ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม — **สาขา**

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม — **ภาควิชา**

เรื่อง การหาจุดเหมาะสมของกระบวนการตกและรวมตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว

Investigating an Optimization of Coagulation – Flocculation Process for Chemical Wastewater Treatment in Dyeing Textile Industry by Response Surface Statistical Methodology

นามผู้วิจัย นายราชิต สราทธพันธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาจุดเหมาะสมของกระบวนการตกและรวมตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว

Investigating an Optimization of Coagulation – Flocculation Process for Chemical Wastewater Treatment in Dyeing Textile Industry by Response Surface Statistical Methodology

โดย

นายราชิต สราทธพันธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ราชิต สราทธพันธ์ 2553: การหาจุดเหมาะสมของกระบวนการตกและรวมตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี ของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D. 113 หน้า

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสีย้อมเป็นองค์ประกอบด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยเทคนิคการตอบสนองที่พื้นผิว (response surface methodology (RSM)) สารตกตะกอน 4 ชนิดคือ $Ca(OH)_2$ $CaCO_3$ $FeCl_3$ และ $Al_2(SO_4)_3$ ถูกนำมาทดสอบการตกตะกอนสีย้อม Reactive black 5 (RB5) ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดสอบพบว่า $Ca(OH)_2$ ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และ ค่าซีโอดี ได้สูงที่สุดที่ร้อยละ 98.15 และ ร้อยละ 90.78 ตามลำดับ การหาจุดเหมาะสมในการตกและรวมตะกอนน้ำเสียสีสังเคราะห์ของ Reactive black 5 (RB5) Reactive red 198 (RR198) และ Reactive yellow 176 (RY176) ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ $Ca(OH)_2$ ด้วยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตกตะกอน และ ค่าความเป็นกรดด่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิดคือ สีย้อม RB5 ใช้ $Ca(OH)_2$ ปริมาณ 53 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 9.75 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดีเท่ากับ ร้อยละ 99.68 และร้อยละ 92.53 ตามลำดับ สำหรับการตกตะกอนสีย้อม RR198 และ RY176 ใช้ $Ca(OH)_2$ ปริมาณ 34 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 10 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีเท่ากับ ร้อยละ 99.47 และ ร้อยละ 91.74 สำหรับ RR198 และ ร้อยละ 99.40 และ ร้อยละ 91.71 สำหรับ RY176 จากนั้นทดลองหาจุดเหมาะสมการตกตะกอนสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ได้จากการผสมของสีย้อม RB5 RR198 และ RY 176 โดยใช้ข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าพบว่าใช้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ 46 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้มากกว่าร้อยละ 90.00 และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี ร้อยละ 88.46

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Rachit Sattapun 2010: Investigating an Optimization of Coagulation – Flocculation Process for Chemical Wastewater Treatment in Dyeing Textile Industry by Response Surface Statistical Methodology. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunlawit Satapanajaru, Ph.D. 113 pages.

The objectives of this study was to investigate the optimum condition for treating synthesis wastewater containing dye by chemical precipitation process using response surface methodology (RSM). Four coagulants, $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$, $FeCl_3$ and $Al_2(SO_4)_3$ were used to find the suitable coagulant in treating 250 mgL^{-1} of Reactive black 5 (RB5). The study indicated that $Ca(OH)_2$ dosage of 40 gL^{-1} at pH 7 gave the highest result, dye removal efficiency was 98.15% and COD removal efficiency was 90.78%.

The optimum $Ca(OH)_2$ dosages and pH in coagulation – flocculation process of synthesis wastewater containing 250 mgL^{-1} of Reactive black 5 (RB5), Reactive red 198 (RR198) and Reactive yellow 176 (RY176) were investigated by RSM. The removal efficiencies of RB5 and COD by $Ca(OH)_2$ dosage of 53 gL^{-1} at pH 9.75 were 99.68% and 92.53% respectively. The removal efficiencies of RR198 and RY176 and COD by $Ca(OH)_2$ dosage of 34 gL^{-1} at pH 10 were 99.47% and 91.74% for RR198 and 99.4% and 91.71% for RY176, respectively.

The optimal condition of mix dye solution for coagulant dosage and pH were 46 gL^{-1} $Ca(OH)_2$ at pH 10, respectively, where more than 90.00% removal efficiency of dye and 88.46% removal efficiency of COD can be obtained.

_____ _____ ____/____/____

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่ให้คำปรึกษาทั้งทางด้านการเรียน การค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำด้านต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้การช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณ พี่จรัญ ประจันบาล ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรมทางด้านสถิติ และการออกแบบการทดลองแบบสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยของผู้วิจัยเป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2551 สัญญาเลขที่ MRG-WII515S015 คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่ คุณแม่ และ พี่เอ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดทุกเรื่อง

ราชิต สราทธพันธ์

กันยายน 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	101
สรุป	101
ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	104
ภาคผนวก	109
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	113

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น และค่าTDS ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ของสารตกตะกอน 4 ชนิด 44

2 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เมื่อตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตรที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4 7และ10 46

3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และ RY176 เมื่อตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 10 47

4 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ด้วย $Ca(OH)_2$ 48

5 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ด้วย $Ca(OH)_2$ 48

6 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR176 ด้วย $Ca(OH)_2$ 48

7 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$ 49

8 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$ 50

9 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$ 51

10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 53

11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 54

13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 54

14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 55

15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 55

16 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 57

17 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 58

18 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 59

19 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 60

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

20 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 61

21 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 62

22 การทดสอบการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 67

23 ค่าสถิติ Durbin – Watson การวิเคราะห์การถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 71

24 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง 72

25 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรในแต่ละการทดลอง 73

26 เปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงและผลการทำนายจากแบบจำลองประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร 86

27 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีผสม ด้วย $Ca(OH)_2$ 89

28 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$ 90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
29	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	91
30	ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	93
31	การทดสอบการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov สำหรับการตกตะกอนน้ำสีผสม	94
32	ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจากการวิเคราะห์การถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม โดยใช้ $Ca(OH)_2$	96
33	ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง	97
34	เปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงและผลการทำนายจากแบบจำลองประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	100

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ	9
2	ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบ central composite design ที่มีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัย	40
3	Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5	64
4	Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198	65
5	Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176	66
6	Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5	68
7	Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198	69
8	Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176	70
9	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย	74
10	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย	75
11	ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย	76
12	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	79

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	80
14	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	81
15	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	83
16	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	84
17	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	85
18	การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรภายหลังจากการบำบัดด้วยสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง	88
19	normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีผสม	94
20	Scatter plotของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีผสม	95
21	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีผสม จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย	98
22	กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร	99

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การหาจุดเหมาะสมของกระบวนการตกและรวมตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว

Investigating an Optimization of Coagulation – Flocculation Process for Chemical Wastewater Treatment in Dyeing Textile Industry by Response Surface Statistical Methodology

คำนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วโดยมีการใช้สีย้อมที่แตกต่างกันเป็นปริมาณมากทำให้น้ำทิ้งจากโรงงานมีสีย้อมหลายชนิดปนเปื้อนในปริมาณสูง ส่งผลให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมาตราฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมค่าซีโอดี ต้องไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้สีย้อมยังส่งผลให้เกิดการบดบังการส่องผ่านของแสงแดด ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ส่งผลต่อสมดุลของระบบนิเวศวิทยาในแหล่งน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการลดปริมาณสีย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สำหรับวิธีในการบำบัดสีย้อมทางเคมีมีหลายวิธี เช่น Fenton Oxidation (Ormad *et al*., 2006), UV/ Fenton oxidation (Lucas and Peres, 2006) หรือ Ozonation (Kishimoto *et al*., 2005) เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างแพง การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีตกตะกอนร่วม (coagulation/flocculation) เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ง่ายและลงทุนต่ำที่สุดโดยใช้สารตกตะกอน ซึ่งมีอยู่หลายชนิดเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต พอลิเมอร์ เกลือของเหล็ก เป็นต้น ซึ่งราคาของสารเหล่านี้และประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกันไป และบางครั้งระบบบำบัดทางเคมีถูกออกแบบมาไม่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียจริงของโรงงานนั้น ทำให้ต้องมีการใส่สารเคมีเพิ่มเติมเป็นจำนวนมากในระบบบำบัด ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายของผู้ประกอบการ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างสารตะกอน สภาวะ (condition) และคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานจริง โดยออกแบบการทดลองเพื่อหาความเหมาะสม (optimization) ของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนร่วม (coagulation/flocculation) โดย ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง แล้วนำผลการทดลองนั้นมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยหลักการของ response surface methodological analysis (RSM) จะนำมาสู่การตัดสินใจของผู้ประกอบการในการเลือกชนิด ปริมาณของสารเคมี และสภาวะที่เหมาะสม ที่จะใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมนั้นๆ และ สามารถลด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าใช้จ่ายในค่าสารเคมีส่วนเกินในการบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนเคมีที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย

RSM เป็นเทคนิคทางสถิติใช้สำหรับออกแบบการทดลอง การสร้างแบบจำลอง และการประเมินผลกระทบของหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งสามารถหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อลดจำนวนของการทดลองลง (Khuri and Cornell, 2003) นอกจากนี้ RSM ยังเป็นโมเดลที่ใช้ในการทำนายค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียอีกด้วย (Wang *et al*., 2007) มีการนำ RSM มาประยุกต์ใช้ในการประเมินหาตัวแปรที่เหมาะสมของระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม อาทิเช่น Bacaoui *et al*. (2002) ศึกษาถึงปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมเพื่อบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม หรือจากการทดลองของ Ahmad *et al*. (2007) ที่ทำการทดลองหาความเหมาะสมของการใช้สารเคมีตกตะกอนพวกอะลัม ในน้ำเสียโรงงานกระดาษที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยสูง โดยทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติโดยหลักการของ response surface methodological analysis พบว่าปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของโรงงานกระดาษนั้นอยู่ที่ 1045 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 6.75 และจากการทดลองของ Wang *et al*. (2007) ได้ทำการทดลองหาความเหมาะสมของการใช้สารเคมีตกตะกอนพวกอะลูมินัมคลอไรด์ พอลิเมอร์ chitosan-*g*-PDMC ในน้ำเสียโรงงานกระดาษที่มีค่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยสูง โดยทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติโดยหลักการของ RSM พบว่า ปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของโรงงานอยู่ที่ 759 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของโรงงานอยู่ที่ 22.3 มิลลิกรัมต่อลิตรและ ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5.4 จากการทดลองของ Ahmed *et al*. (2007) และ Wang *et al*. (2007) พบว่าถึงแม้จะเป็นโรงงานประเภทเดียวกัน และระบบตกตะกอนอย่างเดียวกันแต่ให้ค่าปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากลักษณะ คุณสมบัติ และความเข้มข้นของน้ำเสียในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ RSM ในงานด้านสิ่งแวดล้อมและอุตสาหกรรมอื่นอีกเช่น ใช้วิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลในการกำจัดสีย้อมจากตัวดูดซับชนิดใหม่ (Ravikumar *et al*., 2005) หรือในการหาค่าที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียทางไฟฟ้าเคมีของโรงฟอกย้อม (Korbahti, 2007)

ปัญหาการใช้สารเคมีปริมาณมากในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นปัญหาหลักผู้ประกอบการให้ความสนใจ จึงพัฒนาโครงการวิจัยชิ้นนี้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาชนิดและปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะสีย้อมจากโรงงานต้นแบบจริง เพื่อลดการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสียทางเคมีและนำมาสู่การลดค่าใช้จ่ายของผู้ประกอบการ นอกจากนี้ยังเป็นต้นแบบให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุตสาหกรรมชนิดอื่นที่มีการปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อม หรือมีน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี สูง และมีระบบบำบัดน้ำเสียแบบ coagulation/flocculation แต่ใช้สารเคมีชนิดอื่นได้นำไปประยุกต์ใช้ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

เพื่อหาชนิด ปริมาณสารตกตะกอนและปัจจัยที่เหมาะสม ในการบำบัดน้ำเสียสีสังเคราะห์ของ RB5 RR198 และ RY176

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. สีย้อม

สีย้อม (dyestuffs) เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด ละลายในน้ำบางชนิดจะสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ใช้ประโยชน์ในการย้อมเส้นใยของผ้า โดยโมเลกุลของสีย้อมจะซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยและทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว จากนั้นอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อม การที่อิเล็คตรอนในพันธะคู่ในโมเลกุลของสีย้อมมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปคตรัมที่ต่างกัน ทำให้สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆกันไป จึงทำให้เรามองเห็นโมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกันแสดงสีออกมาแตกต่างกันไป โดยสามารถแบ่งสีย้อมตามแหล่งที่มาได้ 2 ประเภท (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2550)

ก สีย้อมธรรมชาติ (natural dyestuffs) เป็นสีย้อมที่ได้มาจากการแปรรูปวัตถุดิบจากธรรมชาติ โดยอาจมาจากสัตว์และพืช เช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม ที่ได้จากพืช หรือ สีม่วงแดงจากครั่ง ที่ได้จากสัตว์เป็นต้น

ข สีย้อมสังเคราะห์ (synthetic dyestuffs) เป็นสีย้อมที่ได้มาจากกระบวนการสังเคราะห์ หรือกรรมวิธีทางเคมี

โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม

การที่สีย้อมแต่ละชนิดสามารถแสดงสีสันที่แตกต่างกันออกมาให้สายตามนุษย์ได้เห็นนั้น เกิดจากโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมแต่ละชนิดที่แตกต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไป โดยโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมมีส่วนประกอบสำคัญที่เป็นตัวทำให้เกิดสี 2 ส่วน (ชีวนันท์, 2552) คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ก หมู่โครโมฟอร์ (chromophore group)

เป็นกลุ่มอะตอมพันธะคู่ ที่ทำให้สีย้อมเกิดสี โดยหมู่โครโมฟอร์จะเกิดการสั่น และการดูดกลืนแสง เมื่อมีโมเลกุลของแสงมาเกิดการตกกระทบ โดยหมู่โครโมฟอร์จะดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่น ทำให้สายตาของเราสามารถมองเห็นสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน ตัวอย่างหมู่โครโมฟอร์ ได้แก่ หมู่ไนโตรโซ (-N=O) และหมู่เอโซ (N=N) เป็นต้น

ข หมู่ออกโซโครม (auxchrome group)

เป็นกลุ่มอะตอมที่สร้างลักษณะความเข้มของสี และคุณสมบัติในการดูดติดกับเส้นใย ตัวอย่างหมู่ออกโซโครม ได้แก่ซัลโฟนิกแอซิด ($-So_3Na$) คลอไรด์ (-Cl) และไฮดรอกซิล (-OH) เป็นต้น

2. ประเภทของสีย้อม

โดยปกติการจำแนกสีย้อมอาจจำแนกได้หลายประเภท แต่นิยมจำแนกตามความต้องการในการนำไปใช้มากที่สุด โดยสามารถจำแนกประเภทของสีย้อมตามวิธีใช้ออกได้ 11 ประเภท (ส.ส.ท., 2550) คือ

2.1 สีเอซิด (acid dye) ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน และบางชนิดสามารถใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่าน และไนล่อนได้ โดยกลไกในการติดสีจะเป็นการเกิดพันธะไอออนนิคกับวัตถุที่ต้องการย้อม สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ และละลายน้ำได้ดี แต่สีประเภทนี้ไม่ทนต่อการซัก และไม่ทนเหงื่อ

2.2 สีไดเร็กท์ (direct dye) นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยผ้า และยึดจับด้วยพันธะไฮโดรเจน สีประเภทนี้เป็นสารประกอบอะโซน้ำหนักโมเลกุลสูง และสามารถละลายน้ำได้ สีชนิดนี้ไม่ค่อยทนทานต่อการซัก แต่มีความทนทานต่อแสงแดด

2.3 สีเบสิก (basic or cationic dye) ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิก ในการย้อมโมเลกุลสีที่เป็นประจุลบจะยึดจับโมเลกุลของเส้นใย โดยสีชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ และละลายน้ำได้ เป็นสีที่มีความทนทาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 สีดิสเพอร์ส (disperse dye) สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี ในการย้อมจะใช้สารพา เพื่อช่วยในการเร่งอัตราการดูดซึมสีเข้าไปในเส้นใย ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ และความดันสูง สีดีสเพอร์สเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี และมีคุณสมบัติทนแสง และทนการซักฟอกได้ดี หากพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อมจะสามารถแบ่งสีประเภทนี้ออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dye) และสีย้อมแอมมิโน แอนทราคิวโนน (amino antraquinone)

2.5 สีรีแอคทีฟ (reactive dye) เหมาะที่สุดในการใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยในกระบวนการยึดจับกับวัสดุที่ต้องการย้อม โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ของเซลลูโลส และจับกันด้วยพันธะโควาเลนท์ สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ และมีสมบัติเป็นด่างเมื่อละลายน้ำ โดยอาจแบ่งสีประเภทนี้ออกได้เป็น 2 ประเภทตามสภาวะที่ใช้ในการย้อม คือกลุ่มที่ย้อมติดในอุณหภูมิปกติ และชนิดที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูงที่ 70-75 องศาเซลเซียส สีชนิดนี้มีความทนทานในเกือบทุกสภาวะ

2.6 สีอะโซอิค (azoic dye) สามารถใช้ย้อมเส้นใยได้หลายชนิด เช่น เซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท โดยในขั้นตอนการย้อมต้องมีการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลก่อน จากนั้นจึงทำการย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ และไม่ค่อยทนต่อการขัดถู

2.7 สีแว็ต (vat dye) ในการย้อมสีประเภทนี้ต้องมีการเตรียมสีให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้สีย้อมถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปเกลือแล้วซึมเข้าไปในเส้นใยผ้า จากนั้นเมื่อนำผ้านั้นไปผึ่งสีในเส้นใยจึงจะถูกรีดิวซ์และเกาะติดกับเนื้อผ้า สีแว็ตไม่สามารถละลายน้ำได้และมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

2.8 สีมอร์แดนท์ (mordant dye) ใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน และเส้นใยโพลีเอไมด์ โดยจำเป็นต้องมีการเติมสารประกอบของออกไซด์ของโลหะ เพื่อใช้เป็นสารช่วยย้อมให้เกิดการติดสีบนเส้นใย ลักษณะของสีประเภทนี้คือมีโมเลกุลใหญ่ และละลายน้ำได้

2.9 สีอินเกรน ใช้ในการย้อมฝ้าย และเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.10 สีออกซิเดชั่น (oxidation dye) นิยมใช้สีชนิดนี้ในการย้อมฝ้าย และขนสัตว์ ในการจับตัวกับวัสดุที่ต้องการย้อม จะอาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใยของวัสดุที่ต้องการย้อม เป็นสีที่ละลายน้ำ

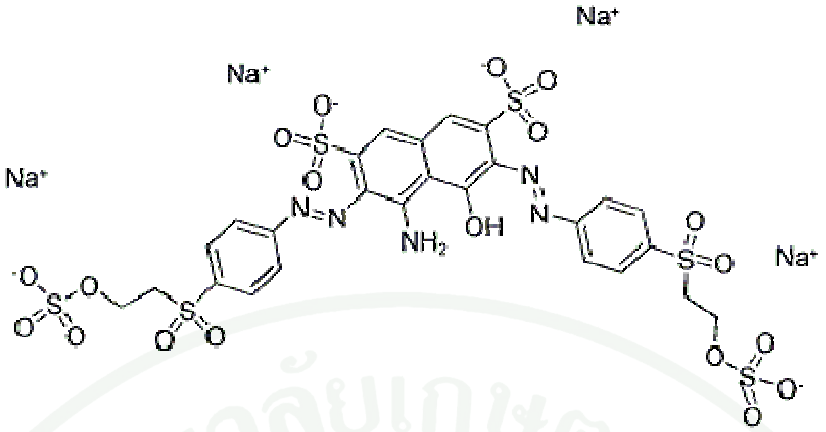
2.11 สีซัลเฟอร์ (sulfer dye) ใช้ในการย้อมสีฝ้ายโดย เมื่อย้อมต้องทำการรีดิวซ์สีย้อมให้อยู่สภาพที่ละลายน้ำเนื่องจากสีชนิดนี้ปกติไม่ละลายน้ำ

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าสีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม รวมทั้งความเหมาะสมและวิธีการใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมแต่ละประเภทให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์และความต้องการจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ

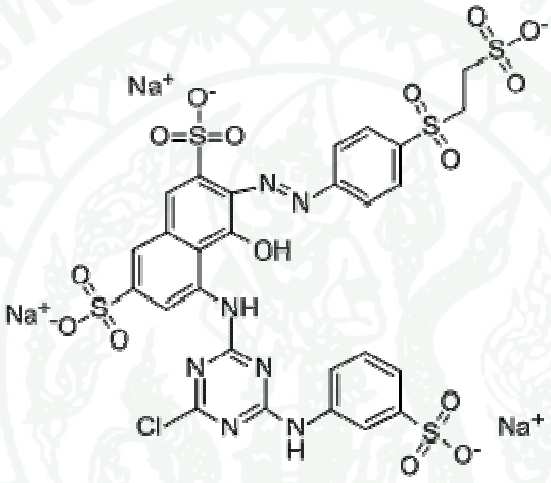
3. สีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีที่มีคุณสมบัติเฉพาะ คือ สามารถละลายในน้ำได้ เมื่อแตกตัวเป็นไอออนในสารละลายแล้วมีประจุเป็นลบ เมื่อทำปฏิกิริยากับเส้นใยเซลลูโลสจะเกิดการยึดจับกันด้วยพันธะโควาเลนต์กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีความคงทนในการซักที่สูง แต่พบว่าในขั้นตอนการย้อมผ้าหรือเส้นใยด้วยสีรีแอคทีฟนั้น จะมีสีตกค้างอยู่ปริมาณสูงในน้ำล้าง เพราะความสามารถในการดูดซึมสีเข้าสู่เส้นใยอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำเนื่องจากไอออนของสีรีแอคทีฟมีประจุลบ เช่นเดียวกับประจุลบที่เกิดบนผิวของเส้นใยที่ต้องการย้อม ทำให้เกิดการต่อต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคสีรีแอคทีฟ ทำให้สีไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้สะดวก จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารจำพวก โซเดียมคลอไรด์ หรือโซเดียมซัลเฟต ซึ่งเป็นสารอิเล็คโทรไลท์ หรือเกลืออินทรีย์ เพื่อทำหน้าที่ในการลดประจุลบบนผิวหน้าเส้นใย ทำให้การดูดซึมสีย้อมเข้าสู่เส้นใยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และมีการใช้การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระจายตัว และควบคุมการทำปฏิกิริยา ในขั้นตอนที่สีย้อมทำการดูดซึมเข้าสู่เส้นใย จะมีการดำเนินการในสภาวะที่เป็นกลาง แต่หลังจากที่สีย้อมมีการแทรกซึมเข้าไปในเส้นใยได้สม่ำเสมอแล้วจะมีการเติมสารละลายด่างเพื่อกระตุ้นให้หมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยมีความว่องไว และพร้อมทำปฏิกริยากับสีย้อมได้อย่างรวดเร็ว แต่ในกระบวนการย้อมมักจะมีสีย้อมบางส่วนสูญเสียไปพร้อมกับน้ำ เนื่องจากสีย้อมรีแอคทีฟสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย (ชีวนันท์, 2552) และเมื่อทำการจำแนกสีรีแอคทีฟตามลักษณะโครงสร้าง โดยพิจารณาจากหมู่โครโมฟอร์มในโมเลกุล พบว่าสีรีแอคทีฟจะถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสีเอโซ (azo dyes) ซึ่งมีหมู่เอโซจำนวนหนึ่งหมู่หรือมากกว่าเป็นหมู่โครโมฟอร์ และมีออกโซโครมได้หลายกลุ่ม โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟบางชนิดแสดงในภาพที่ 1

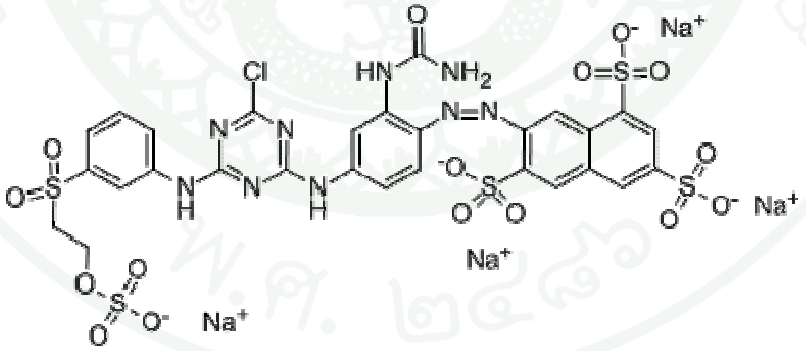
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก) Reactive black 5



(ข) Reactive red 198



(ค) Reactive yellow 145

ภาพที่ 1 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ

ที่มา: ChemicalBook (2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. อุตสาหกรรมฟอกย้อม

การดำเนินการของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นกระบวนการที่วัตถุดิบสิ่งทอ ในรูปของเส้นด้าย หรือผ้าดิบ จะถูกเปลี่ยนให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปเพื่อนำไปใช้ในการผลิตขั้นต่อไป หรือจำหน่าย โดยในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องมีการใช้ วัตถุดิบจำพวกสารเคมีจำนวนมาก เช่นสีย้อม กรด ด่าง และสารปรับปรุงคุณภาพ รวมทั้งใช้น้ำในกระบวนการผลิตจำนวนมาก โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมจัดเป็นอุตสาหกรรมขั้นกลางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (ส.ส.ท., 2550) กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ดังนี้ (พิศมัย, 2543)

4.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมผ้า เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากการฟอกย้อม ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้าย หรือผ้าดิบจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อเป็นการเตรียมให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีได้เป็นอย่างดี โดยขั้นตอนการเตรียมผ้ามีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ

ก เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่เจือปนในเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความขาวสะอาดและมีการดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่างๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยปกติเส้นด้าย หรือผ้าดิบที่ออกจากโรงปั่น หรือโรงทอไม่ว่าจะเป็นเส้นด้าย หรือผ้าที่ทำมาจากใยธรรมชาติ จะต้องมีสิ่งสกปรกต่างๆติดมาด้วยเสมอ เช่นพวกสารหล่อลื่นที่มีการเติมลงไปในขั้นตอนการปั่นเส้นใยสังเคราะห์ แป้งที่ใช้ลงเส้นด้ายยืนที่ใช้ในการทอผ้า และสิ่งสกปรกปนเปื้อนต่างๆที่เส้นใยอาจติดมาในระหว่างขั้นตอนต่างๆก่อนถึงการเตรียม เป็นต้น หากไม่กำจัดให้หมดอาจส่งผลกระทบในขั้นตอนการย้อมพิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จ

ข เพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี เพื่อให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จดำเนินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดเวลา และสารเคมี

ค เพื่อช่วยให้การย้อมพิมพ์ หรือตกแต่งสำเร็จ เกิดผลตามที่ต้องการอย่างเต็มที่

ง เพื่อทำให้เส้นใยมีการดูดติดสี และสารเคมีได้มากขึ้น

จ เพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในระหว่างขั้นตอนการตกแต่งอื่นๆในภายหลัง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการที่ใช้ในการเตรียมผ้า มีอยู่หลายประการดังนี้คือ

4.1.1 การเผาขน (Singeing)

ในเส้นด้ายที่ปั่นจากใยผ้า มักจะมีปลายเส้นใยโผล่มาเหนือพื้นผิวของเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อนำไปทอเป็นผืนผ้า การเสียดสีที่เกิดขึ้นระหว่างการทอปลายเส้นใยที่โผล่ผิวเส้นด้ายนี้ มีผลทำให้พื้นผิวผ้าดูไม่เรียบ และทำลายความเงามันของผ้า จึงต้องมีการกำจัดเส้นใยดังกล่าวโดยใช้ความร้อน เรียกกระบวนการนี้ว่า การเผาขน โดยมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญดังนี้

