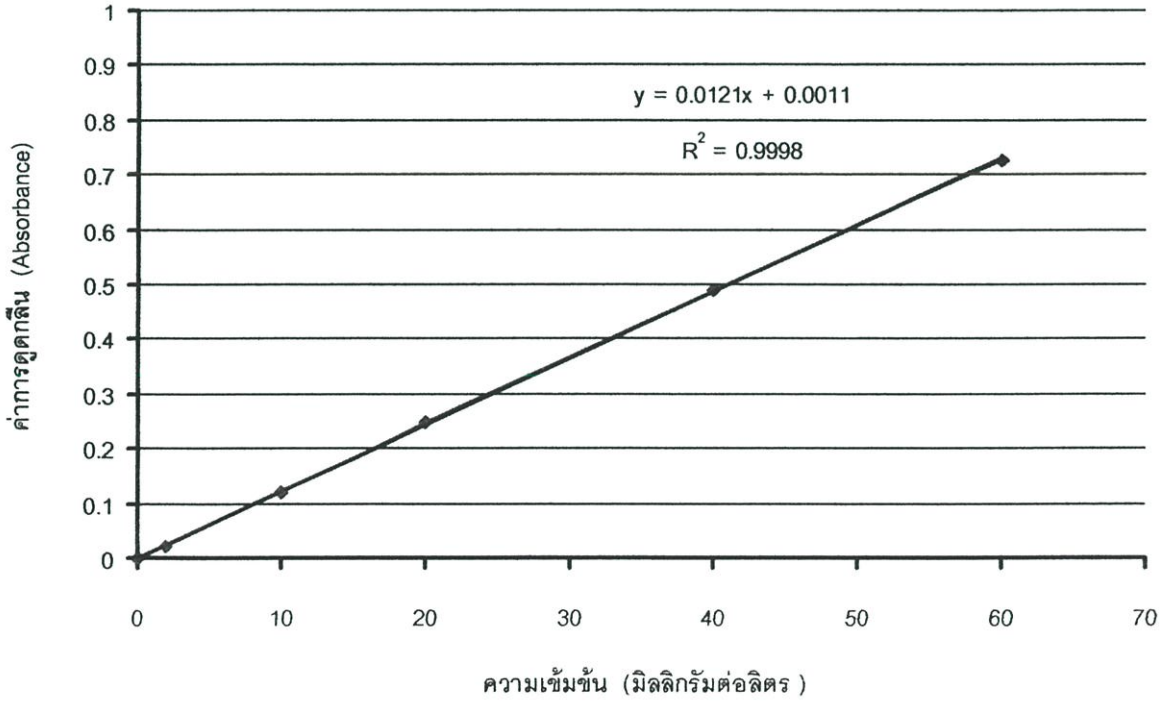
รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue 5

ก.2 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Blue

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 600 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.2 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Blue

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
2	0.022
10	0.122
20	0.249
40	0.489
60	0.725



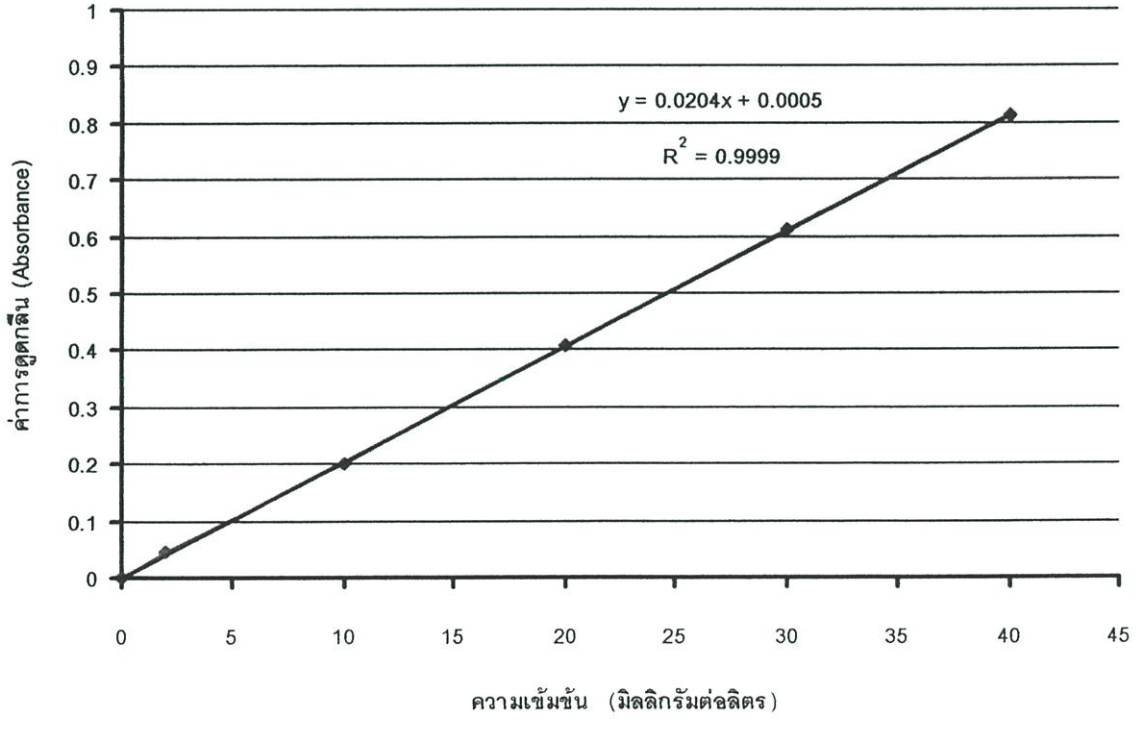
รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Blue

ก.3 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Black

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 570 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.3 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Black

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
2	0.045
10	0.199
20	0.408
40	0.613
60	0.814



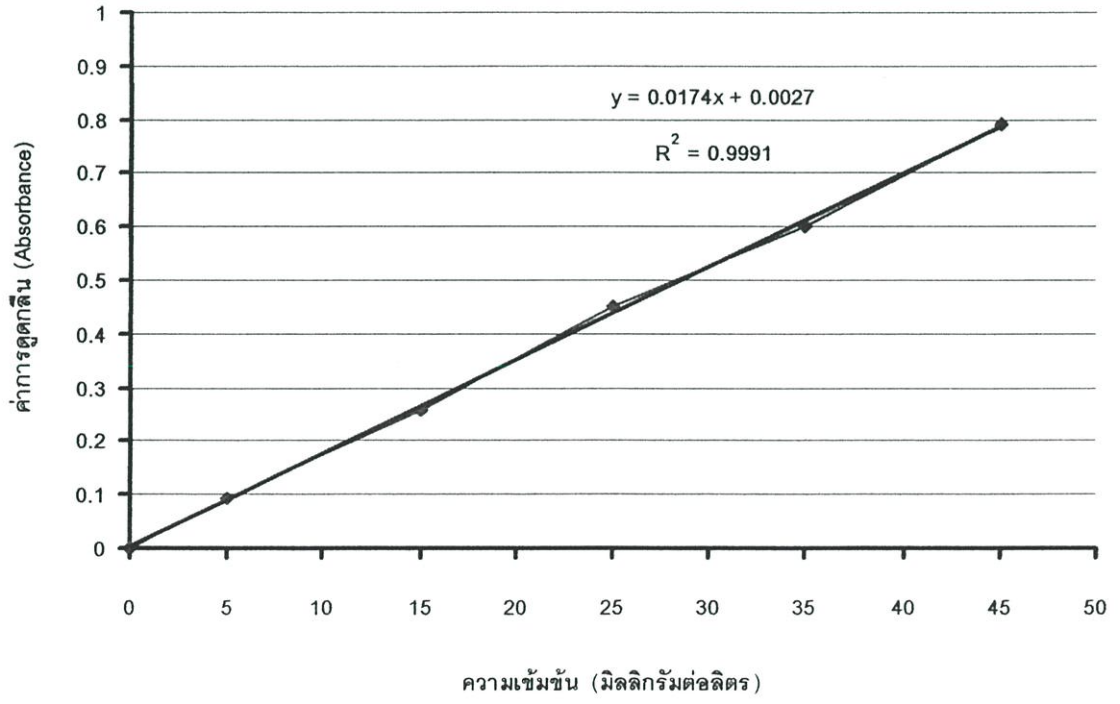
รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Black

ก.4 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Red

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 530 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.4 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Red

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
5	0.095
15	0.256
25	0.451
35	0.601
45	0.790



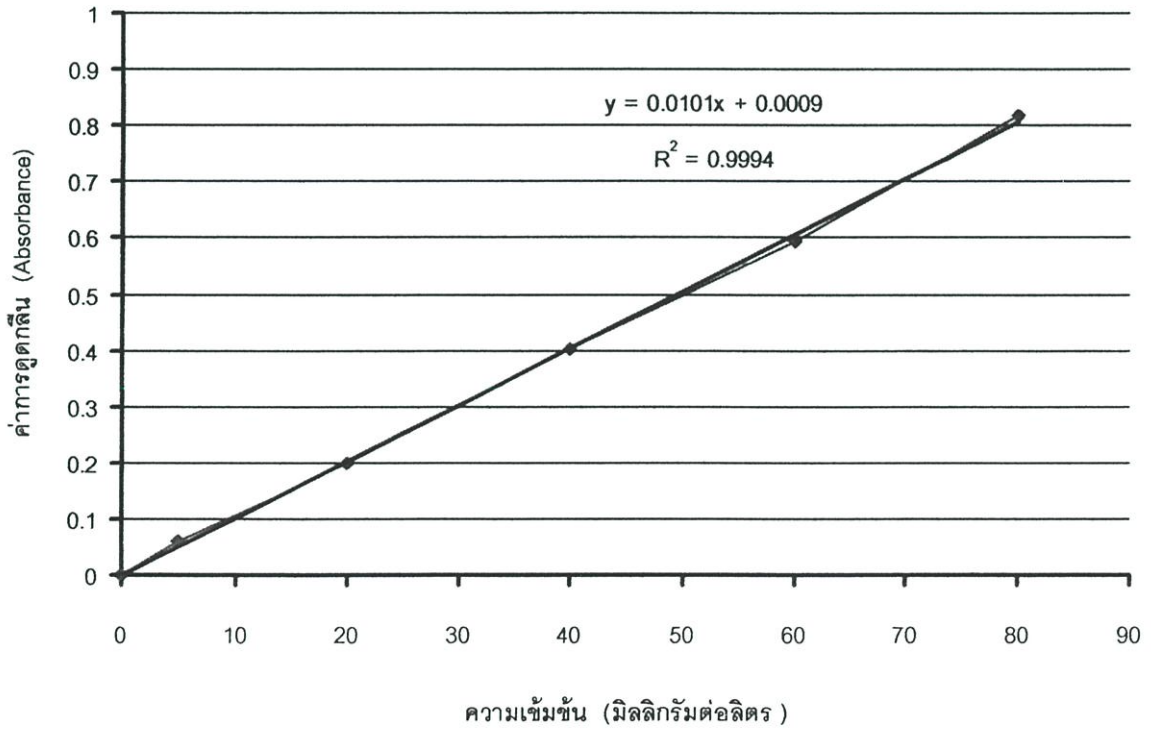
รูปที่ ก.4 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Red

ก.5 กราฟมาตรฐานของสีย้อม Reactive Yellow

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 400 นาโนเมตร

ตารางที่ ก.5 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อม Reactive Yellow

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
5	0.060
20	0.198
40	0.403
60	0.595
80	0.818



รูปที่ ก.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive Yellow

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการกำจัดสีย้อม Reactive

ข.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.1.1 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

พีเอช	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	1.12	1.12	1.27	1.17	0.08	7.46	98.83
5	13.39	13.54	13.84	13.59	0.23	1.70	86.41
7	20.36	17.48	17.78	18.54	1.58	8.52	81.46
9	52.18	51.42	51.87	51.82	0.38	0.73	48.18
12	82.48	85.96	84.75	84.40	1.76	2.09	15.60

ตารางที่ ข.1.2 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

พีเอช	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	0.49	0.32	0.32	0.38	0.09	25.28	99.62
5	1.90	1.72	2.14	1.92	0.20	10.83	98.08
7	32.22	30.65	31.48	31.45	0.79	2.50	68.55
9	41.98	40.10	39.58	40.54	1.27	3.12	59.46
12	62.55	62.72	62.47	62.58	0.13	0.20	37.42

ตารางที่ ข.1.3 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความ เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

พีเอช	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	0.32	0.37	0.47	0.38	0.07	19.50	99.62
5	20.61	22.33	20.07	21.00	1.18	5.60	79.00
7	28.99	29.04	28.99	29.01	0.02	0.09	70.99
9	34.53	33.99	36.49	35.00	1.31	3.75	65.00
12	78.30	78.80	77.55	78.55	0.25	0.31	21.45

ตารางที่ ข.1.4 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

พีเอช	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	0.48	0.42	0.53	0.48	0.06	12.05	99.52
5	11.05	12.37	11.86	11.76	0.67	5.66	88.24
7	19.27	19.44	22.37	20.36	1.74	8.57	79.64
9	31.45	31.51	31.39	31.45	0.05	0.18	68.55
12	78.88	79.00	79.11	79.00	0.11	0.15	21.00