ก เพื่อให้ผ้ามีพื้นผิวที่ดูเรียบ และมีความเงามันดีขึ้น

ข ทำให้ลายพิมพ์ในกระบวนการพิมพ์ผ้ามีความคมชัดยิ่งขึ้น

ค การเผาขนสามารถลดปัญหาการเกิดขุยบนผ้าในผ้าใยสังเคราะห์

4.1.2 การลอกแป้ง (Desizing)

เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็นสำหรับผ้าทอ เนื่องจากจำเป็นต้องมีการลงแป้งบนเส้นด้ายยืนในกระบวนการทอผ้า แต่เมื่อนำผ้าทอไปทำการฟอกย้อม แป้งที่เคลือบอยู่บนเส้นด้ายจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการฟอกย้อม จึงจำเป็นที่จะต้องขจัดออกไป โดยขั้นตอนลอกแป้งมีความสำคัญดังนี้

ก ทำให้ผ้ามีคุณสมบัติในการเปียกน้ำได้ดี ทำให้การตกแต่งผ้าในขั้นต่อไปทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข ทำให้ผ้ามีคุณสมบัติในการดูดติดสี และสารเคมีอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผืน

ค ทำให้ผ้ามีความนุ่มในการสัมผัส ไม่หยาบและแข็งกระด้าง

สารลงแป้งนี้ประกอบด้วยสารหลายชนิด เช่นแป้งธรรมชาติ แป้งดัดแปลง สารสังเคราะห์ สารสังเคราะห์สามารถกำจัดออกได้ง่ายโดยใช้น้ำสบู่ที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับแป้งธรรมชาติมีปัญหาในการกำจัดออก เนื่องจากไม่ละลายน้ำ ซึ่งการลอกแป้งสามารถทำได้ 4 วิธี ดังนี้

ก การหมัก (rot steeping) กรรมวิธีประกอบด้วยการจุ่มผ้าให้เปียกแล้วหมักไว้ที่อุณหภูมิห้อง ปล่อยให้แบคทีเรียในน้ำ และอากาศย่อยสลาย ต้องใช้เวลานานมาก (ประมาณ 30 ชั่วโมง)

ข การใช้กรด (acid steeping) ใช้กรดทำปฏิกิริยากับแป้ง ความเข้มข้นของกรด และอุณหภูมิเป็นตัวแปรในการทำปฏิกิริยา แต่ต้องระวัง ปัญหาเรื่องที่กรดอาจทำลายเส้นใย

ค การใช้เอนไซม์ (enzymatic desizing) เนื่องจากเอนไซม์เป็นสารชีวเคมีที่มีความจำเพาะเจาะจงสูง ดังนั้น เวลาเกิดปฏิกิริยากับสารจะเกิดแบบจำเพาะเจาะจงกับชนิดของสาร เช่น เอนไซม์ amylase จะเกิดปฏิกิริยากับแป้งเท่านั้น ไม่เกิดกับเส้นใยจึงไม่ทำละลายเส้นใย

ง การกำจัดแป้งด้วยสารออกซิไดซิง ได้แก่สารประกอบเปอร์ซัลเฟต หรือเปอร์ออกไซด์ เช่นโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($Na_2S_2O_8$) โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ข้อดีของการใช้วิธีนี้คือ จะได้ผ้าที่ขาวกว่าวิธีอื่นๆ แต่อาจมีการทำลายเส้นใยถ้าหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป

4.1.3 การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring)

หมายถึงการกำจัดไขมันและสารปนเปื้อนต่างๆ ทั้งสารประกอบพวกเกลือทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ จัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับวัสดุสิ่งทอทุกประเภท เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมักจะต้องมีสิ่งสกปรกเจือปนมาด้วยเสมอ ไม่ว่าจะติดมาจากธรรมชาติ หรือขั้นตอนการทอ จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดออกไปเพื่อให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำได้ดี และสามารถดูดติดสีและสารเคมีอย่างสม่ำเสมอ กรรมวิธีในการขจัดสิ่งสกปรกของเส้นใยแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับปริมาณ และชนิดของสิ่งสกปรกในเส้นใย โดยเส้นใยธรรมชาติ จะมีสิ่งสกปรกมากกว่าเส้นใยสังเคราะห์ โดยสารเคมีและปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรกมีดังนี้

ก โซดาไฟ (Sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันให้เป็นสบู่ละลายน้ำได้ และทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆถูกกำจัดออกได้ง่ายขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข น้ำสบู่ (Detergents) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นอิมัลชั่นและกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆออกจากวัสดุรวมทั้งป้องกันมิให้ย้อนกลับไปติดบนวัสดุอีก

ค สารจับโลหะ (complexing agents) เป็นพวกลิแกน (ligands) หรือคีเลต (chelates) สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอิออนของโลหะ เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะด่าง ปกติสารประกอบเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาพด่างปกติ มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)

4.1.4 การฟอกขาว (bleaching)

คือ การกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีความจำเป็น โดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และสำหรับผ้าที่จะถูกนำไปย้อมสีอ่อน สารที่จะใช้ในการฟอกขาวมีหลายชนิด ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

ก สารออกซิไดซ์ ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรด์ (NaClO) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ($Ca(OCl)_2$) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ ($NaClO_2$) เป็นต้น

ข. สารรีดิวซ์ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ($Na_2S_2O_4$) โซเดียมฟอร์มาลดีไฮด์ซัลฟอกซิเต ($HCHOHSO_2Na.2H_2O$) การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้จะได้ความขาวที่ไม่ถาวรเรียกว่า temporary white

4.1.5 การชุบมัน (Mercerization)

เป็นการทำให้ผ้ามีความสามารถในการดูดซับน้ำและสีย้อมดีขึ้น รวมทั้งมีความเงามัน และความแข็งแรงมากขึ้น โดยทำการชุบมันผ้าหรือเส้นด้ายฝ้าย และเส้นใยผสมด้วยสารละลายโดยจุดมุ่งหมายในการทำกระบวนการชุบมันมีเพื่อเตรียมและปรับปรุงความสามารถในการดูดติดสีของเส้นด้าย หรือเนื้อผ้า เพื่อเพิ่มความสดใสและเงามันของเนื้อผ้า และเพื่อเพิ่มความคงทนแข็งแรง และปรับปรุงความคงตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดย ประเภทของการชุบมัน แบ่งตามสารเคมีที่ต้องใช้ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

ก การชุบมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือคอสติกโซดา

สารละลายด่างประเภทที่มีคุณสมบัติคล้ายๆกัน ที่สามารถนำมาใช้เป็นสารชุบมัน ได้แก่ สารละลายลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แต่โดยส่วนมากนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า เนื่องด้วยข้อจำกัดของสารละลายอีก 2 ประเภท การชุบมันสามารถทำได้ทั้งในรูปผ้าผืน (ผ้าทอและผ้าถัก) และเส้นด้าย

ข การชุบมันด้วยแอมโมเนียเหลว

การชุบมันด้วยแอมโมเนียมเหลว สารชุบมันจะต้องอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวบริสุทธิ์ปราศจากน้ำผสมอยู่ และเนื่องจากเครื่องจักรชุบมันมีความซับซ้อน และประกอบด้วยอุปกรณ์หลายส่วนจึงทำให้มีความยุ่งยากในการจัดการ และควบคุม แต่การชุบมันด้วยแอมโมเนียเหลวนี้ เวลาที่ใช้ในการชุบมันจะสั้นกว่าวิธีการชุบมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.1.6 การเซทด้วยความร้อน

ผ้าใยสังเคราะห์เป็นสารพวกพลาสติก หากผ่านกระบวนการย้อม พิมพ์ หรือตกแต่งที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส อาจเกิดปัญหาผ้าหดตัว จึงต้องมีการนำผ้าไปเซทที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ผ้าจะต้องพบในขั้นถัดไป โดยอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเซทนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย และคุณสมบัติที่ต้องการ แต่กระบวนการเซทด้วยความร้อนจะทำให้เส้นใยมีการดูดติดสีลดลง ดังนั้นในการเซทผ้าจึงต้องระมัดระวังให้ผ้าได้รับความร้อนและแรงดึงอย่างสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด มิฉะนั้นอาจเกิดปัญหาย้อมติดสีไม่เท่ากันในภายหลัง

4.2 การให้สี (Textile Dyeing)

วัตถุสิ่งทอส่วนใหญ่ต้องมีการให้สีก่อนนำไปใช้งาน หลักการย้อมสี คือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารเคมีที่เป็นสารละลาย ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม ในที่นี้คือ เส้นใย เนื้อผ้า หรือฝ้าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แล้วทำให้วัสดุที่ต้องการจะย้อมเกิดการติดสีอย่างสมบูรณ์ โดยการเกิดสีบนวัสดุจะเกิดตลอดบนพื้นผิวตัดขวางของวัสดุด้วย ไม่ได้เกิดการติดสีเฉพาะผิวหน้าของวัสดุ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ขั้นตอนการย้อมมีวิธีการดังนี้ คือ ผ้าดิบที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้ว จะนำไปย้อมให้สีย้อมติดบนเส้นใยของผ้าด้วยเครื่องย้อม (Dyeing machine) โดย สีย้อมจะถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย แล้วให้เส้นใยของผ้าทำการดูดซึมสารละลายสีย้อม แรงที่เกิดระหว่างการจับตัวของโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย อาจเป็น พันธะโควาเลนซ์ พันธะอิออนนิค หรือแรงแวนเดอร์วาล ดังนั้น ประสิทธิภาพ และความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดอยู่บนเส้นใย จะมีผลจาก ปัจจัยด้านระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดด่าง และสารเคมีช่วยย้อมต่าง

ส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อการย้อม คือ

4.2.1 ชนิดของเส้นใย

เส้นใยที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

ก เส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้าย ขนสัตว์ เป็นต้น

ข เส้นใยประดิษฐ์ เช่น เรยอง ไนล่อน อะคลิริค โพลีเอสเตอร์ เป็นต้น

เส้นใยธรรมชาติจะย้อมติดสีง่ายกว่าเส้นใยประดิษฐ์ เนื่องจากดูดซึมน้ำได้ดี และเมื่อเปียกน้ำจะมีการพองตัวได้มาก โมเลกุลของสีย้อมจึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ง่าย ในขณะที่เส้นใยประดิษฐ์ จะมีโครงสร้างของเส้นใยที่แน่นมาก จึงดูดซึมน้ำได้น้อย และสีย้อมแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ยากการย้อมจึงเกิดขึ้นยากกว่า ดังนั้นในการเลือกชนิดของสีย้อมที่จะใช้จึงต้องมีการเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของเส้นใย

4.2.2 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมมีหลายชนิด ประสิทธิภาพของการย้อมจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีย้อม กับเส้นใยที่จะทำการย้อม จะต้องมีมากกว่าความสามารถที่โมเลกุลของสีย้อมจะรวมตัวกับน้ำ สีย้อมที่มักใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มักเป็นพวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารไฮโดรคาร์บอน ที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากน้ำมันปิโตรเลียม โดยสีย้อมแต่ละชนิด จะมีความเหมาะสมกับเส้นใยแต่ละชนิด แตกต่างกัน และมีวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณลักษณะของสีย้อมที่ดีควรเป็นดังนี้ คือ

ก มีความเข้มสูง และสามารถละลายหรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารละลายได้

ข มีแรงดึงดูด หรือแรงยึดติดกับเส้นใยสูง

ค คงทนต่อกระบวนการ ผลิต กระบวนการซัก และการใช้งาน

ง ให้ความปลอดภัย และความสะดวกในการใช้งาน รวมทั้งมีราคาที่เหมาะสม

4.2.3 กรรมวิธีการย้อม

กรรมวิธีการย้อมผ้ามีหลายวิธี ทั้งแบบต่อเนื่อง และแบบไม่ต่อเนื่อง โดยในการเลือกใช้วิธีการย้อม สิ่งที่ควรคำนึงถึงได้แก่ คุณลักษณะของเส้นใย หรือผ้าที่จะย้อม ประเภทของเครื่องจักรในโรงงาน ค่าใช้จ่าย และประโยชน์ใช้สอยของวัสดุที่จะย้อม กรรมวิธีการย้อมเส้นด้ายและย้อมผ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

ก การย้อมแบบดูดซึม (Exhaust Method)

การย้อมแบบนี้ วัสดุที่จะถูกย้อมจะถูกแช่ หรือหมุนในอ่างย้อม จนกระทั้งมีการย้อมเสร็จสมบูรณ์ โดยเครื่องย้อมที่ใช้กันจะมีหลายชนิด เช่น เครื่องวินซ์ เครื่องจิกเกอร์ เครื่องย้อมแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักผ้าที่จะย้อม ต่อน้ำหนักสารละลายสีย้อมที่จะใช้ย้อม แตกต่างกันไปตามแต่ประเภทของเครื่อง

ข การย้อมด้วยวิธีกึ่งต่อเนื่อง (Exhaust Method)

การย้อมด้วยวิธีนี้สามารถเรียกอีกอย่างว่า Pad-Batch Dyeing จะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. การอัดน้ำสีและด่าง ในขั้นตอนนี้สีย้อม และด่างจะถูกผสมลงไปพร้อมกันในอ่างย้อม จากนั้นจะทำการผ่านวัสดุที่ต้องการจะย้อมลงไปในสารละลายที่เตรียมไว้ และจะมีการใช้ลูกกลิ้งเพื่อรีดเอาสารละลายสำหรับย้อมบางส่วนออก จากนั้นผ้าหรือวัสดุที่ต้องการย้อมจะถูกม้วนเก็บไว้ด้วยลูกกลิ้ง เพื่อเตรียมนำไปเก็บในขั้นต่อไป สิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องมีการควบคุมสำหรับขั้นตอนนี้ คือ ความเข้มข้นของสีย้อม และแรงอัดของลูกกลิ้ง เพื่อให้ได้ วัสดุที่ผ่านการย้อมที่มีระดับความเข้มตามต้องการ

2. การม้วนเก็บ ภายหลังจากที่ผ้าหรือเส้นใยผ่านการย้อม จะถูกนำไปเก็บในลักษณะที่ม้วนอยู่บนลูกกลิ้ง เพื่อให้สีย้อมได้มีเวลาเพียงพอที่จะแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยก่อนที่จะมีการนำไปเก็บ โดยม้วนผ้าจะถูกห่อหุ้มด้วยฟิลม์พลาสติค เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ซึ่งระยะเวลาในการเก็บจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสี โดยสีที่มีความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาสูงจะมีระยะเวลาในการเก็บที่ต่ำกว่าสีที่มีความว่องไวของปฏิกิริยาน้อยกว่า

ค การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง (Continuous method)

ในวิธีการนี้ ผ้า หรือวัสดุที่ต้องการจะย้อมจะมีการเคลื่อนที่ไปตามขั้นตอนการย้อมต่างๆ อย่างต่อเนื่อง โดยที่ไม่มีการหยุดรอ อยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งในกระบวนการผลิต วิธีนี้จึงจัดเป็นวิธีการย้อมที่เร็วที่สุด และเหมาะกับการผลิตจำนวนมาก ขอเสียของวิธีการย้อมแบบนี้คือ หากเกิดข้อผิดพลาดในขั้นตอนใด ขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการย้อม อาจเกิดความเสียหายเป็นวงกว้างก่อนที่ปัญหาจะถูกค้นพบ และได้รับการแก้ไข ดังนั้นก่อนดำเนินการย้อมด้วยวิธีนี้จึงต้องมีการเตรียมการอย่างระมัดระวัง นอกจากนี้ในขั้นตอนการย้อมแบบต่อเนื่อง การอัดสีและด่างจะใช้สภาวะที่รุนแรงกว่ามาก และการผนึกสีจะใช้ไอน้ำ หรือความร้อนแห้ง โดยผู้ผลิตต้องเลือกสภาวะที่จะทำให้การผนึกสีเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นที่สุด เพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดตามความต้องการ

4.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งกระทำเป็นขั้นสุดท้ายหลังจากการเตรียมและให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเป็นการปรับปรุง หรือเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ โดยสามารถจำแนกประเภทของการตกแต่งสำเร็จได้เป็น 2 ประเภท คือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.3.1 การจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่ง

ก การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอโดยใช้เครื่องจักรในการผลิตให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น การตกแต่งเพื่อควบคุมการหดตัวของผ้า การตกแต่งเพื่อให้ผ้ามีความเงามันเรียบลื่น การตกแต่งด้วยกระบวนการตระกรุยขน การตกแต่งด้วยกระบวนการตัดขน และการตกแต่งเพื่อให้ผ้านุ่ม เป็นต้น

ข การตกแต่งด้วยสารเคมี (Chemical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอด้วยสารเคมีเพื่อให้สิ่งทอมีคุณสมบัติตามต้องการ โดยอาจใช้สารเคมีธรรมชาติ เช่น แป้ง หรือสารสังเคราะห์ เช่น โพลีเอทิลีน เรซิน หรือสารตกแต่งผ้านุ่ม เป็นต้น

4.3.2 การจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่ง

ก ประโยชน์ใช้งาน โดยจะทำการพิจารณาถึงประโยชน์ใช้งานเป็นหลัก เช่นจะตกแต่งให้ผ้าแข็ง เมื่อผ้านั้นมีความบางและนุ่มมากเกินไปจนลำบากในการตัดเย็บ หรือเมื่อต้องการเพิ่มความแข็งแรงคงทนของเนื้อผ้า การตกแต่งให้ผ้านุ่มเมื่อต้องการนำผ้านั้นไปใช้ผลิตเสื้อผ้าเด็ก และการตกแต่งให้ผ้ามีคุณสมบัติการคืนตัวต่อรอยยับได้ดี เพื่อใช้ในการตัดเย็บเป็นชุดทำงาน เป็นต้น

ข การตกแต่งผ้าที่ใช้เน้นในเรื่องของการบำรุงรักษาให้ใช้ได้ดี และสวยงามตลอด ยกตัวอย่างในกรณีของผ้าตกแต่งจำพวก ผ้าม่าน หรือผ้าคลุมเตียง ซึ่งการใช้งานมักจะถูกสัมผัสอยู่ตลอดเวลายากแก่การซักล้าง ผู้ผลิตจึงต้องมีการตกแต่งผ้าให้กันน้ำ เพื่อให้คงความสวยงามอยู่ได้ ทำให้ไม่ต้องนำไปซักบ่อย เป็นการถนอมผ้าไม่ให้เสื่อมเร็ว

ค การตกแต่งที่เน้นในเรื่องความปลอดภัยของการใช้ผ้าเป็นหลัก เช่นการตกแต่งไม่ให้เนื้อผ้ามีการติดไฟง่าย และสามารถหยุดการลุกลามต่อในเนื้อผ้า การตกแต่งกันแบคทีเรีย และเชื้อรา เป็นต้น

ง การตกแต่งเพื่อให้เกิดความสวยงาม หรือเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผ้า ซึ่งเป็นการตกแต่งางเชิงกลเป็นส่วนมาก เช่นการตกแต่งผ้าให้มีความเงามัน การตกแต่งเพื่อควบคุมการหดตัว เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. หลักการกระบวนการตกและรวมตะกอน

กระบวนการตกและรวมตะกอน (coagulation – flocculation) เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ หรือสิ่งสกปรกในน้ำหลายๆอนุภาคจับตัวกันเป็นก้อน (เรียกว่า ฟล้อค หรือ floc)ซึ่งสามารถรวมตัวกันและตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ โดยกระบวนการตกและรวมตะกอนมี 2 ขั้นตอน (มั่นสิน, 2542)

ก ต้องทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่นลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง

ข ภายหลังจากที่อนุภาคคอลลอยดืถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว จะมีโอกาศที่แต่ละอนุภาคจะสัมผัสกันได้ง่ายกว่าเดิม ในขั้นตอนนี้จึงต้องทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มาสัมผัสกันให้มากที่สุด และเมื่ออนุภาคต่างๆมาสัมผัสกันแล้วควรที่จะมีการเกาะติดกัน และหลุดจากกันได้น้อยที่สุด

5.1 พฤติกรรมของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยในน้ำได้เป็นเวลานานโดยไม่ตกตะกอน ซึ่งระบบคอลลอยด์หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆกระจายอยู่ทั่วไปในสารตัวกลางที่มีสถานะเป็นเนื้อเดียว อนุภาคต่างๆจะเรียกว่า Dispersed Phase ส่วนสารตัวกลางเรียกว่า Dispersing Phase หรือ Dispersed Medium จากหลักการนี้จึงบอกได้ว่าลักษณะที่สำคัญที่สุดของระบบคือ บทบาทของผิวสัมผัสระหว่าง Dispersed Phase และ Dispersing Phase ซึ่งขนาดที่เล็กมากของ Dispersed phase จะทำให้น้ำหนักไม่มีความสำคัญเทียบเท่ากับพื้นที่ผิวของสาร

5.1.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคของคอลลอยด์อาจมีประจุบวกหรือประจุลบก็ได้ และการที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค ซึ่งทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพกระจายตัวอยู่ในน้ำได้ โดยอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้ามาจากหลายสาเหตุดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ก ความไม่บริสุทธิ์ของผลึกสาร

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์อาจได้มาจากการแลกเปลี่ยนไอออน ของผลึกอนุภาคกับไอออนภายนอกซึ่งมีประจุไม่เท่ากัน เช่นในโครงสร้างผลึกของอนุภาคดินเหนียว จะมีการแทนที่ของ Si^{4+} ด้วย Al^{3+} ซึ่งทำให้อนุภาคดินเหนียวแสดงอำนาจของประจุลบ

ข ประจุไฟฟ้าของอิออนที่ถูกดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์

อนุภาคคอลลอยด์หลายชนิดมีประจุไฟฟ้าบนผิว เนื่องจากสามารถดูดไอออนบางชนิดมาติดบนผิวได้ ไอออนที่ถูกดูดติดเรียกว่า Peptizing Ions โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำมักชอบดูดไอออนลบมากกว่าไอออนบวก เพราะไอออนบวกมักมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ จึงเป็นเหมือนสิ่งกีดขวางการจับตัวของอิออนบวก และอนุภาคคอลลอยด์

ค การละลายตัวของไอออน

อนุภาคคอลลอยด์บางชนิดจะเกิดประจุไฟฟ้าในตัว หากไอออนต่างชนิดกันที่ประกอบกันเป็นอนุภาค ละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน

ง การแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group

การแตกตัวเป็นไอออนของ Functional Group เป็นสาเหตุทำให้คอลลอยด์หลายชนิดได้ประจุไฟฟ้า เช่นการแตกตัวของหมู่อมิโน หรือหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งมักขึ้นกับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำ

5.1.2 Electric Double Layer Theory

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer Theory เนื่องจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์สามารถสร้างแรงดึงดูดที่ทำให้ไอออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำวิ่งเข้ามาหาได้ จึงทำให้ไอออนประจุบวกมาแออัดกันอยู่ใกล้ผิวอนุภาคคอลลอยด์ ไอออนบวกพวกนี้เรียกว่า Counter Ion ความหนาแน่นของไอออนบวกจะมีค่าสูงสุดบริเวณที่อยู่ใกล้กับอนุภาคคอลลอยด์ และจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากอนุภาคคอลลอยด์มีค่าเพิ่มากขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากประจุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลบของอนุภาคคอลลอยด์ที่บริเวณพื้นผิว จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด (Nernst Potential) และจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างออกไป จนถึงตำแหน่งนึ่งซึ่งศักย์ไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้บริเวณพื้นที่นั้นมีการกระจายตัวของไอออนบวกและลบเป็นไปตามปกติ ตามทฤษฎีเชื่อว่า ไอออนบวกที่อยู่ใกล้ที่สุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ โดยระยะห่างระหว่างผิวของอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุดเรียกว่า Stern Layer ส่วนเปลือกชั้นนอกมีค่าเรียกว่า Diffuse layer ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปจนถึงตำแหน่งที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

ศักย์ไฟฟ้าบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง แต่จะทำการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ค่าที่คำนวณได้เรียกว่า Zeta Potential (Z_p) โดยบทบาทของซีตาโพเทนเชียลมีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจากใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ ระบบคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพสูงจะมีค่าซีตาโพเทนเชียลสูงด้วย แต่หากระบบคอลลอยด์มีเสถียรภาพที่ต่ำ ก็จะมีค่าซีตาโพเทนเชียลที่ต่ำ

5.1.3 เสถียรภาพของคอลลอยด์

คอลลอยด์จะถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่เกิดการตกตะกอน แต่เมื่อคอลลอยด์เกิดการตกตะกอนและแยกตัวออกจากน้ำจะถือว่าคอลลอยด์นั้นสูยเสียเสถียรภาพไป ซึ่งเสถียรภาพของคอลลอยด์จะขึ้นอยู่กับแรงดึงดูด และแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดูดคอลลอยด์จึงจะสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้ หากแรงดึงดูดระหว่างกันมีมากกว่าแรงผลักอนุภาคคอลลอยด์จะจับกันเป็นก้อน หรือฟล้อคได้ ทำให้คอยลอยด์ไม่มีเสถียรภาพและเกิดการตกตะกอน

5.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

เนื่องจากเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงผลักซึ่งเกิดจากการชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ และแรงดูดซึ่งเป็นแรง van der Waals ซึ่งเป็นแรงที่เกิดตามธรรมชาติของอนุภาคขนาดเล็ก และของโมเลกุล หากแรงผลักมีมากกว่าแรงดูดจะทำให้อนุภาคของคอลลอยด์มีเสถียรภาพและแขวนลอยในน้ำได้ แต่หากแรงดูดสูงกว่าแรงผลักอนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพ และไม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ซึ่งการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้โดยอาสัยกลไก 4 แบบ คือ

5.2.1 โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย

การเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์ เป็นการเพิ่มจำนวน Counter Ion ในชั้นกระจาย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหักล้างของประจุตรงข้ามกันเนื่องจากไอออนบวกไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ อำนาจของประจุลบจึงไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ส่งผลให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ซีตาโพเทนเชียลจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย ในการทำลายสเถียรภาพของคอลลอยด์ โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย ด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆ มีข้อน่าสนใจดังนี้

ก ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์

ข ไม่สามารถเปลี่ยนประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์เป็นประจุตรงกันข้ามได้ ไม่ว่าจะเติม Counter Ion มากเท่าไหร่ก็ตาม

5.2.2 โดยการทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (กลไกแบบดูดติดผิว)

สารเคมีบางหมู่ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับคอลลอยด์สามารถที่จะดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้า และทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แต่จะมีข้อแตกต่างจากกลไกแบบแรกคือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิว จะเป็นแบบสตอยชิโอเมตริค คือ ปริมาณของสารตกตะกอนที่ใช้เพิ่มหรือลดลงตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ และกลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้เป็นประจุตรงข้ามกับของเดิม หากมีการใช้ปริมาณสารตกตะกอนมากเกินไป

5.2.3 โดยห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

หากมีการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำ ในปริมาณที่พอเพียงจะมีการตกผลึกเกิดขึ้น โดยอนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าว หรืออาจจับตัว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รวมกับผลึก ซึ่งทำให้คอลลอยด์เกิดการสูญเสียเสถียรภาพเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของขนาด และน้ำหนัก จึงเกิดการตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำได้ โดยชนิดของสารตกตะกอน เช่น สารส้ม เฟอร์ริคคลอไรด์ และปูนขาว สามารถทำให้เกิดการตกตะกอนได้ด้วยการสร้าง $Al(OH)_3$ $Fe(OH)_3$ และ $CaCO_3$ ซึ่งเป็นผลึกสารที่ไม่ละลายน้ำ เรียกว่ากลไก Sweep floc Coagulation