ตารางที่ ข.1.5 ผลของพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

พีเอช	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	0.21	0.70	0.70	0.54	0.29	53.13	99.46
5	19.61	19.32	19.51	19.48	0.15	0.78	80.52
7	20.60	21.79	23.77	22.05	1.60	7.26	77.95
9	45.36	47.24	45.06	45.88	1.18	2.57	54.12
12	82.79	83.38	86.55	84.24	2.02	2.40	15.76

ข.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	97.01	97.01	93.28	95.77	2.15	2.25	4.23
5	44.03	44.63	44.78	44.48	0.40	0.89	55.52
10	15.07	15.52	15.82	15.47	0.38	2.42	84.53
15	6.27	6.27	6.57	6.37	0.17	2.70	99.63
20	3.43	3.88	4.02	3.78	0.31	8.21	96.22
25	3.88	3.13	2.84	3.28	0.54	16.39	96.72
30	2.39	2.39	2.84	2.54	0.26	10.19	97.46
45	1.64	2.09	2.39	2.04	0.38	18.41	97.96
60	2.39	2.54	2.69	2.54	0.15	5.88	97.46
90	4.48	3.37	2.99	3.73	0.75	20.00	96.27

ตารางที่ ข.2.2 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	95.24	95.24	99.21	96.56	2.91	2.37	3.44
5	25.79	25.95	25.95	25.90	0.09	0.35	74.10
10	9.21	9.29	9.21	9.23	0.05	0.50	90.77
15	5.79	5.71	5.71	5.74	0.05	0.80	94.26
20	5.71	5.64	5.64	5.66	0.05	0.80	94.34
25	3.33	3.57	3.49	3.47	0.12	3.50	96.53
30	0.08	0.16	0.08	0.11	0.05	43.30	99.89
45	0.08	0.08	0.16	0.11	0.05	43.30	99.89
60	0.08	0.08	0.16	0.11	0.05	43.30	99.89
90	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	99.92

ตารางที่ ข.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	93.75	91.67	95.83	93.75	2.08	2.22	6.25
5	69.67	69.75	69.67	69.69	0.05	0.07	30.31
10	43.83	43.92	44.00	43.92	0.08	0.19	56.08
15	40.92	41.00	41.10	41.00	0.83	0.20	59.00
20	3.83	3.92	4.00	3.92	0.08	2.13	96.08
25	1.83	1.92	2.08	1.94	0.13	6.55	98.06
30	1.00	0.92	0.83	0.92	0.08	9.10	98.08
45	0.92	0.75	0.67	0.78	0.13	16.37	99.22
60	1.17	1.00	0.67	0.94	0.25	26.96	99.06
90	0.92	1.17	0.67	0.92	0.25	27.27	99.08

ตารางที่ ข.2.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	97.14	98.57	95.71	97.14	1.43	1.47	2.86
5	11.66	11.60	11.60	11.62	0.03	0.28	88.38
10	4.46	4.51	4.57	4.51	0.06	1.27	95.49
15	1.60	1.66	1.71	1.66	0.06	3.45	99.34
20	1.37	1.49	1.31	1.39	0.09	6.28	98.61
25	1.37	1.31	1.20	1.30	0.09	6.74	98.70
30	0.51	0.51	0.57	0.53	0.03	6.19	99.47
45	0.51	0.51	0.57	0.53	0.03	6.19	99.47
60	0.11	0.23	0.11	0.15	0.07	43.30	99.85
90	0.11	0.23	0.17	0.17	0.06	33.33	99.83

ตารางที่ ข.2.5 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	91.74	89.45	87.16	89.45	2.30	2.56	10.55
5	33.39	33.49	33.58	33.48	0.09	0.27	66.52
10	6.61	6.79	6.61	6.67	0.11	1.59	93.33
15	6.70	6.79	6.61	6.70	0.09	1.37	93.30
20	5.23	5.32	5.42	5.32	0.09	1.72	94.68
25	4.86	4.77	4.86	4.83	0.05	1.10	95.17
30	2.75	3.03	2.84	2.87	0.14	4.88	97.13
45	2.57	2.67	2.39	2.54	0.14	5.52	97.46
60	2.57	2.66	2.39	2.54	0.14	5.52	97.46
90	2.48	2.48	2.48	2.48	0.00	0.00	97.52

ข.3 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.3.1 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	53.03	56.82	60.61	58.82	3.79	6.67	43.18
60	40.30	40.45	40.61	40.45	0.15	0.37	59.55
100	2.27	2.58	2.72	2.52	0.23	9.17	97.48
150	0.15	0.15	0.30	0.20	0.09	43.30	99.80
200	0.45	0.15	0.15	0.25	0.17	69.28	99.75

ตารางที่ ข.3.2 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	63.38	65.14	66.90	65.14	1.76	2.70	34.86
60	51.10	51.20	51.41	51.22	0.18	0.35	48.78
100	14.37	14.44	14.44	14.41	0.04	0.28	85.59
150	0.77	0.70	0.77	0.75	0.04	5.41	99.25
200	0.35	0.21	0.14	0.23	0.10	45.83	99.77

ตารางที่ ข.3.3 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	46.08	46.08	44.93	45.70	0.67	1.46	54.30
60	41.75	41.84	41.57	41.72	0.14	0.33	58.28
100	25.76	25.81	25.76	25.78	0.03	0.10	74.22
150	0.69	0.60	0.69	0.66	0.53	8.06	99.34
200	0.60	0.59	0.60	0.60	0.00	0.00	99.40

ตารางที่ ข.3.4 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	86.12	87.96	89.51	87.96	1.54	1.75	12.04
60	66.05	66.67	66.54	66.42	0.33	0.49	33.58
100	30.68	30.93	30.93	30.84	0.14	0.46	69.16
150	3.27	3.27	3.40	3.31	0.07	2.15	96.69
200	1.15	1.10	1.15	1.13	0.29	2.55	98.87

ตารางที่ ข.3.5 ผลของความเร็วรอบที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	74.77	77.10	74.77	75.55	1.35	1.79	24.45
60	70.00	70.19	70.10	70.10	0.09	0.13	29.90
100	39.63	39.53	39.63	39.60	0.05	0.14	60.40
150	9.81	9.91	10.00	9.91	0.09	0.94	90.09
200	8.69	8.69	8.79	8.72	0.05	0.62	91.28

ข.4 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.4.1 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็ก ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ขนาดของเศษผงเหล็ก (เมช)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
12-35	2.30	2.42	2.48	2.40	0.09	3.85	97.60
35-50	0.79	0.84	0.91	0.85	0.06	7.14	99.15
50-80	0.97	0.79	0.73	0.83	0.13	15.23	99.17
80-100	0.60	0.67	0.55	0.61	0.06	10.00	99.39
12-100	0.30	0.14	0.36	0.30	0.06	20.00	99.70

ตารางที่ ข.4.2 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็ก ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ขนาดของเศษผงเหล็ก (เมช)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
12-35	18.73	19.63	19.70	19.35	0.54	2.79	80.65
35-50	5.07	5.22	5.37	5.22	0.15	2.86	94.78
50-80	4.10	4.18	4.10	4.13	0.04	1.04	95.87
80-100	2.54	2.69	2.46	2.56	0.11	4.45	97.44
12-100	1.12	1.04	1.19	1.12	0.07	6.67	98.88

ตารางที่ ข.4.3 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็ก ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ขนาดของเศษผงเหล็ก (เมช)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
12-35	2.67	2.71	2.71	2.70	0.03	1.02	97.30
35-50	0.38	0.38	0.43	0.40	0.03	6.93	99.60
50-80	0.38	0.48	0.33	0.40	0.07	18.33	99.60
80-100	0.05	0.05	0.10	0.06	0.03	43.30	99.94
12-100	0.67	0.76	0.62	0.68	0.07	10.66	99.32

ตารางที่ ข.4.4 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็ก ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ขนาดของเศษผงเหล็ก (เมช)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
12-35	8.36	8.42	8.42	8.40	0.03	0.42	91.60
35-50	4.00	3.94	4.79	4.24	0.47	11.16	95.76
50-80	3.52	3.52	3.45	3.49	0.03	1.00	96.51
80-100	2.18	1.88	1.82	1.96	0.19	9.94	98.04
12-100	2.12	2.24	2.36	2.24	0.12	5.41	97.76

ตารางที่ ข.4.5 ผลของขนาดของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็ก ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ขนาดของเศษผงเหล็ก (เมช)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
12-35	88.48	87.50	86.79	87.59	0.85	0.97	12.41
35-50	6.79	6.61	6.70	6.70	0.09	1.33	93.30
50-80	6.07	6.16	6.25	6.16	0.09	1.45	93.84
80-100	2.14	2.95	2.59	2.56	0.40	15.73	97.44
12-100	0.71	0.63	0.71	0.69	0.05	7.53	99.31

ข.5 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.5.1 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5
เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร
เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	99.85
200	8.79	8.18	8.33	8.43	0.32	3.74	95.79
300	64.55	67.88	65.15	65.86	1.77	2.70	78.05
400	95.90	97.88	96.21	96.67	1.06	1.10	75.83
500	265.15	268.94	265.15	266.41	2.19	0.82	46.72

ตารางที่ ข.5.2 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue
เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร
เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	0.08	0.08	0.15	0.10	0.04	43.30	99.90
200	3.59	3.82	3.66	3.69	0.12	3.16	98.16
300	37.33	37.40	37.18	37.30	0.12	0.31	87.57
400	301.53	299.62	297.71	299.62	1.91	0.64	25.10
500	375.95	377.86	379.77	377.86	1.91	0.51	24.43

ตารางที่ ข.5.3 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	2.32	2.42	2.26	2.33	0.08	3.45	97.67
200	5.53	5.74	5.79	5.68	0.14	2.45	97.16
300	72.37	71.05	77.63	73.68	3.48	4.72	75.44
400	193.42	194.74	196.05	194.74	1.32	0.68	51.32
500	305.26	306.58	303.95	305.26	1.32	0.43	38.95

ตารางที่ ข.5.4 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	0.11	0.17	0.11	0.13	0.03	24.74	99.87
200	0.23	0.29	0.34	0.29	0.06	20.00	99.86
300	27.89	27.94	28.00	27.94	0.06	0.20	90.69
400	230.00	232.86	231.43	231.43	1.43	0.62	42.14
500	312.86	314.29	315.71	314.29	1.43	0.45	37.14

ตารางที่ ข.5.5 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช ปริมาณ 20 กรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	3.07	3.31	3.23	3.20	0.12	3.76	96.80
200	7.09	7.48	7.24	7.27	0.20	2.73	96.37
300	16.22	16.06	16.38	16.22	0.16	0.97	94.59
400	57.09	59.06	61.02	59.06	1.97	3.33	85.24
500	143.70	141.73	145.67	143.70	1.97	1.37	71.26

ข.6 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive

ตารางที่ ข.6.1 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณของเศษผงเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
2	86.81	90.28	83.33	86.81	3.47	4.00	13.19
6	76.39	79.86	83.33	79.86	3.47	4.35	20.14
10	54.72	50.83	52.22	52.60	1.98	3.74	47.41
20	5.14	2.08	4.44	3.89	1.60	41.19	96.11
60	0.28	0.56	1.11	0.65	0.42	65.47	99.35

ตารางที่ ข.6.2 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณของเศษผงเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
2	82.09	83.96	85.82	83.96	1.87	2.22	16.04
6	50.37	46.64	4.78	47.26	2.85	6.03	52.74
10	17.76	18.21	17.31	17.76	0.45	2.52	82.24
20	18.51	16.19	16.94	17.21	1.18	6.86	82.79
60	0.37	0.45	0.30	0.37	0.07	20.0	99.63

ตารางที่ ข.6.3 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณของเศษผงเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
2	79.27	80.49	75.61	78.46	2.54	3.24	21.54
6	54.88	57.32	51.22	54.47	3.07	5.63	45.53
10	51.22	50.00	47.56	49.59	1.86	3.76	50.41
20	3.07	3.02	2.98	3.02	0.05	1.61	96.98
60	1.46	1.56	1.41	1.48	0.07	5.04	98.52

ตารางที่ ข.6.4 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณของเศษผงเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
2	55.25	59.39	56.63	57.09	2.11	3.70	42.91
6	20.72	23.48	26.24	23.48	2.76	11.76	76.52
10	0.77	0.66	0.88	0.77	0.11	14.29	99.23
20	0.50	0.72	0.39	0.53	0.17	31.60	99.47
60	0.22	0.17	0.28	0.22	0.06	25.00	99.78

ตารางที่ ข.6.5 ผลของปริมาณของเศษผงเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เศษผงเหล็กขนาด 50-80 เมช เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที

ปริมาณของเศษผงเหล็ก (กรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
2	75.00	77.27	79.55	77.27	2.27	2.94	22.73
6	36.36	34.09	31.82	34.10	2.27	6.67	65.90
10	6.64	7.00	7.00	6.88	0.21	3.05	93.12
20	0.82	0.91	0.91	0.88	0.05	5.97	99.12
60	0.18	0.36	0.09	0.21	0.14	65.47	99.79

ข.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์ม

ตารางที่ ข.7.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Blue 5

น้ำหนัก (mg)	ปริมาตร (ml)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/mg)	$1/C_e$	1/q	log C_e	log q
100	50	100	82.18	0.009	0.01	112.21	1.91	-2.05
300	50	100	69.44	0.005	0.01	196.36	1.84	-2.29
500	50	100	50.74	0.005	0.02	203.01	1.71	-2.31
1000	50	100	3.89	0.005	0.03	208.09	0.59	-2.32
3000	50	100	0.65	0.002	1.54	603.91	-0.19	-2.78

ตารางที่ ข.7.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Blue

น้ำหนัก (mg)	ปริมาตร (ml)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/mg)	$1/C_e$	1/q	log C_e	log q
100	50	100	68.41	0.015	0.01	63.31	1.84	-1.80
300	50	100	43.53	0.009	0.02	106.26	1.64	-2.03
500	50	100	16.02	0.008	0.06	119.08	1.20	-2.08
1000	50	100	8.76	0.005	0.11	219.19	0.94	-2.34
3000	50	100	0.37	0.001	0.74	602.25	-0.43	-2.78

ตารางที่ ข.7.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Black

น้ำหนัก (mg)	ปริมาตร (ml)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/mg)	$1/C_e$	1/q	log C_e	log q
100	50	100	73.17	0.013	0.01	74.56	1.86	-1.87
300	50	100	56.50	0.008	0.02	113.54	1.67	-2.06
500	50	100	47.15	0.004	0.02	229.91	1.75	-2.36
1000	50	100	3.02	0.004	0.33	206.24	0.48	-2.31
3000	50	100	1.48	0.001	0.68	609.01	0.17	-2.78

ตารางที่ ข.7.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Red

น้ำหนัก (mg)	ปริมาตร (ml)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/mg)	$1/C_e$	1/q	log C_e	log q
100	50	100	58.01	0.020	0.02	47.63	1.76	-1.68
300	50	100	23.48	0.013	0.04	78.41	1.37	-1.89
500	50	100	0.77	0.009	1.29	100.78	-0.11	-2.00
1000	50	100	0.53	0.004	1.87	201.07	-0.27	-2.30
3000	50	100	0.22	0.001	4.53	601.33	-0.66	-2.78

ตารางที่ ข.7.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของสีย้อม Reactive Yellow

น้ำหนัก (mg)	ปริมาตร (ml)	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	q (mg/mg)	$1/C_e$	1/q	log C_e	log q
100	50	100	71.21	0.014	0.01	69.47	1.85	-1.84
300	50	100	34.85	0.010	0.03	92.09	1.54	-1.96
500	50	100	6.88	0.009	0.15	107.39	0.84	-2.03
1000	50	100	0.88	0.005	1.14	201.77	-0.06	-2.30
3000	50	100	0.21	0.002	4.71	601.28	-0.67	-2.78

ภาคผนวก ค

ค่า BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนัก ของสีย้อม Reactive

ค.1 ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive ก่อนการทดลอง

ตารางที่ ค.1.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.53	5.53	5.43	5.49	0.06	1.05
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	106.67	106.67	106.67	106.67	0.00	0.00
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.35	3.61	3.73	3.57	0.19	5.40
พีเอช	3.05	3.03	3.00	3.03	0.03	0.83

ตารางที่ ค.1.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.30	5.80	4.72	5.28	0.54	10.20
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	96.00	96.00	101.33	97.78	3.08	3.15
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.58	6.82	5.94	6.11	0.64	10.46
พีเอช	3.00	3.01	3.00	3.00	0.00	0.00

ตารางที่ ค.1.3 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	6.63	6.55	6.88	6.68	0.17	2.55
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	122.67	122.67	128.00	124.44	3.08	2.47
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.96	6.74	6.36	6.37	0.39	6.14
พีเอช	3.02	3.05	3.03	3.03	0.01	0.50

ตารางที่ ค.1.4 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.58	5.15	5.00	5.24	0.30	5.69
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	112.00	117.33	112.00	113.78	3.08	2.71
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.31	5.25	5.73	5.43	0.27	4.90
พีเอช	3.00	3.04	3.02	3.02	0.02	0.66

ตารางที่ ค.1.5 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.20	5.25	4.93	5.13	0.18	3.41
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	133.33	133.33	128.00	131.56	3.08	2.34
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4.70	4.21	4.18	4.36	0.29	6.70
พีเอช	3.01	3.00	3.03	3.01	0.01	0.51

ค.2 ค่า BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive หลังการทดลอง

ตารางที่ ค.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.20	1.70	1.23	1.71	0.49	28.54	68.85
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	32.00	32.00	37.33	33.77	3.08	9.12	68.34
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.65	0.58	1.31	0.85	0.41	48.00	76.19
พีเอช	5.94	6.03	6.04	6.00	0.06	0.92	-

ตารางที่ ค.2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.45	0.23	0.25	0.31	0.12	40.00	94.13
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	42.67	42.67	42.67	42.67	0.00	0.00	56.36
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.82	2.25	1.40	1.49	0.72	48.49	75.61
พีเอช	6.01	6.03	6.21	6.08	0.11	1.81	-

ตารางที่ ค.2.3 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.45	2.20	2.35	2.33	0.13	5.39	65.12
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	42.66	37.33	42.66	40.89	3.08	7.53	67.14
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.40	2.89	2.24	2.84	0.58	20.43	55.42
พีเอช	6.04	6.03	6.04	6.04	0.01	0.10	-

ตารางที่ ค.2.4 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.73	0.60	0.55	0.63	0.09	14.42	87.98
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	32.00	37.33	37.33	35.56	3.08	8.66	68.75
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.75	1.59	1.30	1.55	0.23	14.61	71.45
พีเอช	5.91	6.13	5.74	5.93	0.20	3.30	-

ตารางที่ ค.2.5 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช จากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.40	2.55	2.73	2.56	0.16	6.36	50.09
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	42.66	37.33	42.66	40.89	3.08	7.53	68.92
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.85	0.72	0.91	0.83	0.10	11.58	81.00
พีเอช	5.96	6.13	6.02	6.04	0.09	1.43	-

ค.3 ค่าปริมาณของโลหะหนักของสีย้อม Reactive ก่อนการทดลอง

ตารางที่ ค.3.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.13	0.18	0.25	0.19	0.06	32.16
Cr	0.33	0.26	0.23	0.27	0.05	18.37
Mn	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00