ในกลไกแบบที่ 3 นี้การตกตะกอนไม่จำเป็นต้องเกิดเมื่อ ซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำสุด เพราะไม่มีความจำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวอนุภาคของคอลลอยด์ แต่ค่าความเป็นกรดด่างจะมีผลต่อประสิทธิภาพของกลไกการตกตะกอนแบบนี้ เนื่องจากความสามารถของสารตกตะกอนแต่ละตัวในการตกผลึกจะมีค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมแตกต่างกัน

5.2.4 โดยการใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาค

สารอินทรีย์โพลีเมอร์ต่างๆมักมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่มาก และอาจเป็นสารที่มีประจุหรือไม่ก็ได้ ซึ่งสามารถใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ แต่การทำลายเสถียรภาพด้วยวิธีนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกที่กล่าวมาแล้วทั้ง 3 แบบแต่จะอธิบายได้ด้วยทฤษฎีที่เรียกว่า Polymer Bridging จากทฤษฎีนี้โมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง โดยการเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกัน หรือแรงปฏิกิริยาเคมีระหว่างโพลีเมอร์และคอลลอยด์ ซึ่งอนุภาคคอลลอยด์ที่มีโพลีเมอร์เกาะอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะกับอนุภาคอื่นต่อไป จะถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว และสามารถไปเกาะกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีสายของโพลีเมอร์เป็นเหมือนสะพานเชื่อม และจับตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น

6. การบำบัดน้ำเสียทางเคมี

เป็นการเติมสารเคมีที่เหมาะสมลงในน้ำเสียที่ต้องการบำบัด ใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เพื่อกำจัดหรือแยกสารปนเปื้อนในน้ำเสีย ในการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมีนี้ต้องมีการ เลือกชนิด และปริมาณสารเคมีที่ใช้บำบัดให้เหมาะสม เพื่อนอกจากจะเป็นการให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุด แล้วยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายที่อาจจะเพิ่มขึ้นมาจากการใช้สารเคมีที่มากเกินไป และการจัดการกับตะกอนเคมีส่วนเกินจำนวนมากภายหลังการบำบัด (วีระ, 2545)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.1 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี

เป็นการตกตะกอนสารปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อรวมสิ่งสกปรกในน้ำเสียให้อยู่ในรูปตะกอน และทำการรวมตะกอนในน้ำเสียให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้เกิดการตกตะกอนออกจากน้ำ โดยกระบวนการหลักในขั้นตอนนี้มี 2 กระบวนการคือ กระบวนการสร้างตะกอน (coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (flocculation) โดยในขั้นแรกจะเติมสารสร้างตะกอน (coagulant) ลงในน้ำเสียเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอนของสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำแยกออกจากน้ำเสีย และอาจมีการเติมสารรวมตะกอน (flocculant) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน

กระบวนการในการใช้สารเคมีทำให้ตกตะกอน จะต้องมีกระบวนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอน คือ

ก การกวนเร็ว (rapid mixing) เพื่อให้สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนกระจายเข้าเป็นเนื้อเดียวและทำปฏิกิริยากับน้ำเสียอย่างทั่วถึง ทำให้อนุภาคสารพร้อมจะยึดติดกัน

ข การกวนช้า (slow mixing) เป็นการทำให้อนุภาคสารสัมผัสกันและรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น มีน้ำหนักมากพอที่จะจมสู่เบื้องล่าง แยกออกจากน้ำเสีย

ค การทิ้งให้ตกตะกอน (settle) ภายหลังจากอนุภาคตะกอนรวมตัวมีขนาดใหญ่เพียงพอจะมีการทิ้งให้เกิดการตกตะกอนตกลงสู่เบื้องล่าง แยกชั้นออกจากน้ำเสีย

ขั้นตอนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียโดยการตกและรวมตะกอนดังที่ได้กว่าไปแล้วในข้างต้นนั้น สามารถอธิบายโดยรวมได้ว่า เริ่มต้นน้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่ถังกวนเร็วถังแรก จากนั้นจะทำการเติมสารสร้างตะกอน (coagulant) ลงไปในน้ำเสีย และทำการกวนน้ำเสียอย่างรวดเร็วด้วยเครื่องกวนเร็ว เพื่อให้เกิดการผสมของสารตกตะกอนอย่างทั่วถึงกับน้ำเสีย ระยะเวลาการกักเก็บน้ำในถังแรกประมาณ 1-3 นาที จากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังถังที่ 2 ซึ่งเป็นถังรวมตะกอน หรือถังกวนช้า ในขั้นตอนนี้น้ำเสียในถังจะถูกกวนอย่างช้าๆ เป็นเวลาประมาณ 20-30 นาทีเพื่อให้ตะกอนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นมาชนกัน และเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้ง่าย ในถังที่ 3 ซึ่งเป็นถังตกตะกอน โดยในถังนี้จะทิ้งให้น้ำนิ่ง ตะกอนจะสามารถตกตะกอนลงสู่ก้นถังและถูกสูบไปทิ้ง หรือจัดการต่อไป ในขณะที่น้ำใสซึ่งผ่านการบำบัดแล้วจะล้นแยกออกด้านบนของถัง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การบำบัดน้ำเสียทางเคมีมักใช้ร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ดังเช่นในกระบวนการตกและรวมตะกอนนี้ การใช้สารเคมีเพื่อตกตะกอน จะประกอบไปด้วยหน่วยบำบัดน้ำเสียทางเคมี คือ ถังสำหรับเติมสารเคมี และหน่วยบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ คือ ถังกวนเร็ว กวนช้า และถังตกตะกอน โดยเมื่อทำการเติมสารเคมีลงในน้ำเสียทำการ กวนเร็ว และ กวนช้าตามลำดับ จากนั้นจึงทำการทิ้งให้ตกตะกอนในถังตกตะกอนต่อไป ซึ่งในบางครั้งอาจจำแนกออกไปเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี (physical chemical wastewater treatment)

6.2 สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน

ในปัจจุบันสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นสารสร้างตะกอน (coagulant) มีอยู่หลายชนิด เช่น สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) ปูนขาว ($Ca(OH)_2$) เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และอาจมีสารจำพวก พอลิอิเล็คโทรไลท์หรือพอลิเมอร์ในการเป็นสารรวมตะกอน (flocculant) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนให้สูงขึ้น ด้วยเหตุที่ว่าพอลิเมอร์มีราคาสูงจึงนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยในการรวมตะกอนมากกว่า ใช้เป็นสารตกตะกอนหลัก โดยอาจสามารถอธิบายรายละเอียดของสารแต่ละชนิดที่กล่าวมาข้างต้นได้ ดังนี้

6.2.1 ปูนขาว ($Ca(OH)_2$) มีลักษณะทั่วไปดังนี้

เป็นสารสร้างตะกอนที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่นๆ แต่จะมีจุดด้อยตรงที่หากสัมผัสกับความชื้นจากอากาศจะเกิดปฏิกิริยาการเกาะเป็นก้อนแข็งทำให้ไม่สะดวกแก่การใช้งาน แต่ในการตกตะกอนจะเกิดเป็นฟล็อคได้ดี และสามารถตกตะกอนได้ดี แต่ปัญหาที่อาจเกิดตามมาภายหลังการตกตะกอน คือปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นมาก และค่าความเป็นกรดด่างหลังการบำบัดที่จะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงอาจต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดด่างให้กลับเป็นกลาง และจัดการกับตะกอนปริมาณมากที่เกิดขึ้นทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

เมื่อปูนขาวละลายในน้ำจะเกิดปฏิกิริยากับ CO_2 ดังนี้

$$Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3 + H_2O$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2.2 สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) มีลักษณะทั่วไปดังนี้

เป็นสารที่นิยมใช้มากในการตกตะกอนสารมลพิษ และสิ่งสกปรกในน้ำเสีย แต่จะมีราคาแพงกว่าปูนขาว มีปริมาณ Al_2O_3 อย่างต่ำร้อยละ 17 โดยในการตกตะกอนนั้น สารส้มจะมีประสิทธิภาพดีเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง ยิ่งใช้ปริมาณสารส้มในการตกตะกอนน้อย สภาพการตกตะกอนจะขึ้นกับค่าความเป็นกรดด่างมากขึ้น (ณรงค์, 2545)

เมื่อมีสารส้มละลายในน้ำที่มีความเป็นด่าง จะเกิดการแตกตัวดังนี้

$$Al_2(SO_4)_3 \longrightarrow Al^{+3} + 3SO_4^{-2}$$

$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$$

$$2Al^{+3} + 6OH^- \longrightarrow 2Al(OH)_3$$

ในระหว่างกระบวนการตกตะกอนค่าความเป็นกรดด่างของน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากตามสมการจะเห็นได้ว่า น้ำจะแตกตัวให้ OH อิออนออกมาและทำปฏิกิริยาหมดไป จนกระทั่งไม่มี OH อิออนเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับสารส้มอีก จึงต้องมีการรักษาระดับ OH อิออนในการตกตะกอนไว้ ดดยปรับค่าความเป็นกรดด่างให้สูงขึ้นโดยการเติมสารจำพวก ปูนขาว ($CaOH_2$) หรือโซดาไฟ (NaOH) พบว่าช่วงค่าความเป็นกรดด่าง 6.0 – 7.8 เป็นช่วงที่ดีที่สุดสำหรับสารส้มในการตกตะกอน ซึ่งอย่างน้อยต้องเติมสารส้มในปริมาณ 34 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อเป็นการตกตะกอน

6.2.3 เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) มีลักษณะทั่วไปดังนี้

เป็นสารสร้างตะกอนที่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับสารตกตะกอน 2 ชนิดที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นจึงอาจไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้เท่ากับสารอื่นๆ โดยมีทั้ง รูปที่เป็นของเหลว ของแข็ง และผลึกมีน้ำ ซึ่งมีอำนาจในการกัดกร่อนสูง และเนื่องจากเฟอร์ริกคลอไรด์มีสภาพเป็นกรดจึงต้องการความเป็นด่างมากในการทำปฏิกิริยา (ณรงค์, 2545) และเมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำจะมีผลึกเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น (มั่นสิน, 2542) ดังนี้

$$FeCl_3 \longrightarrow Fe^{3+} + 3Cl^-$$

$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$$

$$Fe^{3+} + OH^- \longrightarrow Fe(OH)_3$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2.4 เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) มีลักษณะทั่วไปดังนี้

เป็นสารสร้างตะกอนที่มีลักษณะการใช้งานคล้ายกับ เฟอร์ริกคลอไรด์ โดยมักจะพบในรูปของผลึกมีน้ำ แต่ในการใช้งานจำเป็นต้องมีการอัดอากาศลงในน้ำ ไม่เช่นนั้นจะเกิดตะกอนเหล็กขึ้นส่งผลให้น้ำเสียที่ต้องการบำบัดมีสีแดง ในการงานเฟอร์รัสซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างที่มีในน้ำ หรือโดยการเติมด่างลงไปในน้ำเพื่อให้เกิดเป็น เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ แต่ต้องออกซิไดซ์ที่ค่าความเป็นกรดด่างสูงกว่า 8.4 ให้เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำได้น้อยกว่า (ณรงค์, 2545)

ในการออกซิไดซ์จะต้องมีการเติมปูนขาวลงไปด้วย

$$FeSO_4.7H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4 + 7H_2O$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3$$

6.2.5 พอลิอิเล็กโทรไลต์ หรือพอลิเมอร์ มีลักษณะทั่วๆไปดังนี้

เป็นสารที่นิยมใช้ในกระบวนการรวมตะกอน (flocculation) เพื่อช่วยให้การตกตะกอนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตกตะกอนได้ง่ายขึ้น และรีดน้ำออกจากตะกอนได้ง่าย เพราะสารเคมีจำพวกนี้มีลักษณะเป็นเส้นยาว (Chain) และมีประจุไฟฟ้าซึ่งช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวรวมกันเป็นฟล้อกได้เร็วขึ้น และยังเป็นตัวช่วยรวมฟล้อกขนาดเล็ก ให้เป็นตะกอนใหญ่ขึ้น (ณรงค์, 2545)โดยจะมีทั้งแบบที่เป็น ประจุลบ ประจุบวก และแบบไร้ประจุ ขนาดที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5-2 มิลลิกรัมต่อลิตร ละลายยาก และมีความหนืดสูง ทำให้ในบางครั้งอาจเกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน หากโรงงานไม่มีอุปกรณ์เติมสารเคมี ที่นิยมใช้ในปัจจุบันเป็นสารอินทรียสังเคราะห์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในช่วง 10,000 -1,000,000 หรือมากกว่า สารเหล่านี้ได้แก่พวก Polyacrylamides Polyamines หรือPolyacrylate ซึ่งมีโครงร่างเป็นร่างแห และมีโมเลกุลขนาดใหญ่ และแตกตัวในน้ำแสดงประจุไฟฟ้าได้ (ณรงค์, 2545)

7. สถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว (response surface methodology, RSM)

เทคนิคสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว หรือ RSM ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้สำหรับออกแบบการทดลอง สร้างแบบจำลอง และประเมินผลกระทบกับหลายๆปัจจัยที่เกี่ยวข้อง จึงถูกนำมาใช้เพื่อออกแบบการทดลอง และใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ เพื่อให้ได้ผลลัพท์ที่น่าเชื่อถือ และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลดเวลา รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการทดลองลง ซึ่งเทคนิค RSM นั้นถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขางานวิจัยต่างๆ เช่น วิศวกรรม วิทยาศาสตร์ หรือทางอุตสาหกรรม

โดยออกแบบการทดลองที่นำมาใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว เช่น การทดลองแบบ central composite design (CCD) Box-Benhken design Doehelert design หรือ factorial design เป็นต้น

สถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิวมีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการตอบสนอง (response) หรือคือตัวแปรตาม (Y) กับกลุ่มปัจจัย หรือตัวแปรอิสระ (X) ที่มีอิทธิพล หรือส่งผลต่อค่าการตอบสนองนั้นๆ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) มาประยุกต์ใช้ในการหารูปแบบความสัมพันธ์ ในส่วนของการประมาณค่าพารามิเตอร์ หรือสัมประสิทธิ์การถดถอยจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (อนุวัตร, 2549)

โดยปกติสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิวจะพิจารณารูปแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 1(first order model) หรือลำดับที่ 2 (second order model) โดยในรูปแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 1จะมีการนำมาเฉพาะบางแผนการทดลองดังเช่นที่ Khuri and Cornell (2003) ได้กล่าวไว้คือการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2 ระดับ (2^k factorial) ในขณะที่แผนการทดลองในรูปแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 เช่น Central Composite Design, การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3 ระดับ (3^k factorial) เป็นต้น นั้นคือจะต้องมีระดับการทดลองอย่างน้อย 3 ระดับ Khuri and Cornell (2003) โดยรูปแบบโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 เช่น Central Composite Design การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 3 ระดับ (3^k factorial) ซึ่งรูปแบบลำดับที่ 2 สำหรับ k ตัวแปรซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 1

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (1)$$

โดยที่

Y คือ ตัวแปรตอบสนอง

β คือ สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย

x_i, x_j คือ ตัวแปรอิสระ

ε คือความคลาดเคลื่อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. วิธีการวิเคราะห์การถดถอย

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปโดยจะเรียกตัวแปรที่สนใจว่าตัวแปรตาม (dependent variable) ส่วนตัวแปรที่แทนปัจจัยต่างๆที่สนใจเรียกว่าตัวแปรอิสระ (independent variable) จากนั้นพิจารณาว่าตัวแปรทั้ง 2 มีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด แล้วจึงสร้างรูปแบบสมการถดถอย (regression equation) จากรูปแบบที่กำหนดโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) แล้วจึงทำการพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอย โดยใช้ค่าทางสถิติและการทดสอบสมมุติฐาน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแล้ว (adjusted coefficient of determination ;R^2 adj) และทำการพิสูจน์สมมุติฐานโดยการพิจารณาว่ามีปัจจัยหรือตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวมีอิทธิพลต่อความผันแปรของตัวแปรตามหรือไม่ (วิรัชช, 2546)

ในการวิเคราะห์การถดถอยอาจสามารถแบ่งออกได้เป็น การวิเคราะห์การถดถอยเพียง 1 ตัวแปร เราเรียกการวิเคราะห์การถดถอยนี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) และการวิเคราะห์การถดถอยที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปรจะเรียกการวิเคราะห์การถดถอยนี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (multiple regression analysis)

ข้อกำหนดในการวิเคราะห์การถดถอย

ก. ข้อมูลตัวแปรตามมีการแจกแจงแบบปกติ
ข. ค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์
ค. ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่
ง. ค่าคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน

8.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple regression analysis)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว และตัวแปรตาม รูปแบบสมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายดังแสดงในสมการที่ 2 (วิรัชช, 2546)

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_1 x_1 + \varepsilon \qquad (2)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (multiple regression analysis)

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ซึ่งเขียนสมการการถดถอยเชิงพหุคูณเมื่อมีตัวแปรอิสระ k ตัว ดังแสดงในสมการที่ 3 (วิรัชช, 2546)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_i x_i + \varepsilon \quad , i = 1, 2, ..., n \qquad (3)$$

8.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงพหุคูณ

เป็นการทดสอบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($\beta_1, \beta_2, \ldots \beta_k$) มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ โดยหากพบว่ามีอย่างน้อย 1 ค่า ที่ไม่เท่า 0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Y) และปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ ($X_1, X_2, \ldots X_k$)

สมมติฐานที่ใช้ทดสอบ คือ

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$
(ตัวแปรหรือปัจจัยที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง)

$H_1 : \beta_i$ อย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0
(มีตัวแปรหรือปัจจัยอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง)

ถ้ายอมรับ H_0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

ถ้าปฏิเสธ H_0 แสดงว่ามีตัวแปรอิสระ Xj อย่างน้อย 1 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แสดงว่าสมการการถดถอยที่สร้างสามารถอธิบายการผันแปรของตัวแปรอิสระได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.2.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการการถดถอย

ก normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อน

เป็นวิธีการสร้างกราฟที่พล็อตค่าของข้อมูลจริงที่เกิดขึ้นกับค่าที่คาดไว้(expected value)ที่ได้จากการทำนายโดยสมการถดถอย โดยค่าจริงจะอยู่รอบ ๆ เส้นตรงนั้นถ้ารูปร่างที่พล็อตออกมามีลักษณะใกล้เคียง หรือเป็นเส้นตรง แสดงว่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีการแจกแจงปกติ แต่หากมีรูปร่างไม่เป็นเส้นตรงแสดงว่าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นปกติ

ข การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระหรือความคงที่ของความคลาดเคลื่อนโดยใช้กราฟการกระจาย (scatterplot) ระหว่างค่า regression standardized residual บนแกน Y กับค่า regression predicted value บนแกน X พบว่าจุดมีการกระจายอย่างไม่มีรูปแบบและกระจายรอบศูนย์ แสดงว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่

ค การทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน

การทดสอบทางสถิติว่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน ที่นิยมใช้คือการทดสอบ Dubin – Watson โดยใช้สถิติของการการทดสอบคือสถิติ d ของ Durbin - Watson

ง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination ; R^2)

เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรทำนายสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเขียนเป็นสมการที่ 4 ได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ } X_1, X_2, \ldots X_k}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \qquad (4)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิรัชช (2546) กล่าวว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไรถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 เป็นการบ่งบอกถึงระดับความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระในสมการถดถอย หากค่านี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระว่ามีระดับความสัมพันธ์สูง และสมการถดถอยนั้นสามารถใช้พยากรณ์ค่าของตัวแปรตามได้ถูกต้อง

8.2.3 การเลือกสมการการถดถอยที่ดีที่สุด

ในการวิจัยเชิงปริมาณตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษาจะมีหลายตัวแปรสมการการถดถอยที่เหมาะสมควรเป็นสมการที่มีตัวแปรอิสระน้อยที่สุด และอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ดีที่สุด ดังนั้นเมื่อมีตัวแปรอิสระหลายตัว จึงควรเลือกตัวแปรอิสระที่สำคัญ การเลือกตัวแปรอิสระที่สำคัญจะทำได้ด้วยวิธีการเลือกสมการการถดถอยแบบต่าง ๆ ซึ่งวิธีการเลือกสมการการถดถอยที่ดีที่สุดที่ใช้กันมากได้แก่ All possible regression Backward elimination Forward selection และ Stepwise regression (วิรัชช, 2546)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะประกอบด้วยสีย้อมหลายชนิดปนเปื้อนอยู่ จึงส่งผลให้มีค่าซีโอดี ที่สูง และเมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิดการบดบังแสงแดดที่ส่องผ่านลงไปในน้ำทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง ซึ่งส่งผลต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำ และสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการที่จะลดปริมาณสีย้อม โดยการบำบัดสีย้อมทางเคมีมีหลายวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังเช่น การศึกษาของ Tan *et al.* (2000) ที่ทดลองใช้ $MgCl_2$ เป็นสารตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย และของเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตกตะกอน ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารช่วยตกตะกอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม พบว่า เมื่อใช้ปริมาณ $MgCl_2$ ในการตกตะกอน 4 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 11 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมากกว่าร้อยละ 90

Georgiou *et al.* (2003) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ระบบบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานบำบัดน้ำเสีย และใช้ $Ca(OH)_2$ และ $FeSO_4$ เป็นสารตกตะกอนจากผลการศึกษาพบว่าพบว่าการใช้ $Ca(OH)_2$ เป็นสารตกตะกอนเพียงชนิดเดียวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 90 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีเท่ากับร้อยละ 50 ถึงร้อยละ60

การศึกษาของ Joo *et al*. (2005) ได้ทำการทดลองการบำบัดสีย้อมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยสีย้อม Reactive ประเภทต่างๆ (Black 5 Blue 2 Red 2 และ Yellow 2) และทำการตกตะกอนน้ำเสียจริง จากโรงงานฟอกย้อม ใช้การตกตะกอนด้วยวิธี Coagulation - Flocculation สารที่นำมาใช้ทดลองเป็นสารตกตะกอน ในการศึกษาคือ Alum และ Ferric salt รวมทั้งมีการใช้สารจำพวก polymer มาใช้เป็นสาร flocculant ช่วยในการตกตะกอนด้วย จากผลการทดลองพบว่า การใช้สารตกตะกอน เพียงอย่างเดียวในการตกตะกอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดเพียงร้อยละ 20 ในขณะที่การเติมสาร flocculant ลงไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นเกือบร้อยละ 100

ดังเช่นการ ศึกษาของ Ahmed *et al*. (2005) ทดสอบหาจุดเหมาะสมของการตกตะกอนจากน้ำเสียโรงงานน้ำมันปาล์ม โดยใช้เทคนิค RSM โดยมีตัวแปรตามที่สนใจคือ %water recovery และค่าความขุ่น (turbidity) พบว่าจุดเหมาะสมของการตกตะกอนคือ ใช้ปริมาณสารตกตะกอน 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ flocculant 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดด่าง 7 มีค่า %water recovery เท่ากับร้อยละ 78 ค่าความขุ่นลดลงเหลือเพียง 20 NTU

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Ghafari *et al*. (2008) สามารถใช้เทคนิค RSM ในการหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอน เปรียบเทียบระหว่าง สารตกตะกอน 2 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด และเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้สารเคมี เช่นการใช้เทคนิค RSM ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำชะขยะ โดยใช้ สารตกตะกอน 2 ชนิดคือ poly-aluminumchloride (PAC) และ alum จากผลการทดลองพบว่าในสภาวะที่เหมาะสม สำหรับ PAC ใช้ปริมาณสาร 2 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 7.5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น สีย้อม และ TSS เท่ากับร้อยละ 43.1 ร้อยละ 94.0 ร้อยละ 90.7 และร้อยละ 92.2 ตามลำดับ และสำหรับAlum ใช้ปริมาณสาร 9.5 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 7.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ความขุ่น สีย้อม และ TSS เท่ากับ ร้อยละ62.8 ร้อยละ 88.4 ร้อยละ 86.4 และร้อยละ 90.1 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือ

1.1 เครื่อง UV-Spectrophotometer รุ่น SPECTRO SC

1.2 เครื่อง pH meter รุ่น Waterproof pH meter pH-035

1.3 เครื่อง Turbidity meter รุ่น TC-3000 Tri-Meter

1.4 เครื่อง TDS meter รุ่น EC300 Handheld Conductivity

1.5 เครื่อง Jar test

1.6 ตู้อบแห้ง (oven)

1.7 เครื่อง centrifuge

1.8 หลอดซีโอดี

1.9 Auto pipette 5 มิลลิลิตร

1.10 เครื่องแก้ว ยกตัวอย่างเช่น ขวดปรับปริมาตร บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ

2. สารเคมี

2.1 ผงสี Reactive black 5 Reactive red198 และ Reactive yellow 176

2.2 $Ca(OH)_2$

2.3 $CaCO_3$

2.4 $FeCl_3$

2.5 $Al_2(SO_4)_3$

2.6 HCl

2.7 NaOH

2.8 Conc.H_2SO_4

2.9 $K_2Cr_2O_7$

2.10 $(Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O)$ (FAS)

2.11 เฟอโรอีนอินดิเคเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. ทดสอบการสร้างและรวมตะกอนจากน้ำเสียสังเคราะห์

1.1 เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เลียนแบบน้ำเสียจริง จากผงสี RB5 (reactive black 5) นำมาเตรียมเป็นตัวอย่างน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆก่อนทำการบำบัดของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ที่เตรียมขึ้น ดังนี้คือ ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น (turbidity) และค่า TDS (total dissolve solid) เพื่อใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดของแต่ละพารามิเตอร์ภายหลังการบำบัด

1.3 ทดสอบตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นโดยวิธีการของ Jar – test ใช้ชนิดของสารตกตะกอน ที่เลือกมา 4 ชนิดคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) และ อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) ใช้ปริมาณของสารตกตะกอน 20 – 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสีสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 7 โดยใช้ NaOH 2 โมลาร์ และ HCl 2 โมลาร์ โดยมีสภาวะของการตกตะกอนดังนี้คือ

1.3.1 กวนเร็ว (rapid mixing) 200 rpm เป็นเวลา 2 นาที

1.3.2 กวนช้า (slow mixing) 40 rpm เป็นเวลา 30 นาที

1.3.3 การปล่อยทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที

1.4 ตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ของสารตกตะกอนแต่ละชนิด จากค่าประสิทธิภาพในการบำบัด สีย้อม ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น (turbidity) และค่า TDS

1.4.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม

ก เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากผงสี RB5 ที่ความเข้มข้น 0 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer รุ่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

SPECTRO SC ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร เพื่อสร้าง standard curve ของน้ำสังเคราะห์สี RB5

ข ภายหลังการตกตะกอน เก็บตัวอย่างน้ำส่วนใส ภายหลังการทดสอบนำไปเข้าเครื่อง Centrifuge เหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส และตะกอนแขวนลอยที่เหลืออยู่ออกจากกัน

ค นำตัวอย่างน้ำเสียส่วนใสภายหลังการเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร

ง นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสีย้อมภายหลังการบำบัด โดยใช้สมการที่ได้จาก standard curve ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือภายหลังจากการบำบัดที่คำนวณได้ มาคำนวณเทียบกับความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นก่อนการบำบัดเป็นค่าประสิทธิภาพ

1.4.2 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี

ก นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทำ Jar-test นำมาวัดค่าซีโอดีด้วยวิธี Potassium Dichromate Digestion ตาม standard method ดังภาคผนวก

ข นำค่าซีโอดีที่ตรวจวัดได้มาคำนวนเป็นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี

1.4.3 การวิเคราะห์ค่าความขุ่น (turbidity)

ก นำตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทำ Jar–test นำมาวัดค่าความขุ่น โดยใช้ Turbidity meter รุ่น TC-3000 Tri-Meter