ตารางที่ ค.3.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.42	0.80	1.14	0.79	0.36	45.71
Cr	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00
Mn	0.04	0.07	0.11	0.07	0.04	49.09

ตารางที่ ค.3.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.09	0.15	0.16	0.13	0.04	30.51
Cr	0.02	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00
Mn	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00

ตารางที่ ค.3.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.14	0.16	0.24	0.18	0.05	29.24
Cr	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00
Mn	0.04	0.08	0.44	0.19	0.22	116.51

ตารางที่ ค.3.5 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.15	0.16	1.36	0.56	0.70	124.70
Cr	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00
Mn	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.00

ค.4 ค่าปริมาณของโลหะหนักของสีย้อม Reactive หลังการทดลอง

ตารางที่ ค.4.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	15.45	14.73	15.35	15.18	0.39	2.56
Cr	0.26	0.33	0.38	0.32	0.06	18.87
Mn	0.27	0.25	0.26	0.26	0.00	0.00

ตารางที่ ค.4.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	16.97	17.96	17.89	17.61	0.55	3.13
Cr	0.06	0.04	0.05	0.05	0.00	0.00
Mn	0.26	0.27	0.27	0.27	0.00	0.00

ตารางที่ ค.4.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Black โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	16.11	15.82	15.55	15.83	0.28	1.77
Cr	0.05	0.05	0.03	0.04	0.01	26.07
Mn	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00

ตารางที่ ค.4.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Red โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	14.48	7.79	12.11	11.46	3.39	29.60
Cr	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00
Mn	0.31	0.33	0.51	0.39	0.11	28.88

ตารางที่ ค.4.5 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Reactive Yellow โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	24.37	27.24	26.89	26.17	1.57	5.98
Cr	0.02	0.003	0.03	0.02	0.01	0.00
Mn	0.42	0.43	0.43	0.43	0.00	0.00

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาอันดับของปฏิกิริยาการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5

ง.1 ผลของอันดับของปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5

ตารางที่ ง.1.1 ผลของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

Co	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	ln C	ln Co	1/C	1/Co
50	5	17.33	17.18	17.18	17.23	0.09	0.51	2.85	3.91	0.06	0.02
	10	7.33	6.73	6.58	6.88	0.40	5.83	1.93	3.91	0.15	0.02
	15	2.03	2.03	2.33	2.13	0.17	8.21	0.76	3.91	0.47	0.02
	20	0.67	0.52	0.82	0.67	0.15	22.73	-0.41	3.91	1.50	0.02
	30	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	-2.80	3.91	16.50	0.02
100	5	48.03	48.79	47.27	48.03	0.76	1.58	3.87	4.61	0.02	0.01
	10	18.09	18.09	18.55	18.24	0.26	1.44	2.90	4.61	0.05	0.01
	15	5.21	5.36	5.21	5.26	0.09	1.66	1.66	4.61	0.19	0.01
	20	1.88	1.58	1.58	1.68	0.17	10.43	0.52	4.61	0.60	0.01
	30	0.36	0.06	0.36	0.26	0.17	66.62	-1.33	4.61	3.81	0.01
200	5	130.9	133.9	133.9	132.9	1.75	1.32	4.89	5.30	0.007	0.005
	10	81.06	81.06	84.85	82.32	2.19	2.66	4.41	5.30	0.012	0.005
	15	50.61	52.12	52.12	51.62	0.87	1.70	3.94	5.30	0.019	0.005
	20	35.61	35.61	39.39	36.87	2.19	5.93	3.61	5.30	0.027	0.005
	30	22.27	20.58	20.58	21.26	0.87	4.11	3.06	5.30	0.047	0.005
300	5	232.6	236.4	232.6	233.8	2.19	0.94	5.45	5.70	0.004	0.003
	10	153.0	153.0	156.8	154.3	2.19	1.41	5.04	5.70	0.006	0.003
	15	99.09	100.6	100.6	100.1	0.87	0.87	4.61	5.70	0.009	0.003
	20	67.27	67.27	68.79	67.78	0.87	1.29	4.22	5.70	0.015	0.003
	30	39.70	39.70	41.21	40.21	0.87	2.18	3.70	5.70	0.025	0.003
500	5	410.6	410.6	418.1	413.1	4.37	1.06	6.02	6.21	0.002	0.002
	10	274.2	270.5	270.5	271.7	2.19	0.80	5.60	6.21	0.003	0.002
	15	198.5	194.7	198.5	197.2	2.19	1.11	5.28	6.21	0.005	0.002
	20	160.6	156.8	160.6	159.3	2.19	1.37	5.07	6.21	0.006	0.002
	30	92.42	96.21	92.42	93.69	2.19	2.33	4.54	6.21	0.01	0.002

ตารางที่ ง.1.2 ผลของการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

T (°C)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	ln C	ln Co	1/C	1/Co
35	5	21.12	21.27	21.12	21.17	0.09	0.41	3.05	4.61	0.33	0.22
	10	6.58	6.58	6.72	6.63	0.09	1.32	1.89	4.61	0.53	0.22
	15	2.79	2.94	2.94	2.89	0.09	3.03	1.06	4.61	0.94	0.22
	20	1.27	1.42	1.42	1.37	0.09	6.37	0.32	4.61	3.15	0.22
	30	0.21	0.21	0.36	0.26	0.09	33.31	-1.34	4.61	-0.75	0.22
40	5	17.03	17.03	17.33	17.13	0.17	1.02	2.84	4.61	0.35	0.22
	10	4.76	4.76	4.91	4.81	0.09	1.82	1.57	4.61	0.63	0.22
	15	1.88	1.73	1.73	1.78	0.09	4.92	0.58	4.61	1.74	0.22
	20	1.12	0.67	0.82	0.87	0.23	26.64	-0.14	4.61	-7.10	0.22
	30	0.36	0.06	0.21	0.21	0.15	71.42	-1.55	4.61	-0.64	0.22
45	5	16.12	16.27	16.42	16.27	0.15	0.93	2.79	4.61	0.36	0.22
	10	4.15	4.15	4.45	4.25	0.17	4.11	1.45	4.61	0.70	0.22
	15	1.73	1.58	1.58	1.63	0.09	5.38	0.47	4.61	2.06	0.22
	20	0.67	0.51	0.51	0.56	0.09	15.46	-0.57	4.61	-1.76	0.22
	30	0.06	0.21	0.06	0.11	0.09	78.73	-2.20	4.61	-0.46	0.22
50	5	13.70	13.70	13.70	13.75	0.09	0.64	2.62	4.61	0.38	0.22
	10	3.10	3.24	3.10	3.14	0.09	2.78	1.14	4.61	0.87	0.22
	15	1.12	1.12	0.97	1.07	0.09	8.17	0.07	4.61	14.64	0.22
	20	0.21	0.36	0.51	0.36	0.15	41.67	-1.01	4.61	-0.99	0.22
	30	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	-2.80	4.61	-0.36	0.22