ข ใช้น้ำกลั่นแทน blank ในการวิเคราะห์ค่าความขุ่น ภายหลังการวัดค่าความขุ่นแต่ละตัวอย่าง

ค นำค่าความขุ่นที่ตรวจวัดมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่า turbidity

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4.4 การวิเคราะห์ค่า TDS

ก นำตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทำ Jar – test นำมาวัดค่า TDS โดยใช้ TDS meter รุ่น EC300 Handheld Conductivity

ข นำค่า TDS ที่ตรวจวัดมาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่า TDS

1.5 การตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ที่ค่าความเป็นกรดด่าง ที่แตกต่างกัน

1.5.1 ปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรให้มีค่าเท่ากับ 4 7 และ 10 โดยใช้ NaOH 2 โมลาร์ และ HCl 2 โมลาร์

1.5.2 ตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตกตะกอนที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1.4 โดยใช้สภาวะในการตกตะกอนเช่นเดียวกับขั้นที่ 1.3

1.5.3 ตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ของสารตกตะกอนที่เหมาะสม จากค่าประสิทธิภาพในการบำบัด สีย้อม ค่าซีโอดี เมื่อกำหนดค่าความเป็นกรดด่างที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD

1.6 การตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และน้ำสีสังเคราะห์ RY176

1.6.1 เตรียมตัวอย่างน้ำสีสังเคราะห์ จากผงสี RR198 (reactive red198) และผงสี RY176 นำมาเตรียมเป็นตัวอย่างน้ำสีสังเคราะห์ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.6.2 ตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆก่อนทำการบำบัดของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และ RY176 ที่เตรียมขึ้นคือ ค่าซีโอดี เพื่อใช้ในการคำนวณ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.6.3 ตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และ RY176 ที่เตรียมขึ้นโดยใช้สารตกตะกอนที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1.4 ใช้สภาวะในการตกตะกอนเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1.3 ที่ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1.5

1.6.4 ตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ที่ความยาวคลื่น 518 นาโนเมตร และน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ที่ความยาวคลื่น 416 นาโนเมตร ของสารตกตะกอนที่เหมาะสม จากค่าประสิทธิภาพในการบำบัด สีย้อม ค่าซีโอดี ผลที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD

2. การวิเคราะห์หาจุดเหมาะสมของการตกตะกอน โดยวิธี response surface methodology

2.1 ออกแบบแผนการทดลองสำหรับวิธี response surface methodology โดยในการศึกษานี้ออกแบบการทดลองแบบ central composite design ซึ่งเป็นการทดลองที่มีการเพิ่มสิ่งทดลองระหว่างระดับของปัจจัยให้มากขึ้นเพื่อต้องการใช้แบบจำลองอันดับสูงขึ้นจากเดิม (อนุวัตร, 2549) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

2.1.1 ทำการสร้างสิ่งทดลองอย่างง่ายจากแฟคทอเรียล 2^k โดยจำนวนจุดของ factorial point มีจำนวนเท่ากับ 2^2 จากทั้งหมด 2 ปัจจัยจะทำการทดลอง 2 ระดับ ใช้สัญลักษณ์ -1 แทนระดับต่ำ และ +1 แทนระดับสูง ดังนั้นการทดลองสำหรับ factorial point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$(X_1, X_2) = (\pm 1, \pm 1)$$

2.1.2 ทำการเพิ่มจุดบนแกน coordinate มีค่า code level $\pm \alpha$ โดยจำนวนจุดของ star point มีจำนวนเท่ากับ 2(2) โดยแต่ละจุดห่างจาก central point ด้วยระยะเท่ากันคือระยะ $\sqrt[4]{2^k}$ เมื่อศึกษา 2 ปัจจัยจึงมีค่า α เท่ากับ ±1.414 การทดลองสำหรับ star point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

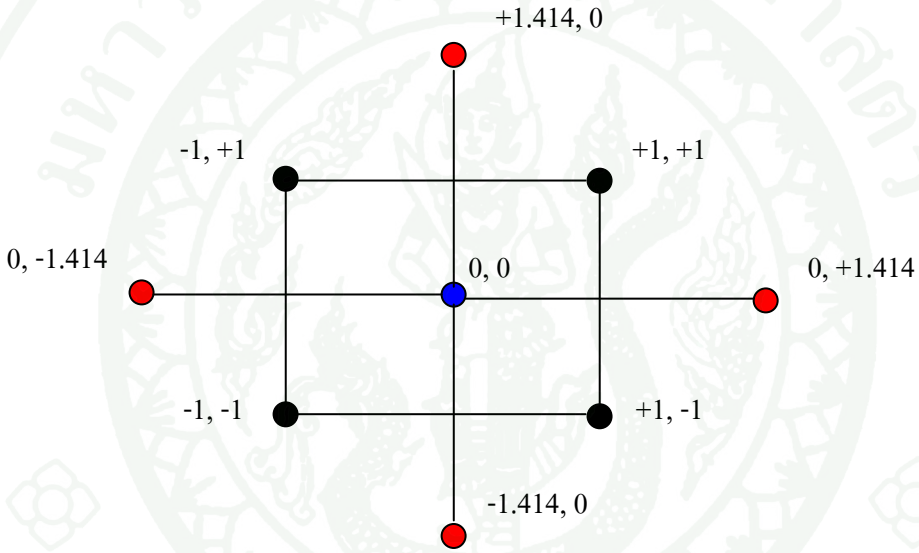
$$(X_1, X_2) = (\pm 1.414, \pm 1.414)$$

2.1.3 จำนวนจุดของ center point (m) จะต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 1 ครั้งใช้ประมาณความคลาดเคลื่อนของการทดลอง การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ การทดลองสำหรับ center point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$(X_1, X_2) = (0, 0)$$

สามารถออกแบบจำนวนชุดการทดลองได้จาก $2^k + 2k + m$ เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษา และ m คือ จำนวนซ้ำการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (center point) ดังนั้นเมื่อทำการศึกษา 2 ปัจจัย และทำการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง 3 การทดลอง จำนวนชุดการทดลองจึงเท่ากับ $2^2 + 2(2) + 3$ สามารถออกแบบการทดลองทั้งหมด 11 การทดลอง ในแต่ละพารามิเตอร์ที่สนใจทั้ง 2 พารามิเตอร์คือประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ซึ่งแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง โดยมีลักษณะการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบ central composite design ที่มีปัจจัยที่สนใจ 2 ปัจจัย ● คือ factorial point ● คือ center point ● คือ star point

และสามารถกำหนดค่าของระดับแต่ละปัจจัยได้จากสมการที่ 5

$$X_i = \frac{A_i - A_0}{A} \qquad (5)$$

เมื่อ X_i code ของระดับปัจจัย

A_i ค่าระดับที่แท้จริงของปัจจัย (true level)

A_0 ค่าเฉลี่ยของระดับปัจจัย (average)

A ค่าช่วงกลางของระดับปัจจัย (middle) คิดจาก (ค่าสูงสุด – ค่าต่ำสุด) / 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 ทำการทดลองตามแบบการทดลองที่ออกแบบไว้สำหรับน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิดคือ RB5 (reactive black 5) RR198 (reactive red 198) และ RY176 (reactive yellow 176) จากนั้นทำการตรวจวัดประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1.4

3. การวิเคราะห์ผลและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม

นำผลที่ได้จากแต่ละการทดลองของทั้ง 3 การทดลองข้างต้นไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ หาสมการถดถอยเชิงพหุคุณ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี และปัจจัยที่นำมาศึกษาทั้ง 2 ปัจจัยคือ ปริมาณสารตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ ทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยทดสอบการแจกแจงแบบปกติ ทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน และทดสอบความเป็นอิสระของความคลาดเคลื่อน จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้ไปทำนายค่าของปัจจัยที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดีโดยใช้การหาการตอบสนองที่พื้นผิวด้วยโปรแกรมทางสถิติ และทำการทดลองตกตะกอนจริงโดยดำเนินการตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้เทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย โดยรูปแบบสมการถดถอยเป็นดังสมการที่ 6

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=l}^{k} \beta iXi + \sum_{i=l}^{k} \beta iiXi + \sum_{i \le j}^{k} \sum_{j}^{k} \beta ijXiXj + \varepsilon \qquad (6)$$

4. การหาจุดเหมาะสมของการตกตะกอนน้ำสีผสม

ทำการเตรียมน้ำสีสังเคราะห์ผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากการเตรียมสีผสมความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการผสมผงสี RB5 ผงสี RR198 และผงสี RY176 แต่ละชนิดในอัตราส่วน 1:1:1 ให้ได้ปริมาณรวม 5 กรัม ในขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร และทำการเจือจางเป็น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อต้องการใช้งาน จากนั้นทำการตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ใช้สภาวะการตกตะกอนที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าทั้ง 3 สภาวะ และทำการตรวจวัดการลดลงของความเข้มข้นสีย้อมโดยวัดการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นทำการออกแบบการทดลองโดยวิธี response surface methodology ออกแบบการทดลองแบบ central composite design โดยใช้ข้อมูลของช่วงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 2 ค่าคือ ปริมาณสารตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง ที่ได้จากการทดลองก่อนหน้าทั้ง 3 การทดลอง เช่นเดียวกับการทดลองในขั้นที่ 2 โดยตัวแปรที่สนใจคือประสิทธิภาพใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การบำบัดค่าซีโอดี ทำการทดลองตามการทดลองที่ออกแบบไว้ และตรวจวัดประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี และนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ดังเช่นการทดลองที่ 3 และทำนายจุดที่เหมาะสมในการตกตะกอนเพื่อบำบัดค่าซีโอดี จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทำนาย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. การหาชนิดของสารสร้างและรวมตะกอนที่เหมาะสม

การทดสอบประสิทธิภาพของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ในการบำบัดสีย้อม ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น และ ปริมาณของแข็งละลาย (TDS) ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 (reactive black 5) ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าซีโอดีเริ่มต้น 160.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความขุ่น 1.84 NTU และปริมาณของแข็งละลาย 0.05 กรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารตกตะกอนแต่ละชนิดในปริมาณที่เท่ากันตั้งแต่ 20 30 40 50 และ 60 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 7 จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 $Ca(OH)_2$ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีสูงที่สุดถึงร้อยละ 99.78 และร้อยละ 90.78 ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับการทดลองของ Vimonses *et al.* (2009) ที่พบว่าเมื่อใช้ แร่ดินเหนียวผสม ร่วมกับ $Ca(OH)_2$ เป็นสารตกตะกอนในการบำบัดสีย้อม Rongo Red ที่ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม Congo Red มากกว่าร้อยละ 95 และการทดลองของ El-Gohary and Tawfik (2009) พบว่าเมื่อใช้ปูนขาวตกตะกอนน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 100 และมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 50

ผลการตกตะกอนโดยใช้ $CaCO_3$ พบว่าสามารถบำบัดสีย้อมได้สูงสุดเพียงแค่ ร้อยละ16.35 แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี เนื่องจากความสามารถในการตกตะกอนอนุภาคของสีย้อมขึ้นกับปริมาณ Ca^{2+} ที่ละลายอยู่ ดังนั้นเมื่อ $Ca(OH)_2$ ละลายน้ำจะแตกตัวออกเป็น Ca^{2+} และ OH^- โดย Ca^{2+} จะจับกับอนุภาคของสีย้อมตกตะกอนแยกตัวออกจากน้ำเสีย (Vimonses *et a.l*, 2009) อย่างไรก็ตามแม้ว่า $CaCO_3$ จะมี Ca เป็นองค์ประกอบเหมือนกับ $Ca(OH)_2$ แต่ด้วยคุณสมบัติของ $CaCO_3$ ที่ละลายน้ำได้ต่ำจึงทำให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนมีค่าที่ต่ำ (Oladoja and Aliu, 2009)

ผลการตกตะกอนโดยใช้ $FeCl_3$ พบว่าไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีเมื่อทำการตกตะกอนที่ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นเท่ากับ 7 มีผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Moghaddam *et al*. (2010) ที่พบว่าเมื่อใช้กากตะกอน $FeCl_3$ ทำทดลองการตกตะกอนสีย้อม AR198 ที่ความเข้มข้นต่างๆ และกำหนดค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง จุดเหมาะสมของการตกตะกอนจะอยู่ในช่วงที่เป็นกรด ที่ค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเท่ากับ 2.31 โดยจากการทดลองพบว่าหากเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างให้สูงกว่า 5.68 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม ค่าซีโอดี ค่าความขุ่น และค่าTDS ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ของสารตกตะกอน 4 ชนิด

สารตกตะกอน	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (ร้อยละ)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ร้อยละ)				
	ปริมาณสารตกตะกอนที่ใช้ (กรัมต่อลิตร)									
	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
$Ca(OH)_2$	72.85	97.71	98.15	99.66	99.78	63.06	77.82	90.78	85.24	68.61
$CaCO_3$	*	*	9.3	7.82	16.35	*	*	*	*	*
$FeCl_3$	16.35	15.37	19.85	4.04	*	*	*	*	*	*
$Al_2(SO_4)_3$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น (ร้อยละ)					ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าTDS (ร้อยละ)				
$Ca(OH)_2$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$CaCO_3$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$FeCl_3$	*	*	*	5.38	27.17	*	*	*	*	*
$Al_2(SO_4)_3$	25.54	25.54	7.61	*	*	*	*	*	*	*

หมายเหตุ * หมายถึงไม่มีมีประสิทธิภาพการบำบัด

เมื่อใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ที่ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 7 พบว่าไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี ในการศึกษาที่ผ่านมาของ (El-Gohary and Tawfik, 2009) ทำการตกตะกอนน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ $Al_2(SO_4)_3$ เป็นสารตกตะกอน โดยพบว่าค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนจะอยู่ในช่วง 3- 6 แต่ในการศึกษานี้ค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นพบว่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการตกตะกอนมีค่าลดลง ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดจะสามารถอธิบายได้จากหลักการที่ว่า ในช่วงค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม อนุภาคของสีย้อมจะยังคงรักษาประจุสุทธิที่เป็นลบไว้ได้ จึงเป็นการเพิ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสามารถในการตกตะกอนสีย้อมโดยใช้สารตกตะกอนที่มีคุณสมบัติเป็นไอออนบวก (Kim *et al*., 2004)

จากการทดลองพบว่าสารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิดไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความขุ่นและค่า TDS เนื่องจากสีสังเคราะห์ RB5 มีค่าความขุ่นและค่า TDS เริ่มต้นที่ต่ำเมื่อเติมสารตกตะกอนในปริมาณมากถึง 20 ถึง 60 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงทำให้ค่าความขุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เกิดจากการสูญเสียเสถียรภาพของสารแขวนลอย เมื่อใช้สารตกตะกอนมาก เกินความจำเป็น มีแนวโน้ม เช่นเดียวกับการทดลองหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนลดค่าความขุ่นของน้ำที่มีค่าความขุ่นสูง โดยใช้ PACI (Annadurai *et al.*, 2004) พบว่าเมื่อมีการเติม PACI มากเกินจุดเหมาะสมของการตกตะกอน ค่าความขุ่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่า TDS นั้น เป็นที่ยอมรับกันว่าสามารถบำบัดได้ยาก และต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง (มั่นสิน และ มั่นรักษ์, 2547) จึงไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

จากผลการทดลองบอกได้ว่าสารตกตะกอนที่เหมาะสมในการใช้ตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ RB5 คือ $Ca(OH)_2$ แต่เนื่องจากไม่มีสารตกตะกอนชนิดใดที่มีความสามารถในการบำบัดค่าความขุ่น และค่า TDS ในการทดลองต่อไปจึงศึกษาเพียงประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดีเท่านั้น

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อใช้ $Ca(OH)_2$ ในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเลือกใช้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 40 กรัมต่อลิตร จากผลการทดลองในตารางที่ 1 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 98.15 และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีเท่ากับร้อยละ 90.78 พบว่าเมื่อทำการตกตะกอนโดยปรับค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นของน้ำสีสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 4 7 และ10 ประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่พบว่าที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 10 หรืออยู่ในช่วงที่เป็นด่าง ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 จะมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเมื่อค่าความเป็นกรดด่างมีค่าเพิ่มขึ้น หมู่ซัลโฟ หมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิล ของอนุภาคสีย้อม จะมีการกลายเป็นไอออนมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยการตกตะกอนมีค่าเพิ่มขึ้น (Papic *et al*., 2004) เมื่อเทียบกับที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4 และ 7 มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับการศึกษาของ Tatsi *et al.* (2003) พบว่าเมื่อใช้ $Ca(OH)_2$ เป็นสารตกตะกอนในการบำบัดน้ำชะขยะจะมีประสิทธิภาพตกตะกอนสูงในช่วงที่เป็นด่างจนถึงค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 12 ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้สภาวะการตกตะกอนที่ปริมาณ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 40 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เมื่อตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4 7 และ10

ค่าความเป็นกรดด่าง	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ร้อยละ)
4	97.95	90.04
7	98.15	90.78
10	99.56	90.04

นำ $Ca(OH)_2$ มาใช้ในการตกตะกอน น้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 193.64 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าซีโอดีเริ่มต้น 144.76 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ดังตารางที่ 3 พบว่า เมื่อทำการตกตะกอนโดยใช้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ เท่ากับ 20 30 40 50 และ 60 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 10 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี มีค่ามากกว่าร้อยละ 98 และร้อยละ 85 ตามลำดับสำหรับน้ำสีสังเคราะห์ ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับการบำบัดสีย้อม RR2 RR120 และ RR141 โดยใช้ของเสีย กากตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมี Ca^{2+} เป็นองค์ประกอบหลัก (Netpradit *et al*., 2003) พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิด มากกว่าร้อยละ 90 ที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 9 เมื่อพิจารณาถึงปริมาณสารตกตะกอนที่ใช้และประสิทธิภาพในการบำบัด จึงเลือกสภาวะในการตกตะกอนสำหรับสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาณสารตกตะกอนเท่ากับ 30 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 10 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และใช้ปริมาณสารตกตะกอนอย่างพอเหมาะ ไม่เป็นการสิ้นเปลืองสารตกตะกอนมากเกินไป เนื่องจากหากเพิ่มปริมาณสารตกตะกอนให้สูงกว่า 30 กรัมต่อลิตร ดังตาราง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงแค่ร้อยละ 1 และร้อยละ 3 ในขณะที่ต้องเพิ่มปริมาณสารตกตะกอนขึ้นมากกว่า 10 กรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และ RY176 เมื่อตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ที่ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ10

สีสังเคราะห์	ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม (ร้อยละ)					ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (ร้อยละ)				
	ปริมาณสารตกตะกอนที่ใช้ (กรัมต่อลิตร)									
	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
RR198	96.70	98.92	99.57	99.64	99.70	80.58	86.41	86.41	90.29	87.65
RY176	97.48	99.97	99.98	99.98	99.98	84.42	92.21	92.21	92.21	89.61

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว

$Ca(OH)_2$ ถูกนำมาใช้ในการทดลองหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนของน้ำสีสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ RB5 (reactive black 5) RR198 (reactive red 198) และ RY176 (reactive yellow 176) ด้วยเทคนิคการตอบสนองที่พื้นผิวโดยออกแบบการทดลองแบบ central composite design แบ่งปัจจัยออกเป็น 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, +1, $+\alpha$) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) การกำหนดค่าของระดับปัจจัยแต่ละระดับได้จากข้อมูลช่วงที่เหมาะสมในการตกตะกอนจากการทดลองขั้นที่ 1

จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เลือกใช้สภาวะการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ที่ปริมาณสารตกตะกอนเท่ากับ 40 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 10 ในการออกแบบการทดลองที่จุด center point สำหรับการออกแบบการทดลองแบบ CCD ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) เท่ากับ 11.72 20 40 60 และ 68.28 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) เท่ากับ 7.17 8 10 12 และ 12.83 สำหรับการทดลองของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ซึ่งกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆในแต่ละระดับการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 และสำหรับการทดลองของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 และ RY176 เลือกใช้สภาวะในการตกตะกอนที่ปริมาณสารตกตะกอน 30 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 10 จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 มาออกแบบการทดลองแบบ CCD จึงกำหนดปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) เท่ากับ 15.86 20 30 40 และ 44.14 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) เท่ากับ 7.17 8 10 12 และ 12.83 ซึ่งกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆในแต่ละระดับการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ด้วย $Ca(OH)_2$

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.414	-1	0	1	1.414
ปริมาณสารตกตะกอน, X_1 (กรัม/ลิตร)	11.72	20	40	60	68.28
ค่าความเป็นกรดด่าง, X_2	7.17	8	10	12	12.83

ตารางที่ 5 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ด้วย $Ca(OH)_2$

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.414	-1	0	1	1.414
ปริมาณสารตกตะกอน, X_1 (กรัม/ลิตร)	15.86	20	30	40	44.14
ค่าความเป็นกรดด่าง, X_2	7.17	8	10	12	12.83

ตารางที่ 6 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR176 ด้วย $Ca(OH)_2$

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.414	-1	0	1	1.414
ปริมาณสารตกตะกอน, X_1 (กรัม/ลิตร)	15.86	20	30	40	44.14
ค่าความเป็นกรดด่าง, X_2	7.17	8	10	12	12.83

เมื่อศึกษาปัจจัย คือ ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) ต่อการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ $Ca(OH)_2$ สามารถออกแบบการทดลองโดยวิธี central composite design ได้ 11 ชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บำบัดสีย้อม และบำบัดค่าซีโอดี ดังแสดงในตารางที่ 7 8 และ 9 ผลการทดลองที่ได้ จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ

ตารางที่ 7 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$

Run	Panel A		Panel B		%Dye removal	%COD removal
	X_1	X_2	Coagulant dosage, X_1 (g/L)	pH, X_2		
1	+1	+1	60.00	12.00	99.63	86.72
2	-1	-1	20.00	8.00	81.82	62.67
3	+1	-1	60.00	8.00	99.6	85.90
4	-1	+1	20.00	12.00	85.87	65.15
5	0	-1.414	40.00	7.17	96.75	75.94
6	-1.414	0	11.72	10.00	59.57	41.93
7	0	+1.414	40.00	12.83	90.2	75.11
8	+1.414	0	68.28	10.00	99.83	84.24
9	0	0	40.00	10.00	97.55	80.92
10	0	0	40.00	10.00	97.61	80.92
11	0	0	40.00	10.00	97.64	80.09

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$

Run	Panel A		Panel B		%Dye removal	%COD removal
	X_1	X_2	Coagulant dosage, X_1 (g/L)	pH, X_2		
1	+1	+1	40.00	12.00	99.7	86.70
2	-1	-1	20.00	8.00	97.22	79.10
3	+1	-1	40.00	8.00	99.84	84.80
4	-1	+1	20.00	12.00	97.20	79.10
5	0	-1.414	30.00	7.172	99.44	84.80
6	-1.414	0	15.86	10.00	94.18	67.63
7	0	+1.414	30.00	12.828	97.54	81.00
8	+1.414	0	44.14	10.00	99.94	82.90
9	0	0	30.00	10.00	99.30	86.70
10	0	0	30.00	10.00	99.30	86.70
11	0	0	30.00	10.00	99.30	86.70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$

Run	Panel A		Panel B		%Dye removal	%COD removal
	X_1	X_2	Coagulant dosage, X_1 (g/L)	pH, X_2		
1	+1	+1	40.00	12.00	99.11	89.83
2	-1	-1	20.00	8.00	98.00	84.75
3	+1	-1	40.00	8.00	99.16	87.29
4	-1	+1	20.00	12.00	98.06	84.75
5	0	-1.414	30.00	7.172	99.14	89.83
6	-1.414	0	15.86	10.00	97.30	84.75
7	0	+1.414	30.00	12.828	97.73	87.29
8	+1.414	0	44.14	10.00	99.34	89.83
9	0	0	30.00	10.00	99.26	89.83
10	0	0	30.00	10.00	99.24	89.83
11	0	0	30.00	10.00	99.16	89.83

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 การวิเคราะห์การถดถอย

ก การทดสอบสมมุติฐานของสมการถดถอย

นำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามชุดการทดลองจากตารางที่ 7 8 และ 9 ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคุณ เพื่อประเมินว่าปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 2 ค่าคือ ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) ที่มีผลต่อการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย $Ca(OH)_2$ ในการบำบัดสีย้อม และบำบัดค่าซีโอดี โดยตั้งสมมุติฐานทางสถิติคือ

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_k = 0$ β_k = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

H_1 : มีอย่างน้อยหนึ่ง β_i ไม่เท่ากับ 0 $i = 1, 2, \ldots, k$

โดยจะปฏิเสธ H_0 ถ้า $F > F_{\alpha,k,n-k-1}$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ในที่นี้ค่าวิกฤติ $F_{\alpha,k,n-k-1} = F_{0.05,5,5} = 5.05$

ถ้ายอมรับ H_0 หมายความว่าตัวแปรอิสระ X_1 X_2 X_1^2 X_2^2 X_1X_2 และ ตัวแปรตาม Y คือประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่ถ้าหากปฏิเสธ H_0 หมายความว่ามีตัวแปรอิสระ X อย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y และสมการถดถอยที่ได้สามารถใช้ในการอธิบายหรือทำนายค่าตัวแปรตาม Y

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณในการบำบัดสีย้อม และการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 10 และ 11 มีค่าสถิติ F เท่ากับ 8.545 และ16.998 ด้วยค่า degree of freedom เท่ากับ (5,5) ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่ามีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,5,5} = 5.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสารตกตะกอน หรือค่าความเป็นกรดด่าง อย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1331.113	5	266.223	8.545	0.017
Residual	155.777	5	31.155		
Total	1486.890	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	1679.586	5	335.97	16.988	0.004
Residual	98.872	5	19.774		
Total	1778.458	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณในการบำบัดสีย้อม และบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในตารางที่ 12 และ 13 มีค่าสถิติ F เท่ากับ 9.464 และ 7.717 ด้วยค่า degree of freedom เท่ากับ (5,5) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่ามีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,5,5} = 5.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสารตกตะกอน หรือค่าความเป็นกรดด่างอย่างน้อยหนึ่งค่า มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	28.083	5	5.617	9.464	0.014
Residual	2.967	5	0.593		
Total	31.050	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ตารางที่ 13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	290.031	5	58.006	7.717	0.021
Residual	37.585	5	7.517		
Total	327.616	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุคูณในการบำบัดสีย้อม และบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น250 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 และ 15 มีค่าสถิติ F เท่ากับ 7.625 และ 5.642 ด้วยค่า degree of freedom เท่ากับ (5,5) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่ามีค่ามากกว่า $F_{0.05,5,5} = 5.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสารตกตะกอน หรือค่าความเป็นกรดด่าง อย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	4.948	5	0.990	7.625	0.022(a)
Residual	0.649	5	0.130		
Total	5.597	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ตารางที่ 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	44.838	5	8.968	5.642	0.040(a)
Residual	7.947	5	1.589		
Total	52.786	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปได้ว่าปริมาณสารตกตะกอน หรือค่าความเป็นกรดด่าง อย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป เช่นเดียวกับการศึกษาจุดเหมาะสมการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ AR119 โดยใช้กากตะกอน $FeCl_3$ (Moghaddam *et al*., 2010) พบว่า ปริมาณสารตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม เช่นเดียวกัน

ข การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคุณ

จากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่ศึกษาสำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรที่ศึกษาและทิศทางของอิทธิพลว่ามีผลในทางบวกหรือทางลบต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนบำบัดสีย้อมและบำบัดค่าซีโอดี โดยตั้งสมมุติฐานคือ

$H_0 : \beta_j = 0$ β_k = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

$H_1 : \beta_j$ ไม่เท่ากับ 0 j = 1, 2, …, k

โดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $|t| > t_{\alpha/2, n-k-1}$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ $|t| = t$ ที่มีค่าเป็นบวกเสมอ

แสดงว่าปัจจัย X_j มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y หรือการเปลี่ยนแปลงของปัจจัย X_j มีอิทธิพลต่อค่าตัวแปรตาม Y

ในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 $t_{0.025,5}$= 2.571 จากตารางที่ 16 พบว่าปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน (X_1) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เนื่องจาก $|t| = 2.762 > t_{0.025,5}$= 2.571 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) เนื่องจาก $|t| = 3.263 > t_{0.025,5}$= 2.571 จากผลการทดสอบพบว่าสมการถดถอยมีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.895 กล่าวคือประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เป็นผลมาจาก ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 89.5 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10.5 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ นอกจากนี้ค่า R^2_{adj} ที่มีค่าสูงเป็นการบ่งบอกถึงความมี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นัยสำคัญของแบบจำลอง (Khuri and Cornall, 2003) โดยสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 แสดงในสมการที่ 7

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5

$$Y = 18.561+2.338X_1+4.567X_2-0.019X_1^2+0.194X_2^2-0.025X_1X_2 \quad (7)$$

ตารางที่ 16 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	18.561	66.808	0.278	0.792
x_1	2.338	0.847	2.762	0.040
x_2	4.567	12.114	0.377	0.722
x_1x_1	-0.019	0.006	-3.263	0.022
x_2x_2	-0.194	0.587	-0.330	0.754
x_1x_2	-0.025	0.070	-0.362	0.732

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.895$; $R^2_{adj} = 0.790$

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 จากตารางที่ 17 พบว่า ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เนื่องจาก $|t| = 3.296 > t_{0.025,5} = 2.571$ และพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) เนื่องจาก $|t| = 3.916 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากผลการทดสอบพบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.944 กล่าวคือประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 เป็นผลมาจาก ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 94.4 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 5.6 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 แสดงในสมการที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5

$$Y = -7.964+2.224X_1+6.072X_2-0.018X_1^2-0.276X_2^2-0.010X_1X_2 \quad (8)$$

ตารางที่ 17 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	-7.964	53.223	-0.150	0.887
x_1	2.224	0.675	3.296	0.022
x_2	6.072	9.650	0.630	0.557
x_1x_1	-0.018	0.005	-3.916	0.011
x_2x_2	-0.276	0.468	-0.591	0.580
x_1x_2	-0.010	0.056	-0.187	0.859

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.944$; $R^2_{adj} = 0.889$

ในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ผลแสดงในตารางที่ 18 พบว่าปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 เนื่องจาก $|t| = 2.721 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) เนื่องจาก $|t| = 2.919 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจากผลการทดสอบพบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.941 กล่าวคือประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 เป็นผลมาจาก ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 94.1 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 5.9 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 แสดงในสมการที่ 9

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198

$$Y = 81.368+0.749X_1+1.023X_2-0.009X_1^2-0.058X_2^2-0.002X_1X_2 \quad (9)$$

ตารางที่ 18 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	81.368	10.835	7.507	0.001
x_1	0.749	0.275	2.721	0.042
x_2	1.023	1.726	0.593	0.579
x_1x_1	-0.009	0.003	-2.919	0.033
x_2x_2	-0.058	0.081	-0.713	0.508
x_1x_2	-0.002	0.019	-0.078	0.941

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.904$; $R^2_{adj} = 0.809$

ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ดังตารางที่ 19 เนื่องจาก $|t| = 3.195 > t_{0.025,5} = 2.571$ และพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) เนื่องจาก $|t| = 4.231 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากผลการทดสอบมีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.885 กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 เป็นผลมาจาก ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าเป็นกรดด่างร้อยละ 88.5 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 11.5 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 แสดงในสมการที่ 10

ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198

$$Y = 12.368+3.128X_1+4.390X_2-0.049X_1^2-0.266X_2^2+0.024X_1X_2 \quad (10)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	12.368	38.575	0.321	0.761
x_1	3.128	0.979	3.195	0.024
x_2	4.390	6.143	0.715	0.507
x_1x_1	-0.049	0.012	-4.231	0.008
x_2x_2	-0.266	0.288	-0.922	0.399
x_1x_2	0.024	0.069	0.346	0.743

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.885$; $R^2_{adj} = 0.771$

พจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 (ตารางที่ 20) เนื่องจาก $|t| = 2.630 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากผลการทดสอบสมการถดถอยที่ได้พบว่ามีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.884 หมายความว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 เป็นผลมาจาก ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 88.4 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 11.6 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 แสดงในสมการที่ 11

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176

$$Y = 86.017+0.317X_1+1.623X_2-0.004X_1^2-0.085X_2^2-0.001X_1X_2 \quad (11)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	86.017	5.069	16.971	0.000
x_1	0.317	0.129	2.462	0.057
x_2	1.623	0.807	2.011	0.101
x_1x_1	-0.004	0.002	-2.630	0.047
x_2x_2	-0.085	0.038	-2.251	0.074
x_1x_2	-0.001	0.009	-0.153	0.885

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.884$; $R^2_{adj} = 0.768$

จากตารางที่ 21 พบว่าพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 คือ เนื่องจาก $|t| = 2.992 > t_{0.025,5} = 2.571$ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากผลการทดสอบสมการถดถอยพบว่ามีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.849 หมายความว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี เป็นผล มาจากปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 84.9 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 15.1 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ สมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์แสดงในสมการที่ 12

ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176

$$Y = 56.358+0.820X_1+3.744X_2-0.016X_1^2-0.238X_2^2+0.032X_1X_2 \quad (12)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	56.358	17.735	3.177	0.025
x_1	0.820	0.456	1.822	0.128
x_2	3.477	2.825	1.325	0.242
x_1x_1	-0.016	0.005	-2.992	0.030
x_2x_2	-0.238	0.133	-1.795	0.133
x_1x_2	0.032	0.032	1.007	0.360

หมายเหตุ Significant at 5% level ($p < 0.05$) $R^2 = 0.849$; $R^2_{adj} = 0.699$

2.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ในการนำสมการถดถอยที่สร้างขึ้นไปใช้งาน จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย โดยมีข้อตกลงเบื้องต้นคือ ความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวต้องมีการแจกแจงปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความแปรปรวนคงที่ โดยการตรวจสอบความเหมาะสมมีดังนี้

ก การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยที่สร้างขึ้นโดยวิธี normal probability plot ดังภาพที่ 3 4 และ 5 ซึ่งแสดงถึง normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม (ก) และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี (ข) ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ตามลำดับ พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลในกราฟ มีแนวโน้มการกระจายตัวเป็นเส้นตรง แต่ยังมีข้อมูลบางค่าที่มีการกระจายตัวออกนอกแนวเส้นตรง ดังนั้นจึงทำการทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov เพื่อยืนยันผลการทดลอง (วิยะดา, 2546) โดยตั้งสมมุติฐานทางสถิติคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

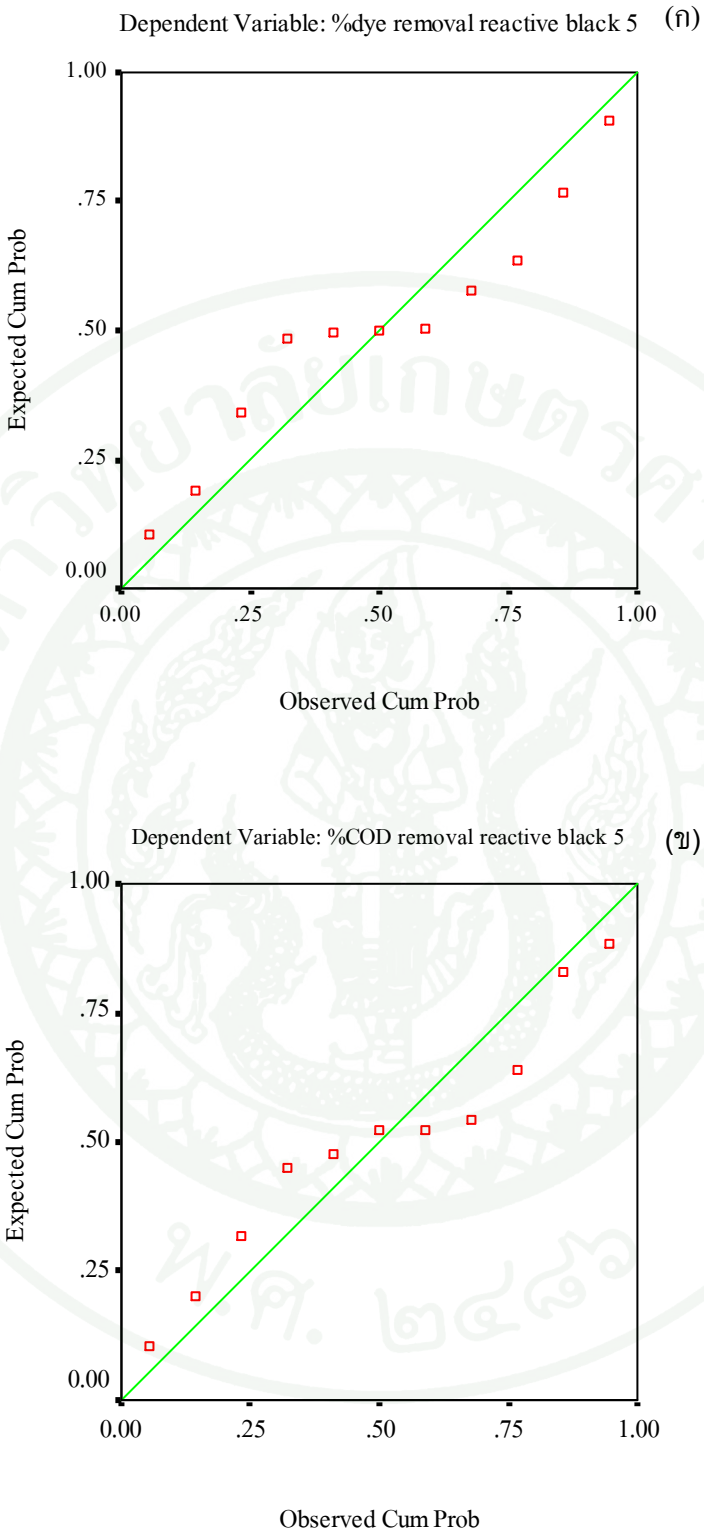
H_0 : ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ

H_1 : ความคลาดเคลื่อนไม่มีการแจงปกติ

เมื่อพิจารณาระดับนัยสำคัญ 0.05 ถ้าค่านัยสำคัญของการทดสอบมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าความคาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

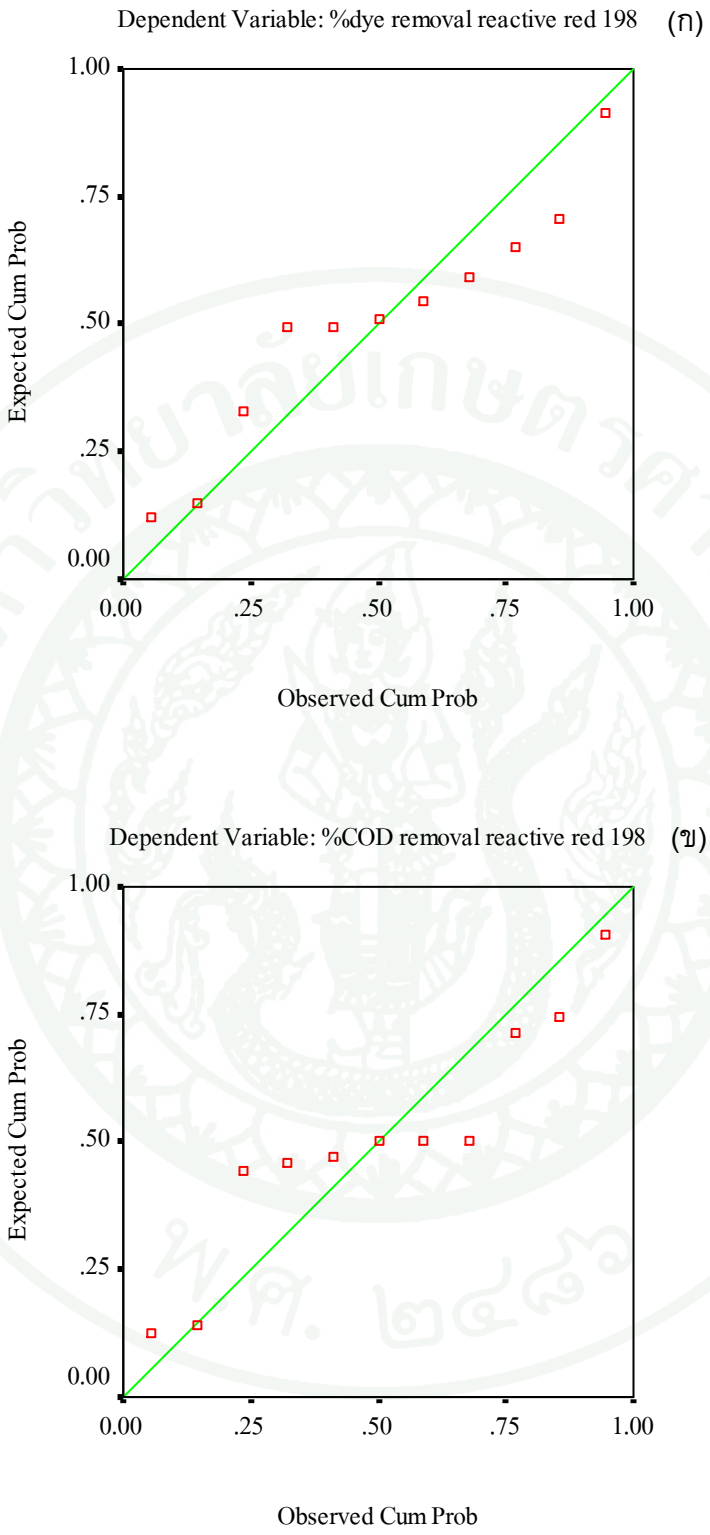
ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 22 พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่านัยสำคัญของการทดสอบของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำเสียสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิดมีค่านัยสำคัญสูงกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยของประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 มีการแจกแจงความคลาดเคลื่อนเป็นไปแบบปกติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



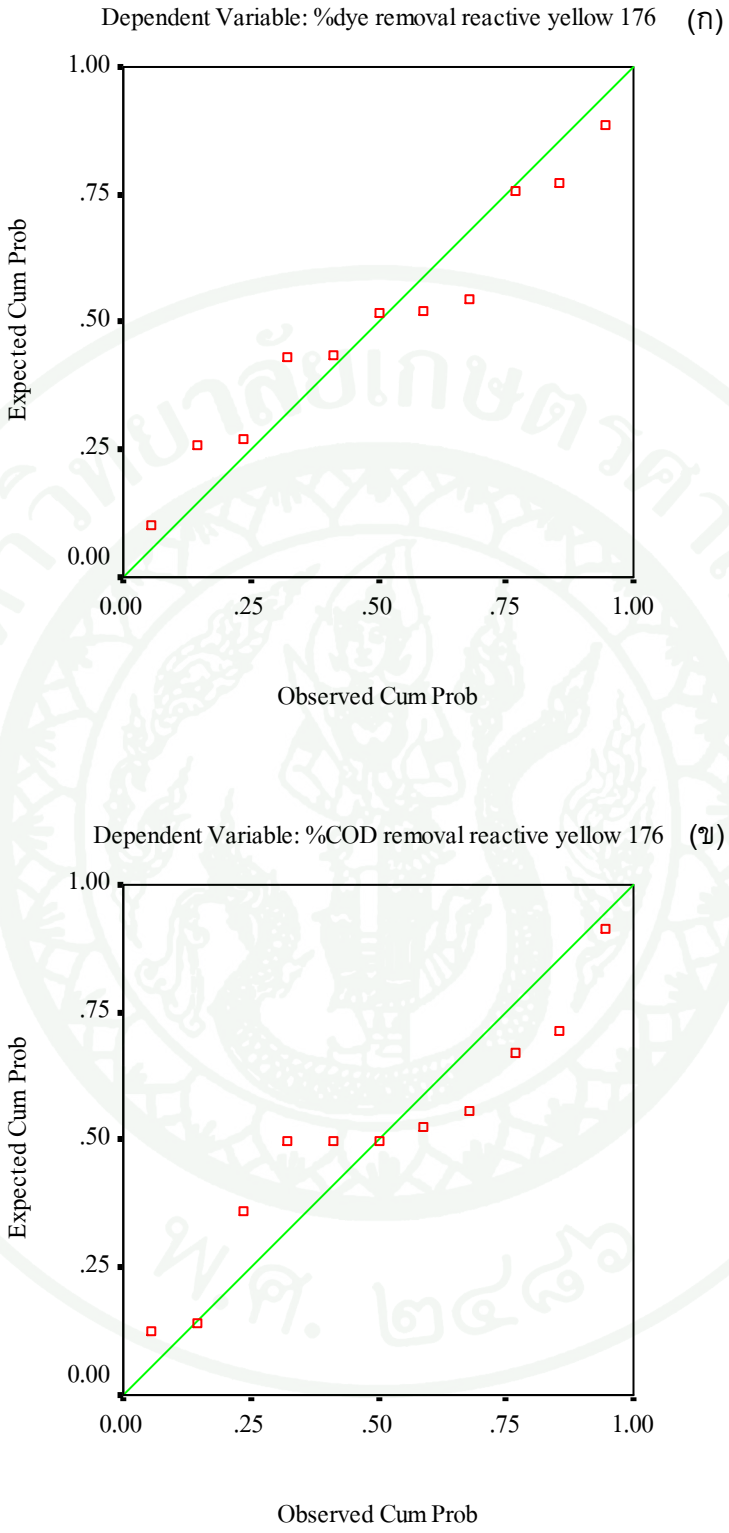
ภาพที่ 3 Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 Normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

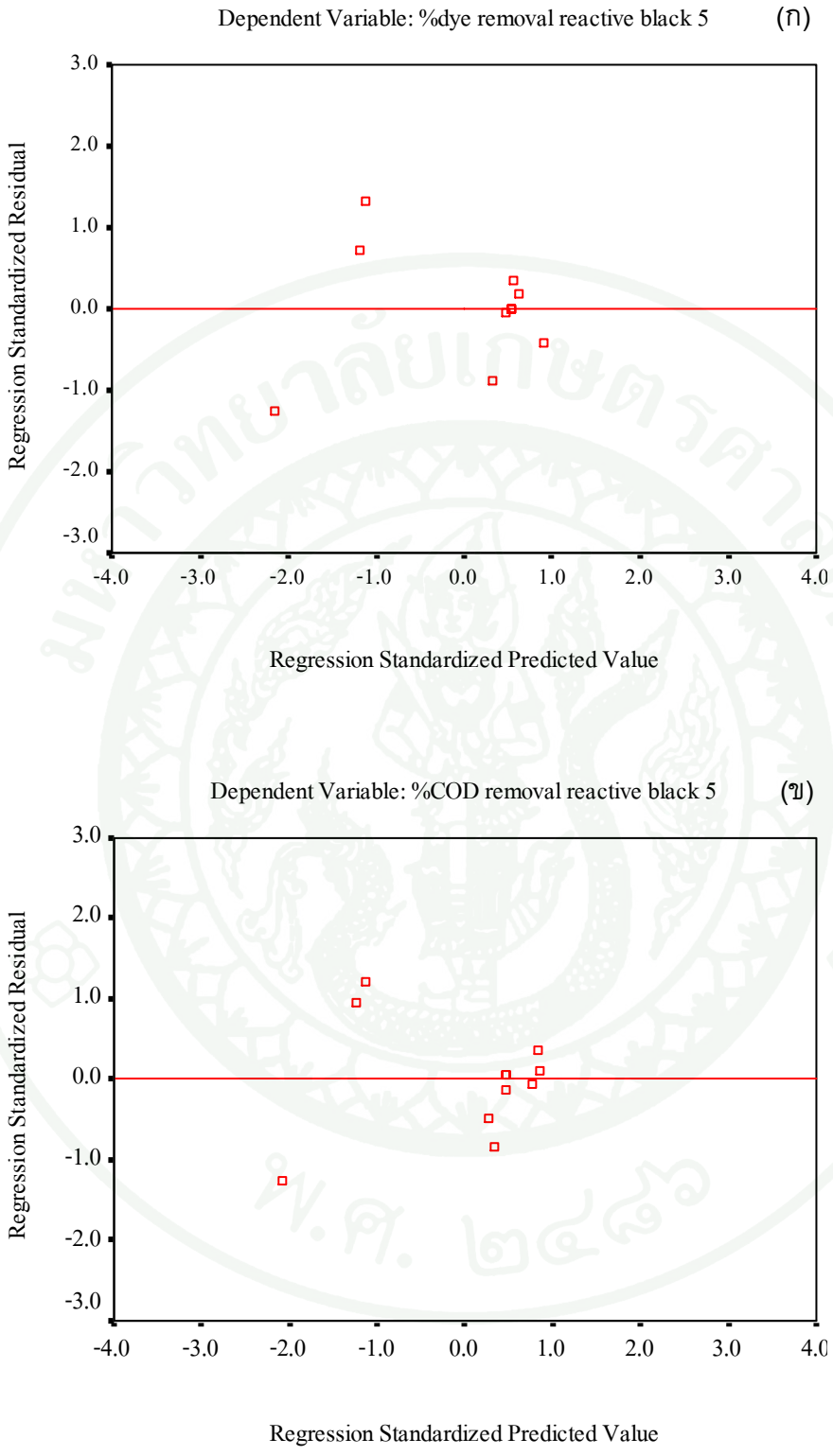
ตารางที่ 22 การทดสอบการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov สำหรับการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176

	Statistic	df	Sig.
Reactive black 5			
%dye removal	0.214	11	0.172
%COD removal	0.209	11	0.196
Reactive red198			
%dye removal	0.251	11	0.051
%COD removal	0.241	11	0.074
Reactive yellow 176			
%dye removal	0.166	11	0.200
%COD removal	0.223	11	0.131

ข การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

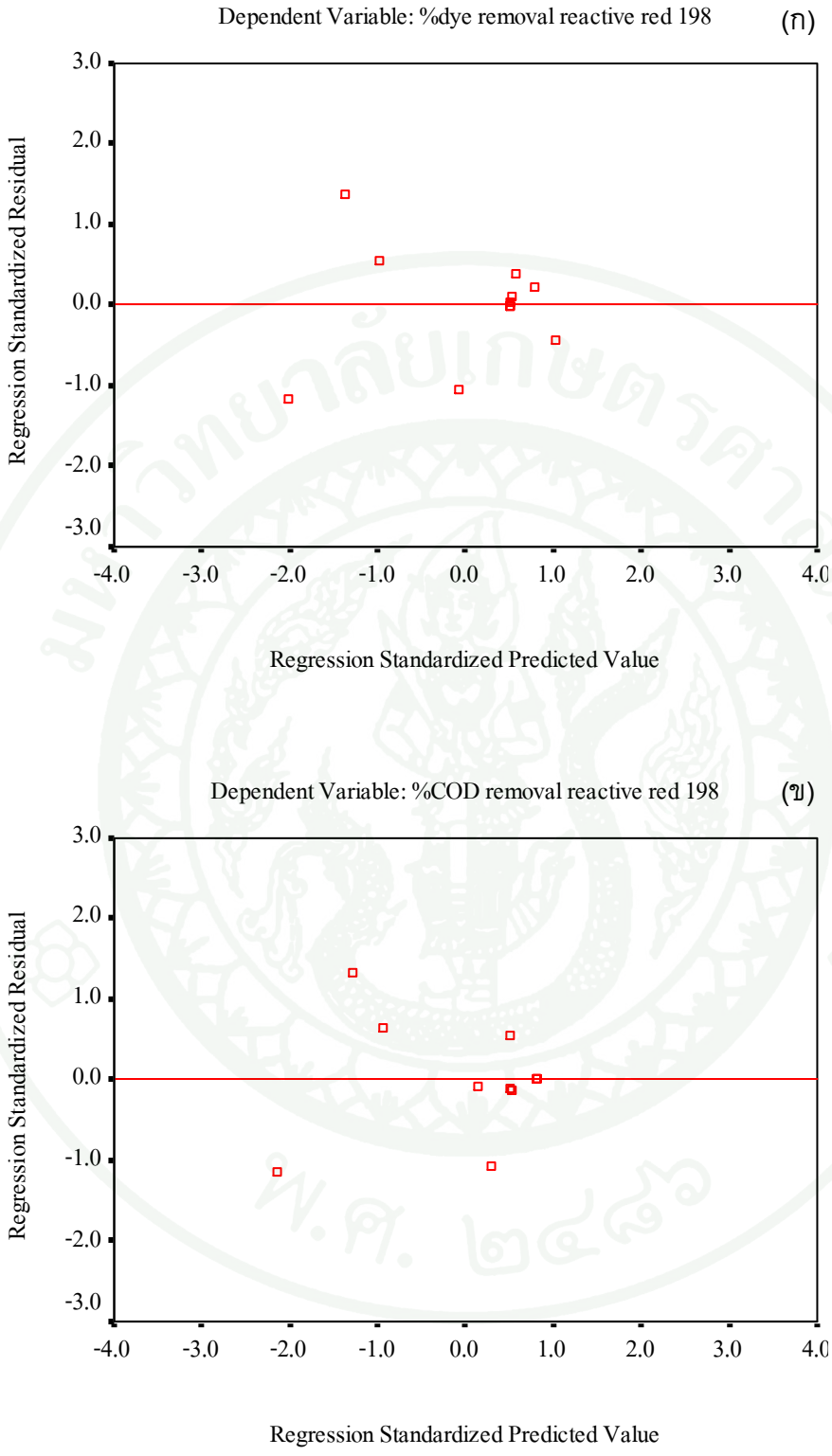
การทดสอบความคงที่ของ ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน เป็นข้อกำหนดหนึ่งของรูปแบบการวิเคราะห์ถดถอย พิจารณาจาก scatter plot ระหว่าง ค่า regression standardized residual บนแกน Y และค่า regression standardized predicted value บนแกน X ดังภาพที่ 6 7 และ 8 แสดงถึง scatter plot ระหว่าง ค่า regression standardized residual และค่า regression standardized predicted value สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม (ก) และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี (ข) ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ตามลำดับพบว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ เนื่องจาก ถ้าความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ จุด resiuals ที่พล็อตจะอยู่ในแนวรอบๆเส้นศูนย์กลาง (วิรัชช, 2546) และจุดที่พล็อตมีการกระจัดกระจายอย่างไม่เป็นรูปแบบ (อัจฉริยา, 2547) จึงบอกได้ว่าสมการถดถอยของประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และRY176 มีค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