ภาคผนวก จ

การกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์

จ.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 โดยวิธีแบบคอลัมน์

ตารางที่ จ.1.1 ผลของความเข้มข้นต่าง ๆในการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5 เศษผงเหล็กขนาด 12-100 เมช 10 กรัม อัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 5 ถึง 30 นาที

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% กำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	5	0.21	0.36	0.21	0.26	0.09	33.31	99.74
	10	0.52	0.36	0.36	0.41	0.09	21.12	99.59
	15	1.42	1.42	1.42	1.42	0.00	0.00	98.58
	20	2.93	3.10	3.10	3.04	0.09	2.88	96.96
	30	4.15	4.45	3.85	4.15	0.30	7.30	95.85
300	5	3.09	3.09	3.24	3.14	0.09	2.78	98.95
	10	14.15	12.64	12.33	13.04	0.97	7.47	95.65
	15	15.21	15.21	15.06	15.16	0.09	0.58	94.95
	20	48.24	47.94	48.09	48.09	0.15	0.32	83.97
	30	94.60	94.76	94.91	94.76	0.15	0.16	68.41
500	5	7.18	7.33	7.49	7.33	0.15	2.07	98.53
	10	27.48	27.79	27.94	27.74	0.23	0.83	94.45
	15	39.76	39.76	40.06	39.86	0.17	0.44	92.03
	20	75.36	75.52	75.67	75.52	0.15	0.20	84.90
	30	175.76	175.76	179.55	177.02	2.19	1.24	64.60
1000	5	15.06	15.21	14.76	15.01	0.23	1.54	98.50
	10	66.88	67.18	67.33	67.13	0.23	0.34	93.29
	15	334.85	338.64	338.64	337.37	2.19	0.64	66.26
	20	687.12	683.33	690.91	687.12	3.79	0.55	31.29
	30	933.33	940.91	944.697	939.65	5.79	0.62	6.04

จ.2 ปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ จ.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช สีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.50	5.73	4.93	5.38	0.14	7.66
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	106.67	112.00	112.00	110.22	3.08	2.79
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.35	5.81	3.73	4.30	1.33	30.82
พีเอช	3.02	3.04	3.00	3.02	0.02	0.66

ตารางที่ จ.2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช สีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.73	2.13	2.03	1.96	0.21	10.63	63.56
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	42.67	37.33	32.00	37.33	5.33	14.29	66.13
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.77	1.57	0.49	0.94	0.56	59.46	78.14
พีเอช	5.94	6.01	6.21	6.05	0.14	2.31	-

จ.3 ค่าปริมาณของโลหะหนักของสีย้อม Reactive Blue 5

ตารางที่ จ.3.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	9.05
Cr	0.19	0.22	0.16	0.19	0.03	15.79
Mn	0.05	0.05	0.09	0.06	0.02	33.13

ตารางที่ จ.3.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	156.45	158.21	159.64	158.10	1.06	1.01
Cr	0.19	0.22	0.24	0.21	0.03	11.62
Mn	2.03	2.14	1.98	2.05	0.08	3.99

ภาคผนวก ฉ

การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆที่ใช้ในกำจัดสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ ฉ.1.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	199.50	198.25	200.00	199.25	0.90	0.45
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	506.67	506.67	506.67	506.67	0.00	0.00
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	45.55	44.0	45.76	45.11	0.96	2.13
พีเอช	3.03	3.02	3.05	3.03	0.01	0.50

ตารางที่ ฉ.1.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	68.25	69.75	69.25	69.08	0.76	1.10	65.33
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	234.67	234.67	229.33	232.89	3.08	1.32	54.04
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	26.82	26.28	26.10	26.40	0.37	1.41	41.48
พีเอช	6.17	6.24	6.31	6.24	0.07	1.12	-

ฉ.2 ค่าปริมาณของโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ ฉ.2.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	1.27	1.38	1.59	1.41	0.17	11.70
Cr	0.03	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00
Mn	0.07	0.13	0.08	0.09	0.03	34.38

ตารางที่ ฉ.2.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบแบทช์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	13.19	18.11	16.84	16.05	2.55	15.92
Cr	0.04	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00
Mn	0.70	0.45	0.43	0.53	0.15	28.65

ฉ.3 ค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ ฉ.3.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	214.45	210.75	207.50	210.90	3.48	1.65
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	506.67	512.00	516.82	511.82	5.07	0.99
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	45.55	48.00	45.76	46.44	1.36	2.93
พีเอช	3.09	3.05	3.06	3.07	0.02	0.68

ตารางที่ ฉ.3.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	70.75	70.50	73.50	71.58	1.67	2.36	66.06
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	256.00	245.33	240.00	247.11	8.15	3.30	51.72
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	22.82	24.29	22.59	23.23	0.92	3.97	49.98
พีเอช	6.32	6.27	6.36	6.32	0.05	0.72	-

ฉ.4 ค่าปริมาณโลหะหนักของสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม

ตารางที่ ฉ.4.1 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (ก่อนการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	1.44	1.01	1.85	1.43	0.42	29.55
Cr	0.09	0.04	0.04	0.06	0.03	54.46
Mn	0.03	0.15	0.09	0.09	0.06	68.03

ตารางที่ ฉ.4.2 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม โดยการทดลองแบบคอลัมน์ (หลังการทดลอง)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	158.59	160.52	163.65	160.92	2.55	1.58
Cr	0.21	0.10	0.35	0.22	0.13	58.12
Mn	0.29	0.39	1.82	0.83	0.86	102.82

ภาคผนวก ช

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ ช.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่พีเอชต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	13777.382	4	3444.345	2941.890	.000
	Within Groups	11.708	10	1.171		
	Total	13789.090	14			
Blue	Between Groups	8418.809	4	2104.702	4588.274	.000
	Within Groups	4.587	10	.459		
	Total	8423.396	14			
Black	Between Groups	9908.042	4	2477.011	3876.831	.000
	Within Groups	6.389	10	.639		
	Total	9914.432	14			
Red	Between Groups	11072.118	4	2768.030	3955.948	.000
	Within Groups	6.997	10	.700		
	Total	11079.115	14			
Yellow	Between Groups	12413.948	4	3103.487	1906.311	.000
	Within Groups	16.280	10	1.628		
	Total	12430.228	14			