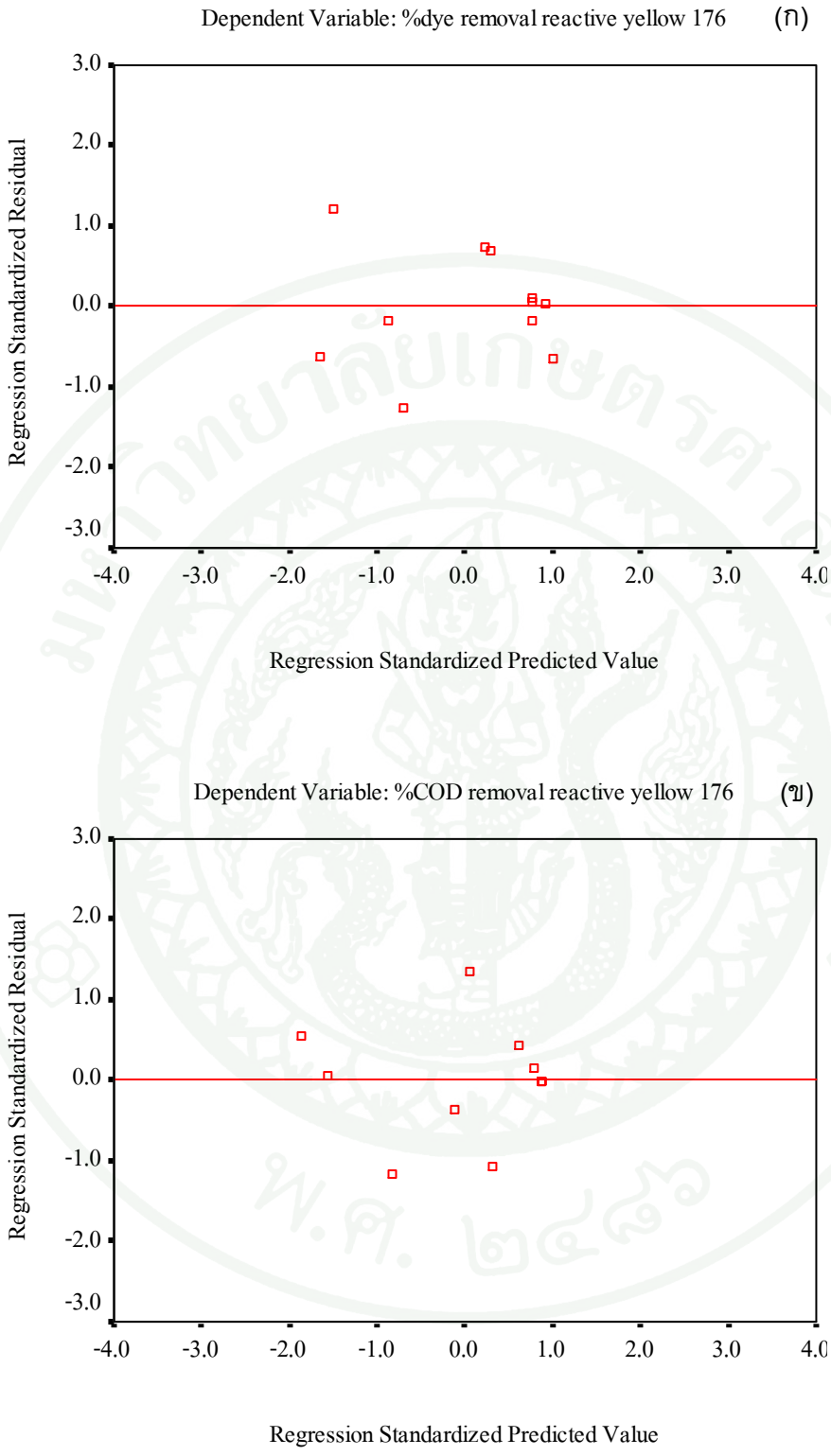
ภาพที่ 6 Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค การทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ถดถอย ความคลาดเคลื่อน (Residual : e)แต่ละตัวจะมีความเป็นอิสระต่อกัน จากการทดสอบโดยใช้ค่าสถิติ Durbin – Watson (วิยะดา, 2546) โดยทำการตั้งสมมุติฐานคือ

H_0 : e_i และ e_i-1 เป็นอิสระต่อกัน e_i = ค่าความคลาดเคลื่อน

H_1 : e_i และ e_i-1 ไม่เป็นอิสระต่อกัน

ค่า Durbin – Watson ที่ได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0–4 ถ้าค่ามีค่าเข้าใกล้ 2 จะถือว่าไม่อยู่ในนัยสำคัญ นั้นคือ e_i และ e_i-1 เป็นอิสระต่อกัน

พบว่า สมการถดถอยประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และสมการถดถอยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 มีค่าสถิติ Durbin Watson ใกล้เคียง 2 ดังตารางที่ 23 ซึ่งหากค่าสถิติ Durbin Watson มีค่าเข้าใกล้ 2 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนแต่ละค่าเป็นอิสระกัน (อัจฉริยา, 2547) จึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อน ของสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 มีค่าความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 23 ค่าสถิติ Durbin – Watson การวิเคราะห์การถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176

	Durbin – Watson statistic	
	%dye removal	%COD removal
Reactive black 5	1.949	1.305
Reactive red 198	1.838	1.414
Reactive yellow 176	1.912	1.364

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.3 การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมและบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176

เมื่อนำสมการถดถอยที่เหมาะสมไปทำนายผลของประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทำนายดังแสดงในตารางที่ 24 และ 25 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการถดถอยที่สร้างขึ้น พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

จากการทำนายของสมการถดถอย เทียบกับค่าการทดลองจริงดังภาพที่ 9 10 และ 11 แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม (ก) และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี (ข) ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ตามลำดับ พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง

ตารางที่ 24 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง

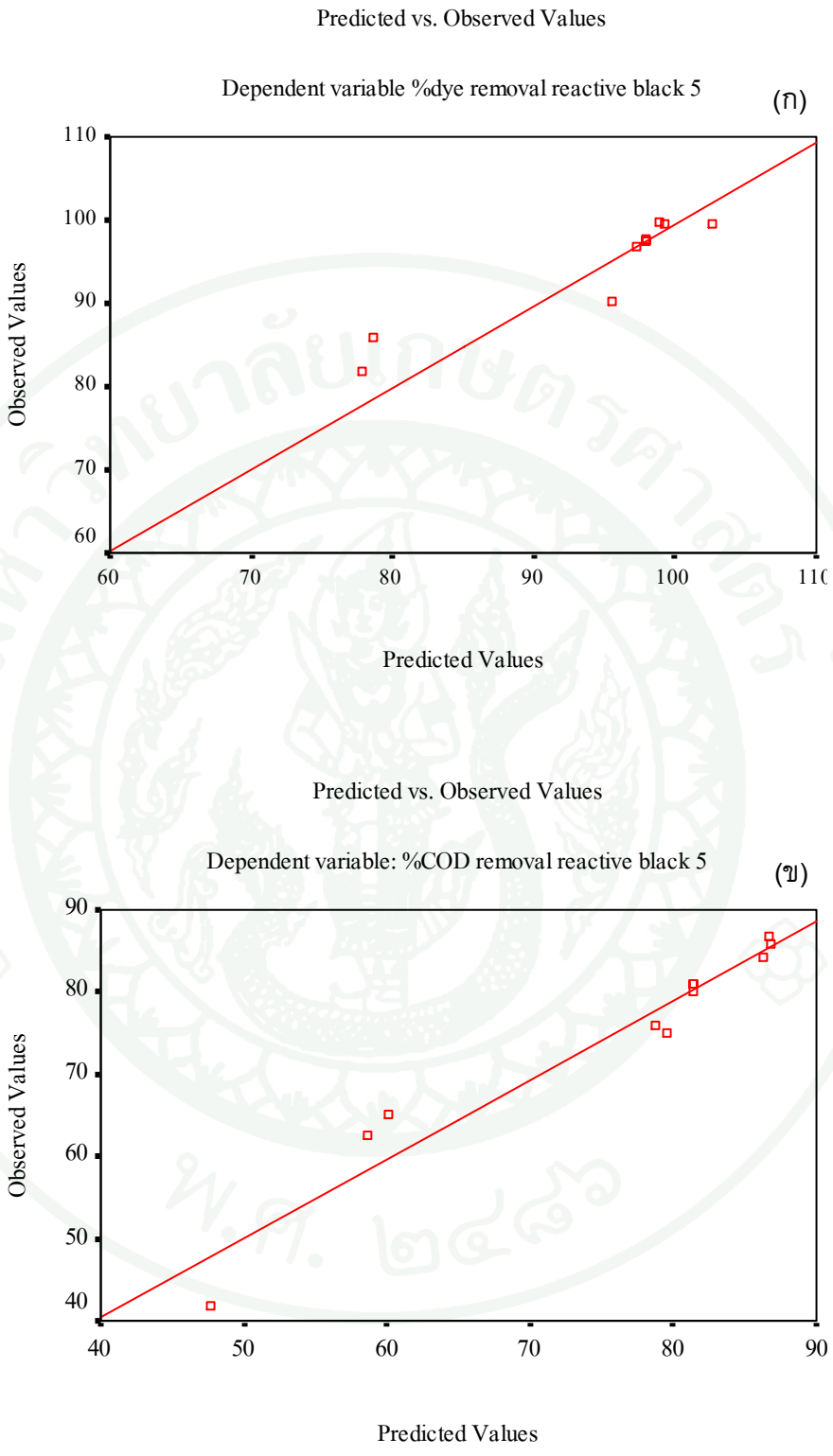
treatment	Dye removal efficiency (%)					
	Reactive black 5		Reactive red 198		Reactive yellow 176	
	experimental	predicted	experimental	predicted	experimental	predicted
1	99.63	99.31	99.7	99.89	99.11	99.05
2	81.82	77.84	97.22	96.9	98	98.14
3	99.6	102.561	99.84	100.76	99.16	99.52
4	85.87	78.59	97.2	96.19	98.06	97.75
5	96.75	97.29	99.44	99.66	99.14	98.98
6	59.57	66.69	94.18	95.10	97.3	97.61
7	90.2	95.51	97.54	98.55	97.73	98.37
8	99.83	98.82	99.94	100.44	99.34	99.50
9	97.55	97.95	99.3	99.57	99.26	99.36
10	97.61	97.95	99.3	99.57	99.24	99.36
11	97.64	97.95	99.33	99.57	99.16	99.36

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง

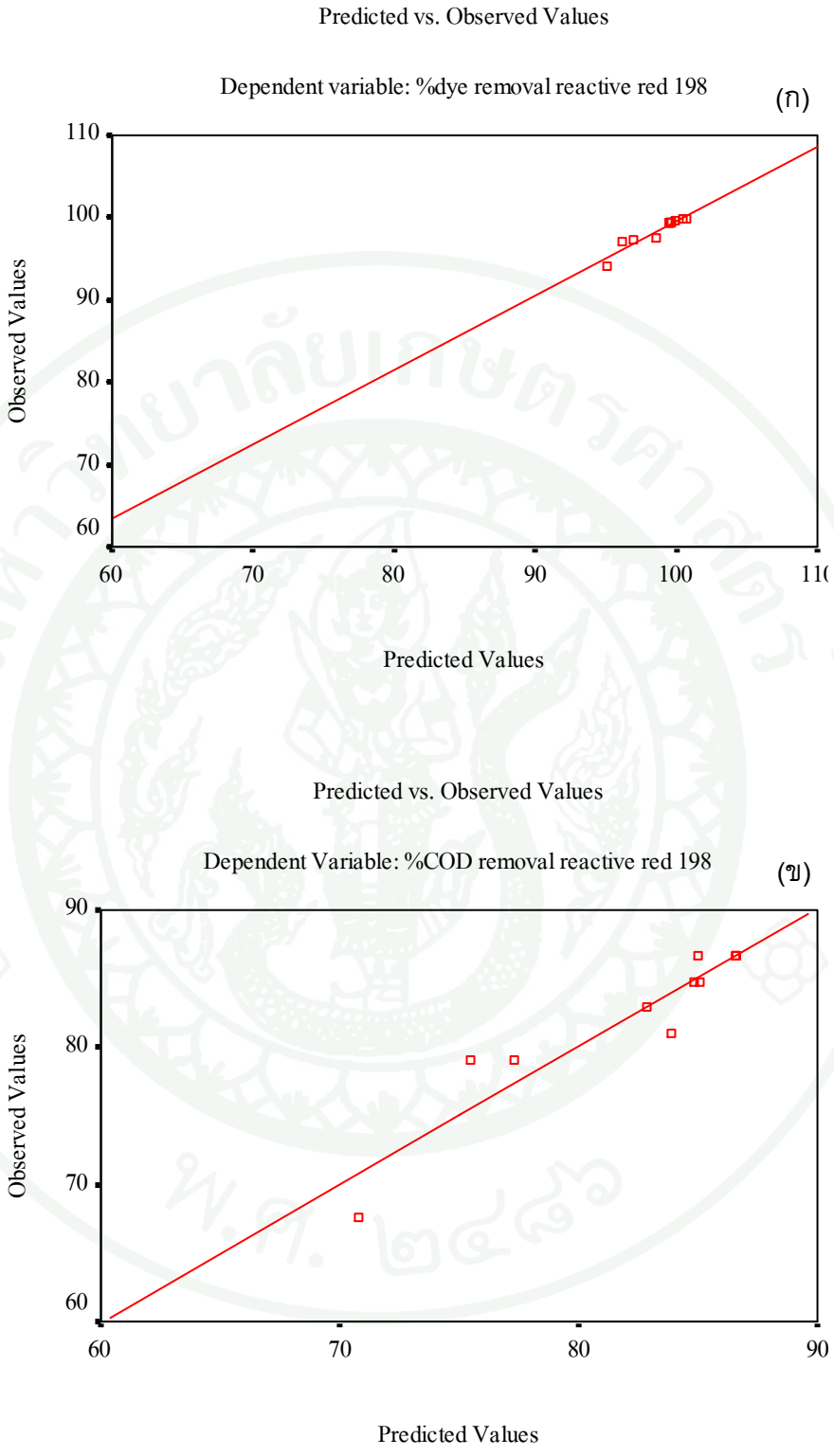
treatment	COD removal efficiency (%)					
	Reactive black 5		Reactive red 198		Reactive yellow 176	
	experimental	predicted	experimental	predicted	experimental	predicted
1	86.72	86.64	86.7	84.98	89.83	89.57
2	62.67	58.66	79.1	77.26	84.75	86.20
3	85.9	86.82	84.8	84.86	87.29	88.52
4	65.15	60.08	79.1	75.46	84.75	84.69
5	75.94	78.71	84.8	85.07	89.83	88.05
6	41.93	47.62	67.63	70.76	84.75	84.05
7	75.11	79.59	81	83.89	87.29	87.74
8	84.24	86.30	82.9	82.86	89.83	89.14
9	80.92	81.36	86.7	86.61	89.83	89.80
10	80.92	81.36	86.7	86.61	89.83	89.80
11	80.09	81.36	86.7	86.61	89.83	89.80

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



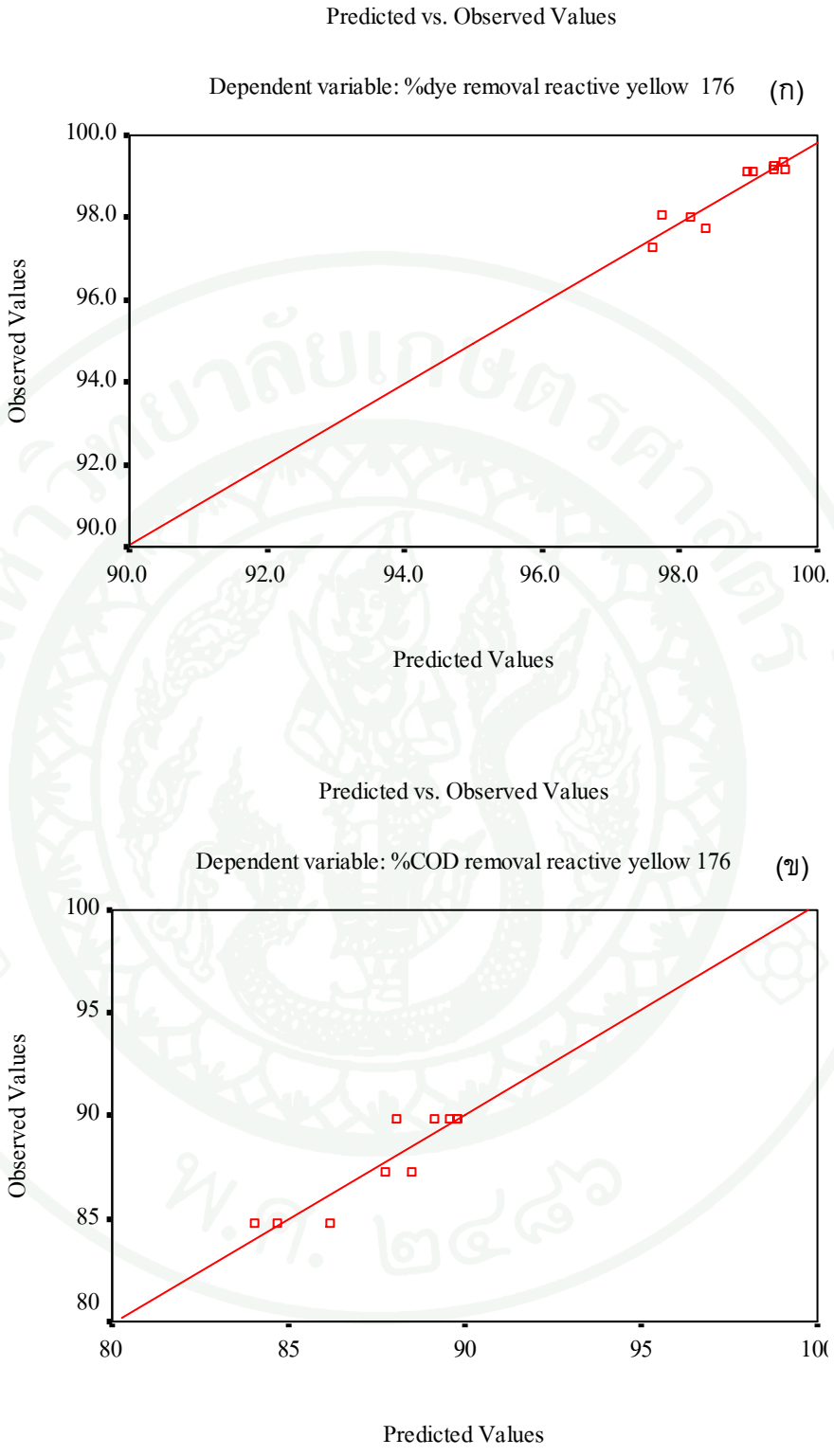
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RB5 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RR198 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และ(ข) ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีสังเคราะห์ RY176 จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 การหาจุดเหมาะสมของตัวแปรที่ศึกษาต่อการบำบัดน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176

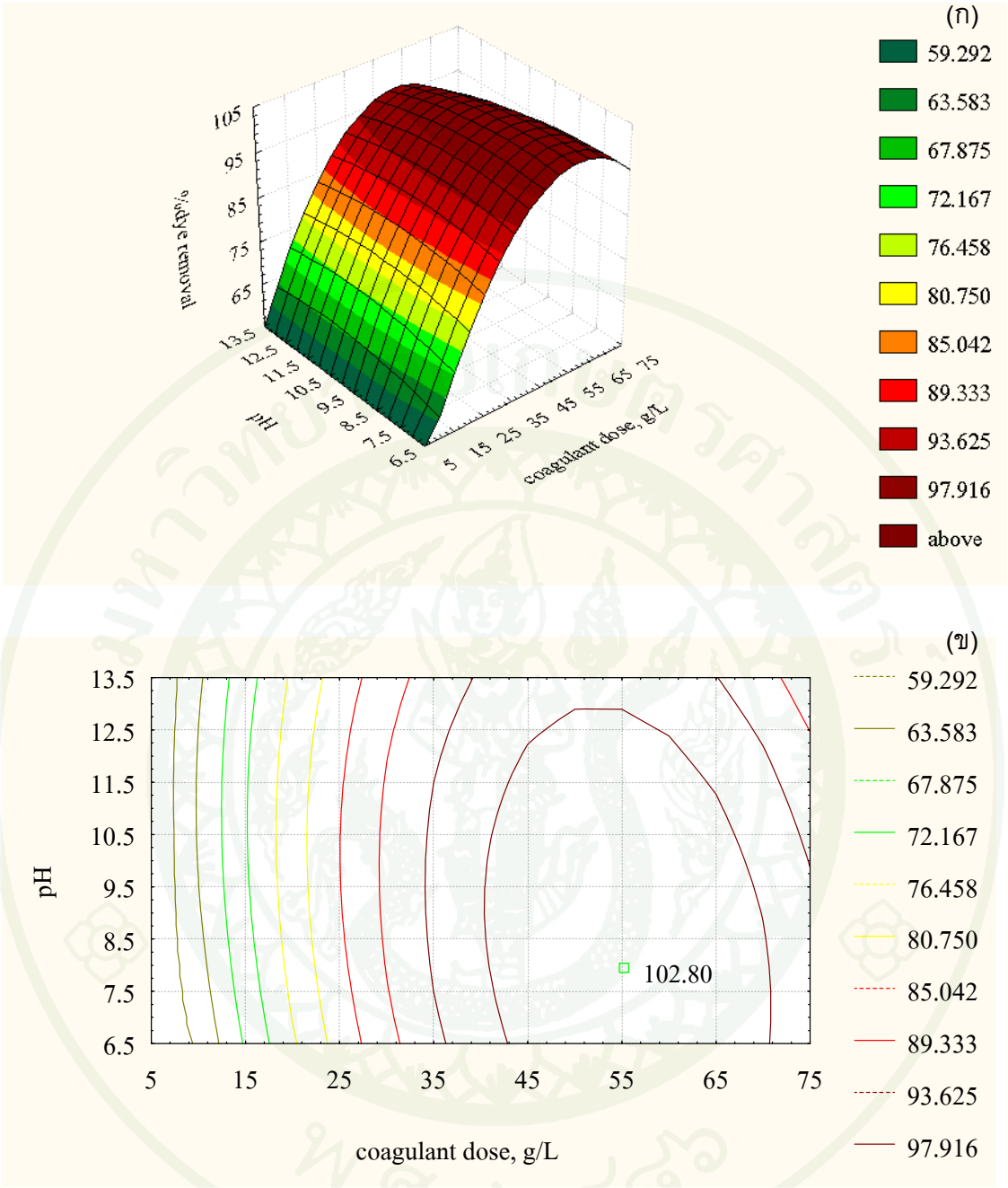
กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ผลของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอนและค่าความเป็นกรดด่าง ต่อการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย $Ca(OH)_2$ แสดงดังภาพที่ 12 13 และ 14 ตามลำดับ โดยภาพกราฟพื้นผิวแสดงถึงจุดสูงสุดที่ชัดเจน จุดเหมาะสมสำหรับค่าการตอบสนองที่สนใจมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีผลเหมือนกับศึกษาการตกตะกอนน้ำชะขยะโดยใช้ PAC เป็นสารตกตะกอน เพื่อบำบัดค่าซีโอดี ค่าความขุ่น สี และค่าแข็งแขวนลอย ของ Ghafari *et al*. (2008) แสดงให้เห็นถึงจุดเหมาะสมของการตกตะกอน ซึ่งอยู่ที่พื้นที่จุดสูงสุดของกราฟพื้นผิวตอบสนองเช่นเดียวกัน จากกราฟของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจะเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งหากเพิ่มสารตกตะกอนขึ้นมากกว่าจุดเหมาะสมนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับการศึกษาของ Papic *et al*. (2004) ที่ทำการตกตะกอนน้ำเสียสังเคราะห์ RR45 ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $AlCl_3$ สามารถบำบัดสีย้อมได้ถึงร้อยละ 99 ที่ปริมาณสารตกตะกอน 3 กรัมต่อลิตร แต่หากเพิ่มปริมาณสารตกตะกอนเป็น 5 กรัมต่อลิตรประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง โดยที่ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลางถึงเป็นเบส และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเท่าใดนักเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารตกตะกอน เนื่องจากการตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ ในปริมาณมากจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าสูงค่อนข้างเป็นด่าง ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับการการศึกษาของ Zhu *et al.* (2007) ที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างมีผลน้อยมาก ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ acid blue 80 โดยใช้ Alkaline white mud (AWM) ที่มี Ca^{2+} และ Mg^{2+} เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากความเป็นด่างที่มีค่าสูง และมีความเป็นพีเอชบัฟเฟอร์ และการศึกษาตกตะกอนน้ำเสียสีย้อมจากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Georgiou *et al*., 2003) พบว่าเมื่อใช้ $CaOH_2$ ปริมาณ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารตกตะกอนโดยไม่ทำการปรับค่าความเป็นกรดด่างของน้ำเสีย ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 80 ถึงร้อยละ 90 ค่าความเป็นกรดด่างภายหลังการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 13

จากกราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถทำนายได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 55 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 8 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 102.80 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

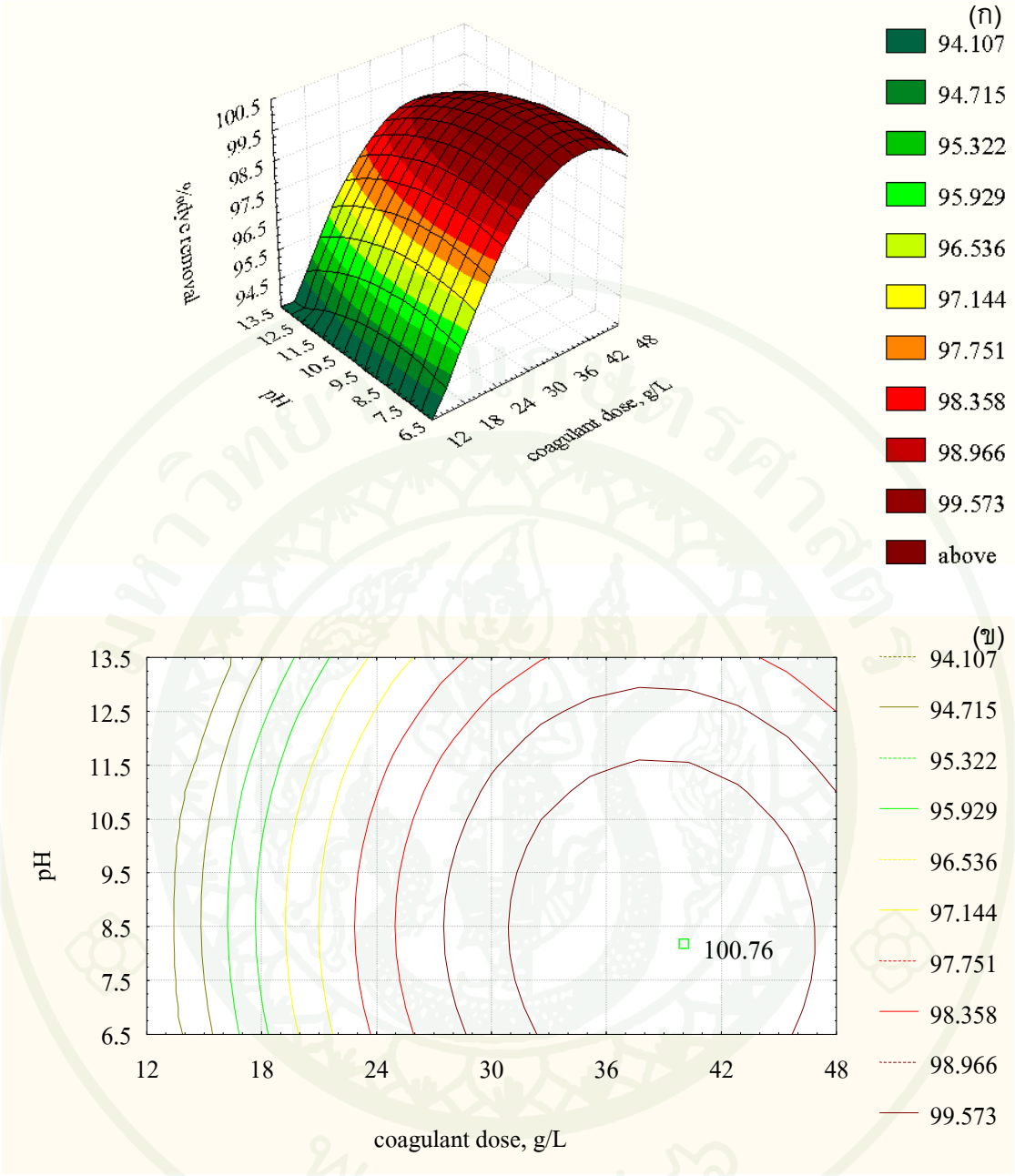
สีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 40.5 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 8.25 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 100.76 และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 38 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 9.5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 99.67

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



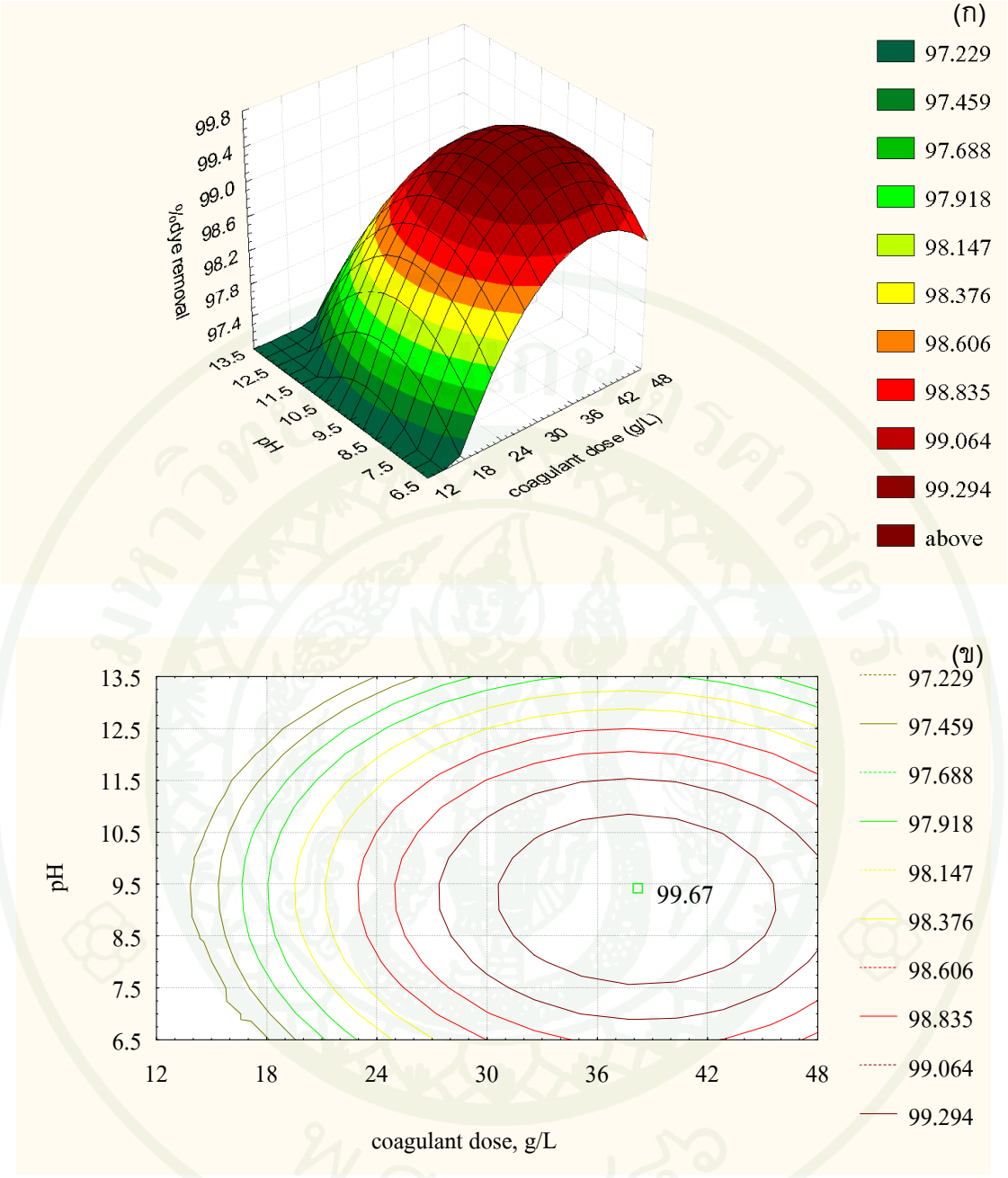
ภาพที่ 12 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 13 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



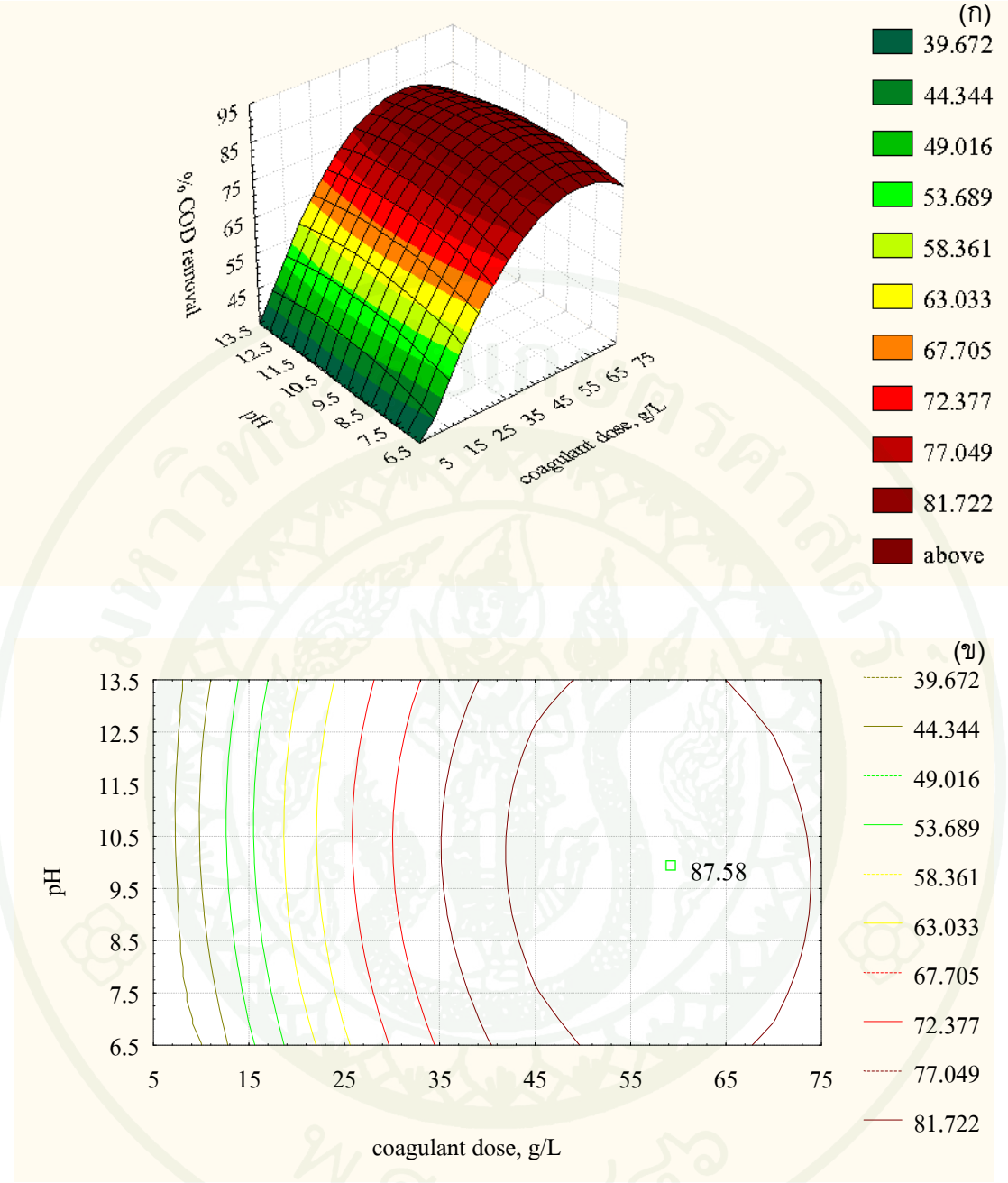
ภาพที่ 14 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ดังแสดงในภาพที่ 15 16 และ 17 ตามลำดับ ซึ่งแสดงกราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ผลของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง เพื่อบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย $Ca(OH)_2$ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีจะเพิ่มมากขึ้นแต่หลังจากนั้น หากมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการตกตะกอนเข้าไปอีกจนเลยจุดเหมาะสมของการตกตะกอนจะส่งผลให้ค่าซีโอดีกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแทน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีจะเริ่มลดลง และเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น แต่ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงที่เป็นกลางถึงเป็นเบสเล็กน้อย ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับการบำบัดสีย้อม เนื่องมาจาก ค่าซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นมีที่มาจากอนุภาคของสีย้อมที่เติมลงไป ดังนั้นหากประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่าสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีมีค่าสูงตามไปด้วย โดยมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับการทดลองของ Song *et al*. (2004) ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังโดยใช้การตกตะกอนทางเคมีโดย $Al_2(SO_4)_3$ และ $FeCl_3$ เป็นสารตกตะกอนเพื่อลดค่าซีโอดีและ โครเมียม (Cr^{6+}) ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30 ถึงร้อยละ35 ที่ปริมาณสารตกตะกอน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 7.5 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตกตะกอนมากกว่าจุดเหมาะสมที่ 800 มิลลิกรัมต่อลิตรจะส่งผลให้ค่าซีโอดีกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

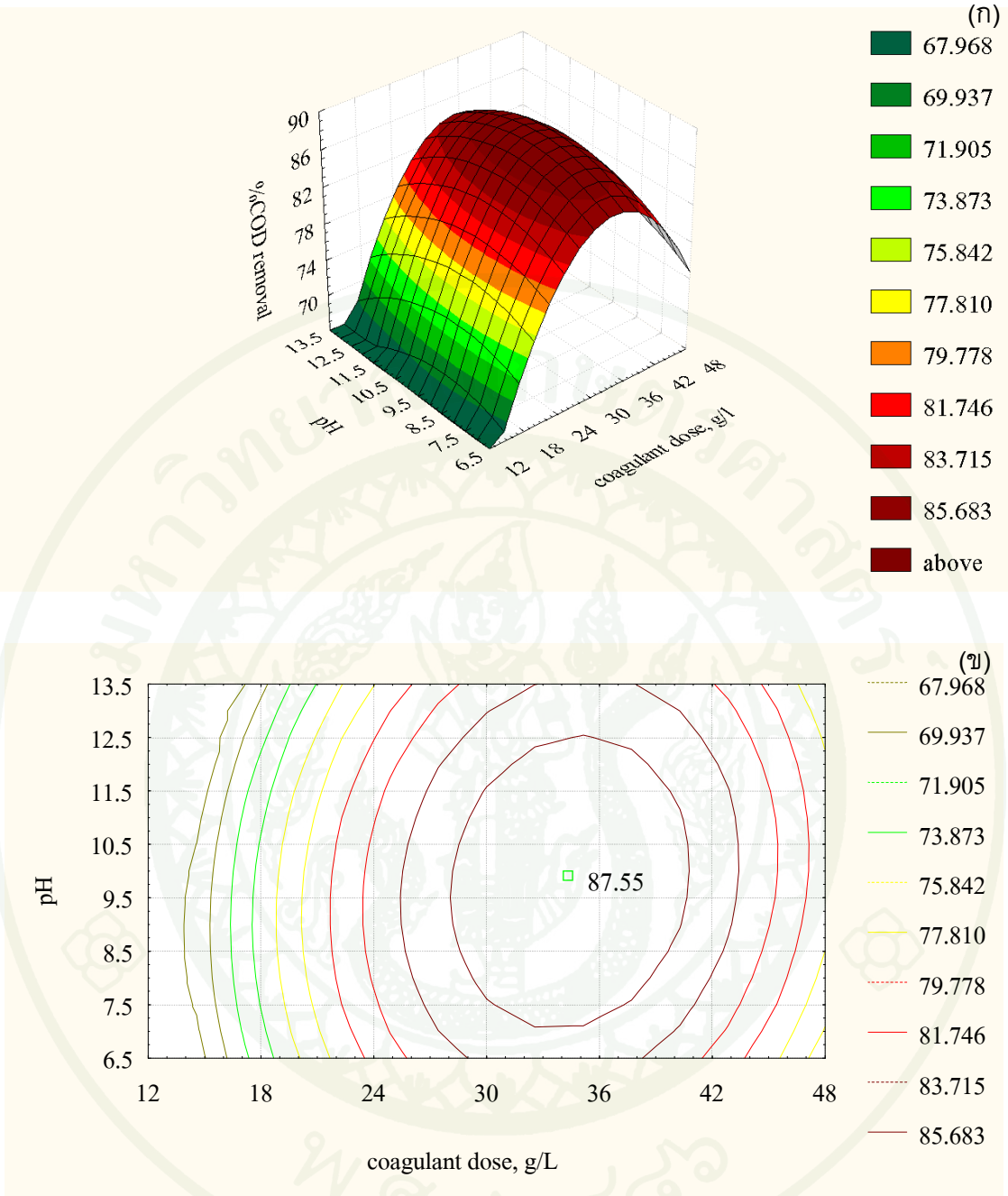
จากกราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถทำนายได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 59 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 87.85 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 34 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 9.75 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 87.55 และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 35 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 90.30

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



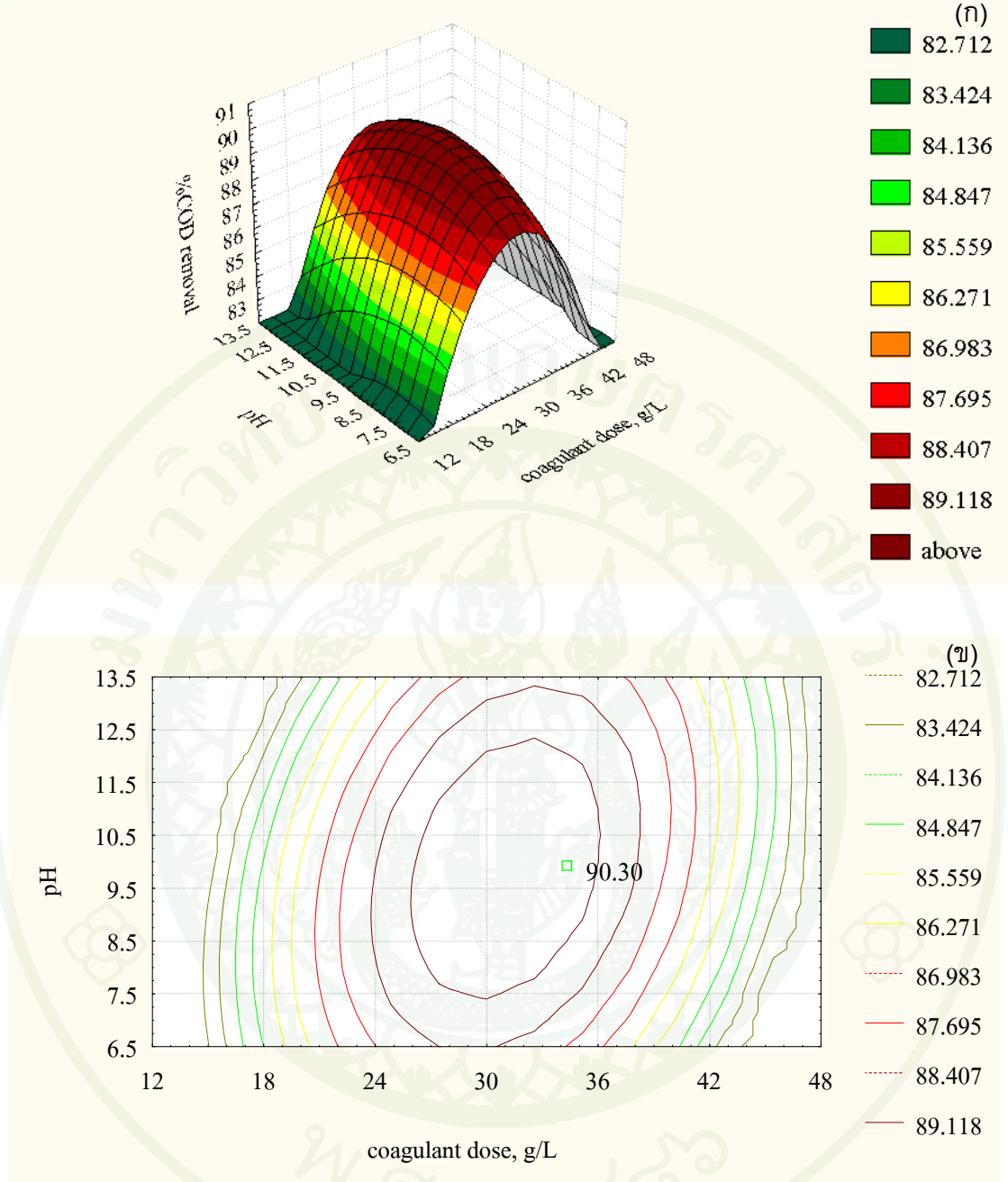
ภาพที่ 15 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RR198 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แต่ในการบำบัดน้ำเสีย ต้องการสภาวะที่เหมาะสมเพียงสภาวะเดียวที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่เหมาะสม ซึ่งสามารถหาจุดเหมาะสมนั้นได้โดยการรวมกราฟคอนทัวร์ของค่าการตอบสนองที่สนใจเข้าด้วยกัน และหาพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับเงื่อนไขที่ตั้งไว้ (อนุวัตร, 2549) คือประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดเหมาะสมที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ ที่กราฟทั้ง 2 ซ้อนทับกัน โดยจากตารางที่ 26 จุดเหมาะสมของการตกตะกอนของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการรวมกราฟคอนทัวร์ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมและค่าซีโอดี เมื่อทำการทดลองจริงเพื่อยืนยันผลการทำนายที่ได้จากสมการถดถอย พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 26 เปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงและผลการทำนายจากแบบจำลองประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

condition	Responses	
	Dye removal (%)	COD removal (%)
Reactive black 5	Coagulant dosage = 53 g/L (pH 9.75)	
Experimental Value	99.68	92.53
Model response	102.27	87.18
Reactive red 198	Coagulant dosage = 34 g/L (pH 10)	
Experimental Value	99.47	91.74
Model response	100.18	87.54
Reactive yellow 176	Coagulant dosage = 34 g/L (pH 10)	
Experimental Value	99.4	91.71
Model response	99.56	90.26

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

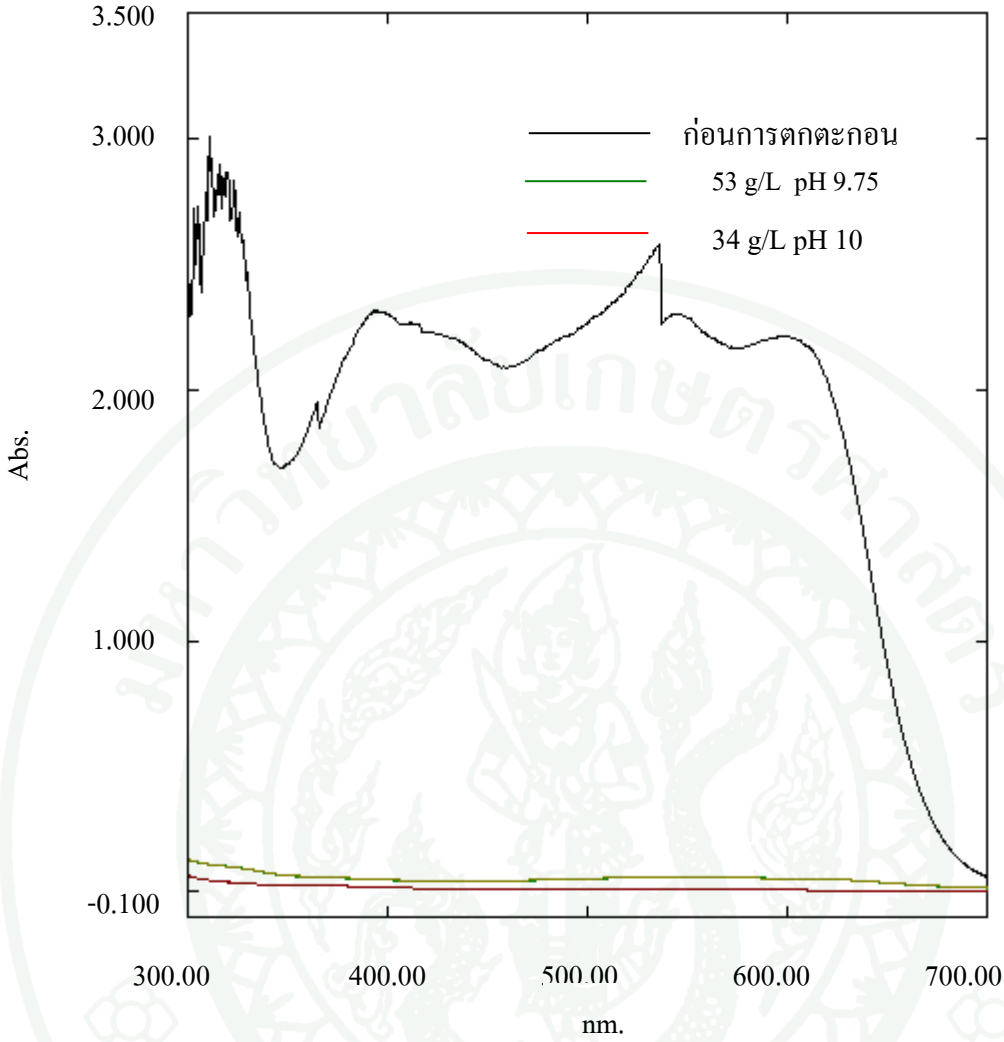
ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนเพื่อบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดีสำหรับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดที่ได้จากการทดลอง จะถูกนำไปใช้ในการทดลองหาจุดเหมาะสม และความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำสีผสม ในขั้นตอนต่อไป

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการตอบสนองที่พื้นผิวสำหรับการตกตะกอนน้ำสีผสม

นำสารตกตะกอนที่เหมาะสมจากการทดลองในข้างต้นคือ $Ca(OH)_2$ มาใช้ในการทดลองหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนสำหรับน้ำสีผสม ซึ่งกำหนดให้เป็นสีย้อมที่มีลักษณะคล้ายกับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีการผสมรวมของสีย้อมหลายชนิด

เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของน้ำสีผสม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดสีย้อม RB5 RR198 และ RY176 และทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง เนื่องจากไม่สามารถทำการตรวจวัดโดยตรงได้ ดังภาพที่ 18 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีผสมภายหลังการบำบัดมีค่าลดต่ำลงมาก โดยจากภาพจะเห็นได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าลดต่ำลงจนมีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งบอกได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 เมื่อทำการตกตะกอนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนสี RB5 และสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนสี RR198 และRY176 มีแนวโน้มเดียวกับการศึกษาของ Gao *et al.* (2007) ซึ่งทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงภายหลังการตกตะกอนของเสียสีย้อม Reactive yellow K-4G และ dispersed dark red P-R ภายหลังการตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ และ $MgCl_2$ ร่วมกันพบว่า ภายหลังจากการบำบัด เมื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง กราฟไม่มีการแสดงลักษณะของพีคของสีย้อมในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าอนุภาคสีย้อม เปลี่ยนสภาพจากสารละลายไปสู่ตะกอน จากกระบวนการตกตะกอน ซึ่งสามารถแยกตะกอนออกจากน้ำได้ง่าย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายหลังจากการบำบัดด้วยสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการทดลอง

ทำการทดลองหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนเพื่อบำบัดค่าซีโอดีสำหรับน้ำสีผสม โดยออกแบบการทดลองสำหรับวิธี response surface methodology ใช้การออกแบบการทดลอง central composite design แบ่งปัจจัยออกเป็น 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, +1, $+\alpha$) ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) โดยการกำหนดค่าของระดับปัจจัยแต่ละระดับได้จากข้อมูลช่วงที่เหมาะสมในการตกตะกอนจากการทดลองการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ในขั้นที่ 2 ซึ่งสามารถกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆได้ดังนี้คือ ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอน 7.17 8 10 12 และ 12.83 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน 25.86 30 40 50 และ 54.14 กรัมต่อลิตร ซึ่งกำหนดค่าของปัจจัยต่างๆดังแสดงในตารางที่ 27

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 27 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษาโดยวิธี central composite design สำหรับการตกตะกอนน้ำสีผสม ด้วย $Ca(OH)_2$

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.414	-1	0	1	1.414
ปริมาณสารตกตะกอน, X_1 (กรัม/ลิตร)	25.86	30	40	50	54.14
ค่าความเป็นกรดด่าง, X_2	7.17	8	10	12	12.83

ตกตะกอนน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมขึ้นจากการผสมสีย้อม 3 ชนิดคือ reactive black 5 reactive red 198 และ reactive yellow 176 โดยใช้ $Ca(OH)_2$ โดยทำการตกตะกอนตามการทดลองที่ออกแบบไว้ 11 การทดลองดังแสดงในตารางที่ 28 จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำภายหลังการทดลอง และนำไปทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี เมื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอน ซึ่งได้แก่ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) โดยในตารางที่ 28 แสดงถึงประสิทธิภาพของการบำบัดค่าซีโอดี ภายหลังการตกตะกอนทั้ง 11 การทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 28 การออกแบบการทดลองโดยใช้ central composite design และผลการทดลองการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วย $Ca(OH)_2$

Run	Panel A		Panel B		%COD removal
	X_1	X_2	Coagulant dosage, X_1 (g/L)	pH, X_2	
1	+1	+1	50.00	12.00	87.18
2	-1	-1	30.00	8.00	88.46
3	+1	-1	50.00	8.00	88.46
4	-1	+1	30.00	12.00	88.03
5	0	-1.414	40.00	7.172	82.05
6	-1.414	0	25.86	10.00	87.18
7	0	+1.414	30.00	12.828	82.05
8	+1.414	0	54.14	10.00	87.17
9	0	0	30.00	10.00	82.05
10	0	0	30.00	10.00	82.05
11	0	0	30.00	10.00	87.18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 การวิเคราะห์การถดถอย

ก การทดสอบสมมุติฐานของสมการถดถอย

นำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตามชุดการทดลองในตารางที่ 15 ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคุณ เพื่อประเมินว่าปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 2 ค่าคือปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และค่าความเป็นกรดด่าง (X_2) มีผลต่อการตกตะกอนน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย $Ca(OH)_2$ เพื่อบำบัดค่าซีโอดี ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 29 มีค่าสถิติ F เท่ากับ 6.360 ด้วยค่า degree of freedom เท่ากับ (5,5) โดยที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่ามีค่ามากกว่าค่า $F_{0.05,5,5} = 5.05$ จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าปริมาณสารตกตะกอน หรือค่าความเป็นกรดด่าง อย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	71.397	5	14.279	6.360	0.032(a)
Residual	11.226	5	2.245		
Total	82.622	10			

หมายเหตุ Predictors: (Constant), X_1X_2, X_1^2, X_2^2, X_2, X_1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคุณ

ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษา ดังแสดงผลในตารางที่ 30 เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรที่ศึกษาและทิศทางของอิทธิพลว่ามีผลในทางบวกหรือทางลบต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม

ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 $t_{0.025,5}$= 2.571 จากตารางที่ 30 พบว่าพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม เนื่องจาก $|t| = 2.625 > t_{0.025,5}$= 2.571ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และพจน์กำลังสองของค่าความเป็นกรดด่าง (X_2^2) เนื่องจาก $|t| = 2.629 > t_{0.025,5}$= 2.571 โดยรูปแบบสมการถดถอยที่ได้ดังแสดงในสมการที่ 13

$$Y = 19.151+1.448X_1+7.466X_2-0.017X_1^2-0.415X_2^2+0.011X_1X_2 \quad (13)$$

ผลการทดสอบมีสัมประสิทธิ์ค่าการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.864 หมายความว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความเข้มข้นสีผสม เป็นผลมาจากปริมาณสารเคมีในการตกตะกอนและค่าความเป็นกรดด่างร้อยละ 86.4 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 13.6 เป็นผลจากตัวแปรอิสระอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 30 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอย และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

independent variables	coefficients	standard error	*t*-value	*p*-value
intercept	19.151	25.496	0.751	0.486
x_1	1.448	0.631	2.296	0.070
x_2	7.466	3.501	2.132	0.086
x_1x_1	-0.017	0.006	-2.625	0.047
x_2x_2	-0.415	0.158	-2.629	0.047
x_1x_2	0.011	0.037	0.284	0.788

หมายเหตุ Significant at 1% level ($p < 0.01$) $R^2 = 0.864$; $R^2_{adj} = 0.729$

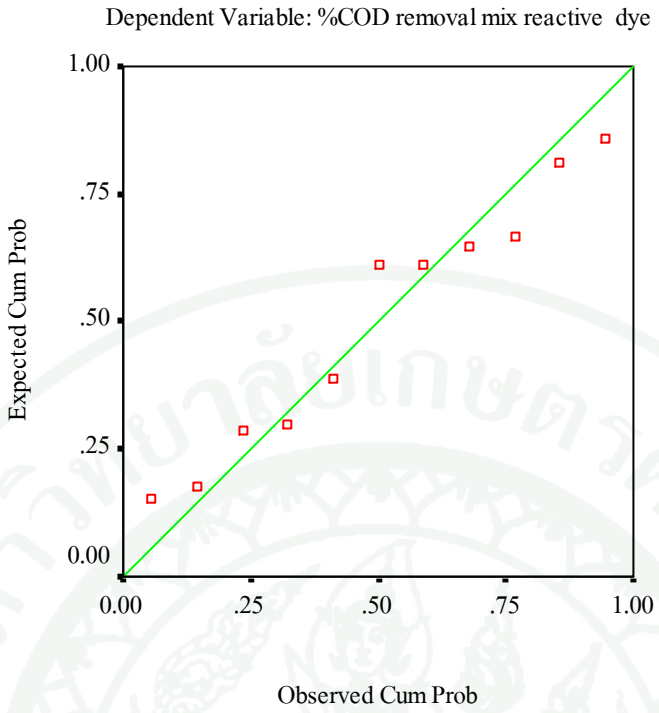
3.2 การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย

ตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยที่สร้างขึ้น โดยใช้การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบ โดยการตรวจสอบความเหมาะสมมีดังนี้

ก การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยที่สร้างขึ้นโดยวิธี normal probability plot ดังภาพที่ 19 ซึ่งแสดงถึง normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อนของประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลในกราฟ มีแนวโน้มการกระจายตัวเป็นเส้นตรง เมื่อทำการทดสอบ Kolmogorov-Smirnov เพื่อยืนยันผลการทดลอง ดังตารางที่ 31 พบว่ามีค่านัยสำคัญของการทดสอบเท่ากับ 0.200 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าสมการถดถอยของประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม มีการแจกแจงความคลาดเคลื่อนเป็นไปแบบปกติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีผสม

ตารางที่ 31 การทดสอบการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบแบบ Kolmogorov-Smirnov สำหรับการตกตะกอนน้ำสีผสม

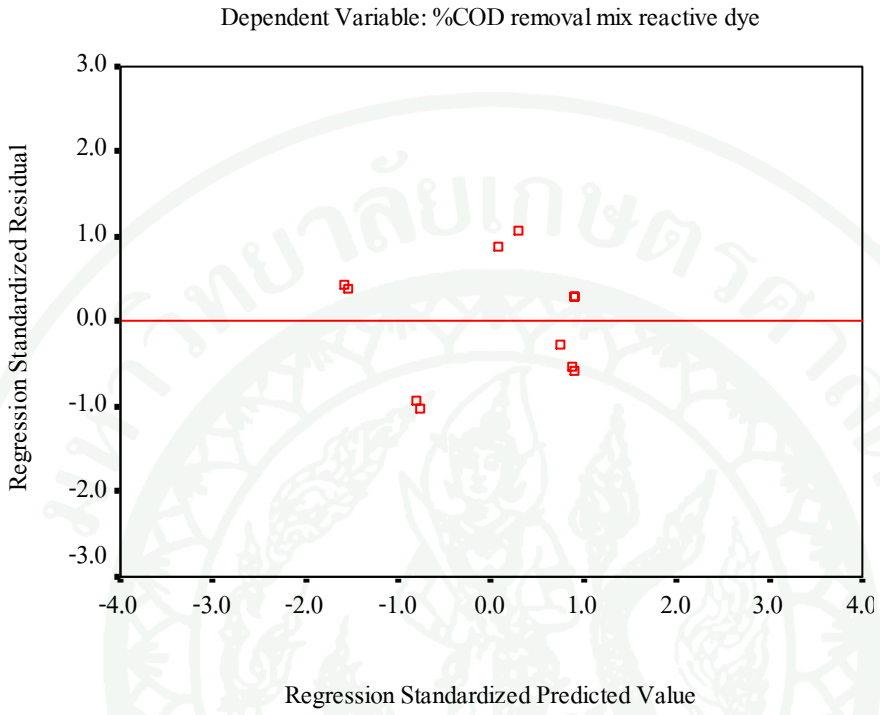
	Statistic	df	Sig.
%COD removal	0.178	11	0.200

ข การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

จากการพิจารณา scatter plot ระหว่าง ค่า regression standardized residual บนแกน Y และค่า regression standardized predicted value บนแกน X ดังภาพที่ 20 ซึ่งแสดงถึง scatter plot ระหว่าง ค่า regression standardized residual และค่า regression standardized predicted value สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีผสม จุดของ scatter plot มีการกระจายอย่างไม่มี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รูปแบบ และมีการกระจายตัวบริเวณรอบๆค่า 0 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยของประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีผสม มีค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่



ภาพที่ 20 Scatter plot ของค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าทำนาย ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีผสม

ค การทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน

การทดสอบโดยใช้ค่าสถิติ Durbin – Watson จากผลการทดลองพบว่า สมการถดถอยประสิทธิภาพในการตกตะกอนสีผสมเพื่อบำบัดค่าซีโอดี มีค่าสถิติ Durbin Watson เท่ากับ 1.785 ดังตารางที่ 32 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 2 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนแต่ละค่าเป็นอิสระกัน จึงบอกได้ว่าความคลาดเคลื่อน ของสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม มีค่าความเป็นอิสระต่อกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 32 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจากการวิเคราะห์การถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม โดยใช้ $Ca(OH)_2$

R	R Square	Adjusted R Square	Dubin-Watson
0.930[a]	0.864	0.728	1.785

หมายเหตุ a. Predictor: (Constant), X_1 X_2 X_1^2 X_2^2 X_1X_2

3.3 การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของ น้ำสีผสม

เมื่อนำสมการถดถอยที่เหมาะสมไปทำนายผลของประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทำนายดังแสดงในตารางที่ 33 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการถดถอยที่สร้างขึ้น

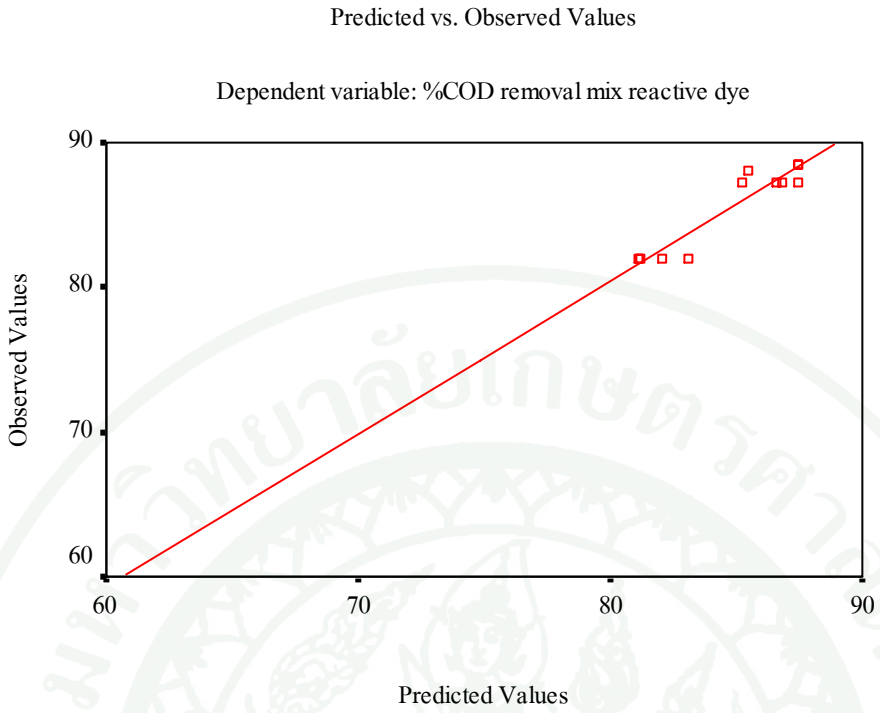
จากการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายโดยใช้สมการถดถอยพบว่า ดังภาพที่ 21 แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม พบว่าแนวโน้มของค่าทำนายมีทิศทางสอดคล้องกับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 33 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีกับค่าทำนายประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสมความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละการทดลอง

treatment	code setting level		actual level		COD removal (%)	
	X_1	X_2	X_1	X_2	experimental	predicted
1	1	1	50	12	88.03	85.48
2	-1	-1	30	8	82.05	83.10
3	1	-1	50	8	87.18	86.62
4	-1	1	30	12	82.05	81.08
5	0	-1.414	40	7.172	87.17	85.23
6	-1.414	0	25.86	10	82.05	81.23
7	0	1.414	40	12.828	82.05	82.10
8	1.414	0	54.14	10	87.18	86.83
9	0	0	40	10	87.18	87.43
10	0	0	40	10	88.46	87.43
11	0	0	40	10	88.46	87.43

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



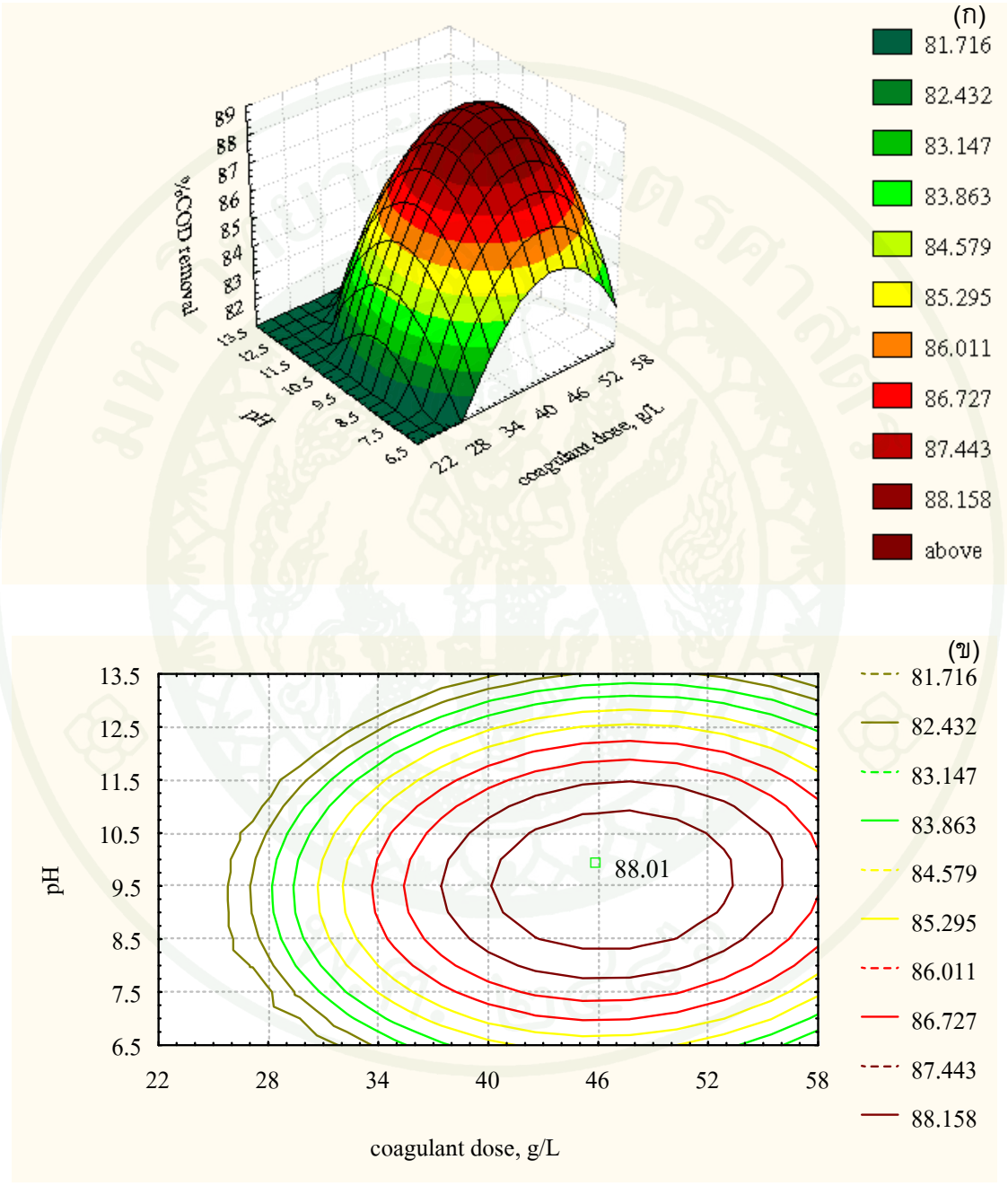
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี น้ำสีผสม จริงที่ได้จากการทดลองและค่าทำนาย

3.4 การหาจุดเหมาะสมของตัวแปรที่ศึกษาต่อการบำบัดน้ำสีผสม

พิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ดังภาพที่ 22 ซึ่งแสดงผลของกราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ผลของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง ต่อการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย $Ca(OH)_2$ เพื่อบำบัดค่าซีโอดี พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น และเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างจนถึงจุดหนึ่ง ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีจะเพิ่มมากขึ้นแต่หลังจากนั้นหากมีการเพิ่มปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน และเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างขึ้นอีกจนเลยจุดเหมาะสมของการตกตะกอนแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีจะเริ่มลดลง ดังเช่นจะเห็นได้จากกราฟว่าหากใช้ปริมาณสารตกตะกอนมากกว่า 46 กรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดด่างสูงกว่า 11 ขึ้นไปในการตกตะกอนประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากกราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถทำนายได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม คือใช้ปริมาณสารตกตะกอน 46 กรัมต่อลิตร ที่ค่าความเป็นกรดด่างในการตกตะกอนมีค่าเท่ากับ 10 มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 88.01



ภาพที่ 22 กราฟพื้นผิวตอบสนอง (ก) และกราฟคอนทัวร์ (ข) ของผลของค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสารตกตะกอนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อทำการทดลองจริงเพื่อยืนยันผลการทำนายที่ได้จากสมการถดถอย เพื่อหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีผสม ดังตารางที่ 34 ค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าร้อยละ 88.46

ตารางที่ 34 เปรียบเทียบผลจากการทดลองจริงและผลการทำนายจากแบบจำลองประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

condition	Responses
	COD removal (%)
Coagulant dosage = 46 g/L (pH 10)	
Experimental Value	88.46
Model response	88.01

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การเลือกชนิดของสารตกตะกอนที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำสีสังเคราะห์ RB5 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า $Ca(OH)_2$ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และค่าซีโอดี สูงสุดที่ร้อยละ 99.78 และร้อยละ 90.78 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับสารตกตะกอนอีก 3 ชนิด แต่พบว่าสารตกตะกอนทั้ง 4 ชนิดที่เลือกใช้ในการทดลอง ไม่มีความสามารถในการบำบัดค่าความขุ่น และค่า TDS ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยวิธีการตอบสนองที่พื้นผิว ในการทดสอบสมมุติฐานของสมการถดถอย พบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้น สามารถใช้ในการทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณสำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี ของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี คือ ปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1) และพจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2)

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย พบว่าในการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าความคลาดเคลื่อนของสมการถดถอยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด จาก normal probability plot การกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง และทำการทดสอบแบบ Kolmogorov - Smirnov เพื่อยืนยันผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าการแจกแจงเป็นไปแบบปกติ ในการทดสอบตวามคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนพบว่า จุดของ scatter plot ระหว่าง ค่า regression standardized residual บนแกน Y และค่า regression standardized predicted value บนแกน X มีการกระจายอย่างไม่มีรูปแบบ และมีการกระจายตัวบริเวณรอบๆค่า 0 แสดงถึงว่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ และเมื่อทำการทดสอบความเป็นอิสระของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้ค่าสถิติ Durbin – Watson พบว่ามีค่าสถิติ Durbin Watson ใกล้เคียง 2 แสดงว่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิสระต่อกัน สำหรับสมการถดถอยของสีย้อมทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าจริงจากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการถดถอยมีค่าใกล้เคียงกัน

สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 คือ ปริมาณสารตกตะกอน 53 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 9.75 เมื่อทำการทดลองยืนยันผลการทดลองจริงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 99.68 และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 92.58 สภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RR198 คือ ปริมาณสารตกตะกอน 34 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 10 เมื่อทำการทดลองยืนยันผลการทดลองจริงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 99.47 และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 91.74 และสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RY178 คือ ปริมาณสารตกตะกอน 34 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 10 เมื่อทำการทดลองยืนยันผลการทดลองจริงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมร้อยละ 99.4 และประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 91.71

การหาสภาวะที่เหมาะสมการตกตะกอนน้ำสีผสม ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดสอบสมมุติฐานของสมการถดถอยที่สร้างขึ้น พบว่าสมการถดถอยสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสม ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำสีผสม คือ พจน์กำลังสองของปริมาณสารเคมีในการตกตะกอน (X_1^2) และพจน์กำลังสองของค่าความเป็นกรดด่าง (X_2^2)

ตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำสีผสมที่สร้างขึ้น พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงเป็นปกติ มีความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนคงที่ และมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน เมื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าทำนายพบว่าแนวโน้มของค่าทำนายมีทิศทางสอดคล้องกับค่าจริงที่ได้จากการทดลอง

จากสถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิวพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนสีผสม คือ ปริมาณสารตกตะกอน 46 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดด่าง 10 เมื่อทำการทดลองยืนยันผลการทดลองจริงมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีร้อยละ 88.46 และพบว่าการตกตะกอนด้วย $Ca(OH)_2$ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผสมได้มากกว่าร้อยละ 90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

การหาจุดเหมาะสมในการตกตะกอนน้ำสีสังเคราะห์ RB5 RR198 และ RY176 รวมทั้งการหาจุดเหมาะสมของการตกตะกอนน้ำเสียผสมของน้ำสีสังเคราะห์ทั้ง 3 ชนิด เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ สถิติวิธีการตอบสนองที่พื้นผิวในการทำนายจุดเหมาะสมในระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีจากโรงงานฟอกย้อม งานวิจัยต่อไปจึงควรมีการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมมาใช้ในการหาจุดเหมาะสมเนื่องจากน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไปตามแต่ละโรงงาน ซึ่งส่งผลให้มีสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนแตกต่างกันออกไป และยังทำการบำบัดได้ยากกว่าการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังอาจมีการเพิ่มปัจจัยตัวที่ 3 นอกเหนือจากปริมาณสารตกตะกอน และค่าความเป็นกรดด่าง คือ ปริมาณสารช่วยตกตะกอน เนื่องจากอาจเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนรวมทั้งลดปริมาณการใช้สารตกตะกอน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **อุตสาหกรรมฟอกย้อม**. แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th/ems%20for%20smes%20website/page/page%2035.htm, 6 ตุลาคม 2553.

ชีวนันท์ ชมภูจันทร์. 2552. **การพัฒนาตัวกรองเหล็กขนาดนาโนสเกลที่ยึดติดกับซิลิกาออกไซต์เพื่อการบำบัดสี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณรงค์ วุทธเสถียร. 2545. **การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 4. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

พิศมัย ลิขิตบรรณกร. 2544. **กระบวนการฟอกย้อม.** กลุ่มงานเทคโนโลยีสิ่งทอ (เคมีสิ่งทอ) ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. **วิศวกรรมการประปา.** โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

_____ และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์. 2547. **เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิยะดา ตันวัฒนากูล. 2546. **SPSS/FW (เล่มที่ 3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์สมการถดถอยชนิดต่างๆ และการวิเคราะห์ปัจจัย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

วิรัชช พานิชวงศ์. 2546. **การวิเคราะห์ถดถอย.** พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

วีระ ตั้งชวาล. 2545**. เคมีของน้ำและการบำบัดน้ำเสีย.** คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุวัตร แจ้งชัด. 2549. **สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์.** ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อัจฉริยา ปราบอริพ่าย. 2547. **เทคนิคการวิเคราะห์สถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS. ทฤษฎีและภาคปฏิบัติ.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น. 2550. **ประเภทของสีย้อม**. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?passTo=925bb09fb493ae6349931312a4ca2ef6&pageid=6&bookID=370&read=true&count=true , 19 กรกฎาคม 2552.

Ahmad, A. L., S.S Wong, T.T. Teng and A. Zuhairi. 2007. Optimization of coagulation-flocculation process for pulp and paper mill effluent by response surface methodological analysis**. Journal of hazardous material** 145:162-168.

Amuda, O.S. and I.A. Amoo. 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. **Journal of Hazardous Material** 141:778-783.

Annadurai, G., S.S. Sung and D.-J. Lee. 2004. Simultaneous removal of turbidity and humic acid from high turbidity stormwater. **Advances in Environmental Research** 8:713-725.

Bacaoui, A., A. Dahbi, A. Yaacoubi, C. Bennouna, F.J. Maldonado-Hoder, J. Rivera-Utrilla, F. Carrasco-Marin and C. Moreno-Castilla. 2002. Experimental design to optimize preparation of activated carbons for use in water treatment, **Environmental Science and Technology** 36:3844-3849.

Tan, B.H., T.T. Teng and A.K. Mohd Omar. 2000. Removal of dyes and industrial dye wastes by magnesium chloride. **Water Research** 34:597-601.

Chemical Book, 2010. **productindex**. Available Source: http://www.chemicalbook.com/ProductIndex_EN.aspx, october 2, 2010.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

Gao, B.-Y., Q.-Y. Yue. Y. Wang and W.-Z. Zhou. 2007. Color removal from dye-containing wastewater by magnesium chloride. **Journal of Environmental Management** 82:167-172.

Georgiou, D., A. Aivazidis, J.Hatiras and K. Gimouhopoulos. 2003. Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate. **Water Research** 37: 2248-2250.

Ghafari, S., H. A. Aziz, M. H. Isa and A. A. Zinatizadeh. 2008. Applicatio of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation-flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum, **Journal of harzardous materials** 163:650-656.

Hu, R. 1999. **Food product design: Acomputer-aided statistical approach.** Technomic Publishing Co. Inc., New York.

Joo, D. J., S.S. Won, H.C. Jeong, J.C. Sang, C.K. Myung, H.H. Myung, W.H. Tae and H.K. Young. 2007. Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer. **Dyes and Pigments** 73:59-64.

Khuri, A.I. and J.A. Cornell. 2003. Response surfaces, Design and Analyses, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.

Kim, T., C. Park, E. Shinb and S. Kim. 2004. Decolorization of disperse and reactive dye solutions using ferric chloride. **Desalination** 161:49-58.

Kishimoto, N., Y. Moritab, H. Tsunoc, T. Oomurad, and H. Mizutanid. 2005. Advanced oxidation effect of ozonation combined with electrolysis. **Water Research** 39:4661-4672.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Korbahti, K.B. 2007. Response surface optimization of electrochemical treatment of textile due Wastewater**. Journal of harzardous material** 145:277-286.

Lucas, M. S. And J.A. Peres. 2006. Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. **Dyes and Pigments** 71:236-244.

Netpradit, S. P. Thiravetyan and S. Towprayoon. 2003. Application of 'waste' metal hydroxide sludge for adsorption of azo reactive dyes. **Water Research** 37:763-772.

Oladoja, A. N. And Y. D. Aliu. 2009. Snail shell as coagulant aid in the alum precipitation of malachite green from aqua system. **Journal of Hazardous Materials** 164:1496-1502.

Ormad, P. M., R. Mosteo, C. Ibarz, and L.J. Ovelleiro. 2006. Multivariate approach to the photo-Fenton process applied to the degradation of winery wastewaters. **Applied Catalysis B: Environmental** 66:58-63.

Papic, S., N. Koprivanac, A.L. Bozic and A. Metes. 2004. Removal of some reactive dyes from synthetic wastewater by combined Al(III) coagulation/carbon adsorption process. **Dyes and Pigments** 62:291-298.

Ravikumar, K., K. Pakshirajan, T. Swaminathan and K. Balu. 2005. Optimization of batch process parameters using response surface methodology for dye removal by a novel adsorbent**. Chemical Engineering Journal** 105:131-138.

Song, Z., C.J. Williams and R.G.J. Edyvean. 2004. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. **Desalination** 164:249-259.

Moghaddam, S.S., M.R. Alavi and M. Arami. 2010. Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: Optimization through response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials** 175:651-657.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Tatsi, A.A., A.I. Zouboulis, K.A. Matis and P. Samaras. 2003. Coagulation–flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. Chemosphere 53:737-744.

Vimonses, V.,B. Jin and C. W.K. Chow. 2009. Insight into removal kinetic and mechanisms of anionic dye by calcined clay materials and lime. **Journal of Hazardous Materials** 177:420-427.

Vimonses, V.,B. Jin and C. W.K. Chow. 2009. Enhancing removal efficiency of anionic dye by combination and calcination of clay materials and calcium hydroxide. **Journal of Hazardous Materials** 171:941-947.

Wang, J.P., Y.Z. Chen, X.W. Ge and H.Q. Yu. 2007. Optimization of coagulation-flocculation process for paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology. **Colloids and Surfaces A** 302:204-210.

Zhu, M.-X., L. Lee, H.-H. Wang and Z. Wang. 2007. Removal of an anionic dye by adsorption/precipitation processes using alkaline white mud. **Journal of Hazardous Materials** 149:735-741.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธี Potassium Dichromate Digestion

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การวิเคราะห์ค่าซีโอดี

1. นำหลอดแก้ว 3 หลอดมาใส่น้ำกลั่นหลอดละ 2.5 มิลลิลิตร เพื่อเตรียม blank

2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการขั้นตอนการทำ Jar-test มาใส่หลอดแก้ว หลอดละ 2.5 มิลลิลิตร 1 หลอด ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง

3. เติมสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ลงในทุกหลอด หลอดละ 1.5 มิลลิลิตร

4. เติม Conc.H_2SO_4 ลงในทุกหลอด หลอดละ 3.5 มิลลิลิตร

5. ปิดฝาให้สนิทแล้วเขย่าให้สารผสมกันดี

6. วางหลอดแก้วในบล็อก แล้วนำเข้าตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

7. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงนำออกจากตู้อบ และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

8. เทสารละลายออกจากหลอดแก้วใส่ลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด แล้วเทรวมลงไปในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนจากสีเหลือง→เขียวอมเหลือง →ฟ้า→น้ำตาลแดง ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ บันทึกปริมาตร FAS ที่ใช้ไตเตรต

9. นำค่าที่ได้ไปคำนวณตามสมการที่ 14

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัม/ลิตร} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{มิลลิลิตรของน้ำตัวอย่าง}} \qquad (14)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดย A คือ มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรต blank
โดย B คือ มิลิลลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำตัวอย่าง
โดย C คือ ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล

ซึ่งวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของ FAS ทำได้โดย ปิเปตสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวกรูปกรวย เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆเติม Conc.H_2SO_4 15 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เติมโฟโรอีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS จนได้สีน้ำตาลแดง ซึ่งเป็นจุดยุติ นำปริมาตร FAS ที่ใช้ไปคำนวณได้จากสูตร

ความเข้มข้นของ FAS , นอร์มัล = (ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ที่ใช้ (มิลลิลิตร) × 0.1)/ปริมาตรของ FAS ทีใช้ในการไตเตรต (มิลลิลิตร)

10. นำค่าซีโอดีที่ได้มาคำนวณเป็นค่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายราชิต สราทธพันธ์
เกิดวันที่	2 กุมภาพันธ์ 2529
สถานที่เกิด	เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พ.ศ. 2551)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์