ตารางที่ ช.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	24834.564	9	2759.396	2323.891	.000
	Within Groups	23.748	20	1.187		
	Total	24858.312	29			
Blue	Between Groups	23993.759	9	2665.973	5040.727	.000
	Within Groups	10.578	20	.529		
	Total	24004.337	29			
Black	Between Groups	31899.819	9	3544.424	7848.419	.000
	Within Groups	9.032	20	.452		
	Total	31908.851	29			
Red	Between Groups	24547.786	9	2727.532	13120.703	.000
	Within Groups	4.158	20	.208		
	Total	24551.944	29			
Yellow	Between Groups	20488.596	9	2276.511	4262.277	.000
	Within Groups	10.682	20	.534		
	Total	20499.278	29			

ตารางที่ ซ.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ความเร็วรอบในการเขย่าต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	8596.280	4	2149.070	743.589	.000
	Within Groups	28.901	10	2.890		
	Total	8625.181	14			
Blue	Between Groups	10760.611	4	2690.153	3843.075	.000
	Within Groups	7.000	10	.700		
	Total	10767.611	14			
Black	Between Groups	5622.188	4	1405.547	15169.957	.000
	Within Groups	.927	10	.093		
	Total	5623.115	14			
Red	Between Groups	17752.489	4	4438.122	8801.490	.000
	Within Groups	5.042	10	.504		
	Total	17757.531	14			
Yellow	Between Groups	12150.556	4	3037.639	8279.803	.000
	Within Groups	3.669	10	.367		
	Total	12154.225	14			

ตารางที่ ซ.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่เศษผงเหล็กขนาดต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	7.592	4	1.898	114.571	.000
	Within Groups	.166	10	.017		
	Total	7.758	14			
Blue	Between Groups	650.755	4	162.689	2411.633	.000
	Within Groups	.675	10	.067		
	Total	651.430	14			
Black	Between Groups	13.080	4	3.270	5.518	.013
	Within Groups	5.926	10	.593		
	Total	19.006	14			
Red	Between Groups	80.726	4	20.181	361.071	.000
	Within Groups	.559	10	.056		
	Total	81.285	14			
Yellow	Between Groups	16901.126	4	4225.282	22439.889	.000
	Within Groups	1.883	10	.188		
	Total	16903.009	14			

ตารางที่ ช.5 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	5315.158	4	1328.790	10533.687	.000
	Within Groups	1.261	10	.126		
	Total	5316.420	14			
Blue	Between Groups	18088.709	4	4522.177	35144.634	.000
	Within Groups	1.287	10	.129		
	Total	18089.996	14			
Black	Between Groups	8457.537	4	2114.384	6997.565	.000
	Within Groups	3.022	10	.302		
	Total	8460.558	14			
Red	Between Groups	11902.727	4	2975.682	119441.3	.000
	Within Groups	.249	10	.025		
	Total	11902.976	14			
Yellow	Between Groups	1395.089	4	348.772	4161.961	.000
	Within Groups	.838	10	.084		
	Total	1395.927	14			

ตารางที่ ช.6 การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองที่ปริมาณของเศษผงเหล็กต่าง ๆ ของสีย้อม Reactive ทั้ง 5 สี

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Blue 5	Between Groups	20032.688	4	5008.172	814.309	.000
	Within Groups	61.502	10	6.150		
	Total	20094.190	14			
Blue	Between Groups	13036.528	4	3259.132	1235.321	.000
	Within Groups	26.383	10	2.638		
	Total	13062.911	14			
Black	Between Groups	13793.859	4	3448.465	892.061	.000
	Within Groups	38.657	10	3.866		
	Total	13832.517	14			
Red	Between Groups	7390.282	4	1847.570	763.171	.000
	Within Groups	24.209	10	2.421		
	Total	7414.491	14			
Yellow	Between Groups	12970.194	4	3242.548	1657.406	.000
	Within Groups	19.564	10	1.956		
	Total	12989.758	14			

ภาคผนวก ซ

การ Regenerate ของเศษผงเหล็ก

ตารางที่ ซ.1 ผลของการ Regenerate สีย้อม Reactive Blue 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
100	5	0.52	0.36	0.21	0.36	0.15	41.67	99.64
	10	0.97	0.67	0.82	0.82	0.15	18.52	99.18
	15	62.03	59.00	60.52	60.52	1.52	2.50	39.48
	20	74.15	75.82	78.85	76.27	2.38	3.12	23.73
	30	89.00	90.82	94.76	91.94	2.94	3.21	8.06

ซ.2 ปริมาณ BOD, COD, SS, พีเอช และ โลหะหนัก ของการ Regenerate สีย้อม Reactive Blue 5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ซ.2.1 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 (ก่อนการ Regenerate)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	5.50	5.73	4.93	5.38	0.14	7.66
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	106.67	112.00	112.00	110.22	3.08	2.79
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	3.35	5.81	3.73	4.30	1.33	30.82
พีเอช	3.00	3.06	3.04	3.03	0.03	1.01

ตารางที่ ซ.2.2 ผลของค่าปริมาณ BOD, COD, SS และ พีเอช ของสีย้อม Reactive Blue 5 (หลังการ Regenerate)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์			เฉลี่ย	SD	% RSD	% การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
BOD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.98	1.88	2.28	2.04	0.21	10.20	62.08
COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	42.67	53.33	42.67	46.22	6.16	13.32	58.07
SS (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1.34	0.97	0.29	0.87	0.53	61.17	79.78
พีเอช	6.94	6.11	6.01	6.35	0.51	8.04	-

ตารางที่ ซ.2.3 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 (ก่อนการ Regenerate)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00
Cr	0.10	0.12	0.09	0.10	0.02	14.78
Mn	0.05	0.05	0.09	0.06	0.02	33.13

ตารางที่ ซ.2.4 ผลของค่าปริมาณโลหะหนักจากสีย้อม Reactive Blue 5 (หลังการ Regenerate)

โลหะหนัก	ปริมาณของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			เฉลี่ย	SD	% RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
Fe	160.12	158.11	159.96	159.40	1.12	0.70
Cr	0.24	0.26	0.19	0.22	0.03	12.03
Mn	1.98	1.97	2.14	2.03	0.09	4.70

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววรรณวิภา ผลาหาญ
วัน เดือน ปีเกิด	24 กุมภาพันธ์ 2522 ที่ปราจีนบุรี
ที่อยู่	12 หมู่ 7 ต.คำโตนด อ.ประจันตคาม จ.ปราจีนบุรี 25130
	โทรศัพท์ 0-1001-5011
ประวัติการศึกษา	2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี
	สถาบันราชภัฏสวนดุสิต
	2547 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง