



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การกำจัดสีข้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
ชนิดพื้นฟูสภาพได้

คณะผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งศิริพร (หัวหน้าโครงการ)
นางจรรยา อินทมณี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสกลนคร

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2556

บทคัดย่อ

โรงงานฟอกย้อมมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปริมาณมาก น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมมีสีตกค้างและสารเคมีปนเปื้อน ส่งผลให้เกิดความผิดปกติต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำหรืออาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนสำหรับการทำลายโครงสร้างสีย้อมในน้ำเสีย ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์ระบบและออกแบบชุดทดลองด้วยระบบการไหลแบบต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้น้ำเสียไหลผ่านออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิค RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงทดสอบระบบกับน้ำเสียจากชุมชนผู้ผลิตผ้าบาติก และทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีโซลเจล ด้วยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของสารเคมี คือ แมกนีเซียมไนเตรท : ออกซาลิก : เพอริกคลอไรด์ เป็น 1.25:1.25:3.75 เคลือบด้วยวิธีจุ่ม (Dip coating method) บนตัวกลางเซรามิก 3 ชนิด คือ เซรามิก โฟมวงกลม เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม และเซรามิกวงแหวน จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 600°C เพื่อให้ได้สารไอรอนยึดเกาะบนตัวกลางเซรามิกที่มีความเสถียร ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค SEM และ EDX พบว่า มีสารเหล็กเคลือบเกาะติดแน่นที่ผิวเซรามิก จากการนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนมาทำการทดสอบการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์ขนาด 2 ลิตร โดยการแช่ตัวเร่งปฏิกิริยาในน้ำเสียสังเคราะห์และกวนผสมด้วยแม่เหล็กกวน ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพ ได้แก่ พีเอช 5-8 ความเข้มข้นสีย้อม 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาบนเซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม 40.5-162 มิลลิกรัม พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถบำบัดน้ำเสียได้ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 95, 98 และ 99% ตามลำดับ ด้วยเวลาในการบำบัด 2 ชั่วโมงโดยมีพีเอชที่เหมาะสม คือ พีเอช 6 ซึ่งประสิทธิภาพของระบบจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction time) เพิ่มขึ้น การเติมอากาศและการเติมไนโตรเจนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของชุดการทดลอง ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้สามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ และระบบสามารถลดค่า COD ในน้ำเสียลงได้

การศึกษากำจัดสีย้อมสำหรับการนำตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนไปประยุกต์สู่การดำเนินการจริงในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ดำเนินการด้วยระบบแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร ด้วยการออกแบบให้มีการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ของสีย้อมชนิด Reactive red และ Malachite green ผ่านพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ทรงกระบอกอย่างต่อเนื่องด้วยปั๊มของเหลว ทำการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM ที่มีตัวแปร คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม อัตราการไหลของน้ำ 10-200 มิลลิลิตรต่อนาที และความ

เข้มข้นสีย้อมชนิด Reactive red และ Malachite green เป็น 20-80 และ 4-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) ของค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย อันทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบสมการ Quadratic model สำหรับการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งของ โรงงานฟอกย้อมที่สภาวะต่างๆ พบว่า ระบบสามารถกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red และ Malachite green ด้วยประสิทธิภาพ 84.45 และ 93.62% และมีผลการทดสอบจากการทดลองจริง 84.85 และ 93.62% ตามลำดับ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกันกับผลจากการทำนาย โดยมีความคาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษา โครงสร้างของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน พบว่า โครงสร้างสีย้อมในน้ำเสียได้ถูกทำลายไปกลายเป็น CO_2 และน้ำ อันทำให้น้ำเสียหลังการบำบัดไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จากการใช้งานระบบแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุโดยใช้เซรามิกวงแหวนกับน้ำเสียจริงจากชุมชนผลิตผ้าบาติกที่มีสีม่วง สีเขียว และสีฟ้า พบว่า ได้ประสิทธิภาพการกำจัด 50, 60 และ 95 % ตามลำดับ และมีต้นทุนในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียชุมชน 11.87 บาทต่อปริมาตรน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถูกกว่าการกำจัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาเฟนตันซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 125.32 บาทต่อปริมาตรน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร ระบบการบำบัดแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุ จึงสามารถดำเนินการได้โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำด้วยประสิทธิภาพที่สูง สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากภาคชุมชนได้จริงและมีความเป็นไปได้สูงในการใช้งานระดับอุตสาหกรรม

ABSTRACT

Dyeing industries have used large quantities of water in the production line. Wastewaters generating from the dyeing process with chemical residues and contaminant has led to the failure of ecosystem, harmful to human life, and visual pollution. Then the aim of this research was to eliminate or treat the dye molecule structure in wastewater from dyeing industries by synthesizing and applying iron catalyst. Batch experimental was set and used to study for the effectiveness treatment of synthetic dyes in the synthesized wastewater. Continuous experimental unit was also designed using packed column by packing with the iron catalyst for continuously flows of wastewater through the system. The design of experimental by Response Surface Methodology (RSM) was used for optimum condition study and mathematical model formation. The real wastewater contaminated with dyeing from cloth processing in community was trialed and treated and economical analysis of the treatment system was performed.

The iron catalyst was effectively synthesized by sol-gel method with the optimum mole ratio of $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2_{(aq)}:\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4_{(aq)}:\text{FeCl}_3_{(aq)}$ at 1.25:1.25:3.75 for iron sol preparation. Dip coating method was applied to coat the iron sol on three types of ceramic media; circled-ceramic foam, squared-ceramic foam, and ringed-ceramic. The coating ceramic was calcined in furnace at 600°C for stability of the catalyst. Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) techniques were used to characterize the prepared catalyst. Iron element was found completely fixed on the ceramic surface. The effectiveness of the catalyst was tested for the dye removal performing by soaking the catalysts in 2-liter batch reactor containing the synthetic wastewater with magnetic stirrer. Parameters of the batch were considered at pH 5-8, dye concentration 10-200 mg/l and amount of squared-ceramic foam catalysts 40.5-162 milligram. The removal efficiency at 2 hours reaction time and optimum pH 6 of reactive red, reactive blue, and malachite green dye was found at 95, 98, and 99%, respectively. Performance of the treatment was increased when increase the concentration of dye, amounts of iron catalysts, and reaction time. Air and nitrogen feeding had not effected to the dye removal, therefore the catalysts can be regenerated by dissolved oxygen in the wastewater. The iron catalytic system can reduced COD from contaminated dye in wastewater.

The study of dye treatment for solving the environment problems was performed in continuous flow packed column system. The column with diameter 11 cm, height 90 cm, and packed by iron catalyst was designed for continuously flow of wastewater through the catalysts surface. 2 kinds of synthetic dye; reactive red and malachite green dye were prepared and pumped to the system. Technique of RSM were

used to design the experiment with concentration of dyes, amounts of catalysts and wastewater flow rate process parameters of amount of catalysts 432.5-1,730 milligram, flow rate 10-200 ml/min, and concentration of reactive red at 20-80 mg/l and malachite green 4-20 mg/l. Response variable (y) of this study was the percentage of dye removal efficiency. Optimum condition and mathematical quadratic model was archived to predict for efficiency of the iron catalytic system. It was found that the predicting efficiency for the reactive red and malachite green were 84.45% and 93.62%, while experimental result were 84.85% and 93.62 %, respectively. The results coincided with the prediction with $P < 5 \%$, which indicate the accuracy of mathematic model.

From the study, it can be concluded that the synthetic dye structure can be treated and changed to CO_2 and water by the iron catalysts. Therefore the treated wastewater will not has any toxic to environment. In addition, the continuous flow by packed column system were also tested with real wastewater from Batik Community. The removal results from purple, green, and blue dyeing wastewater treatment were found at 50, 60, and 95 %, respectively. The cost for Batik wastewater treatment by iron catalyst was 11.87 baht per 1 m^3 wastewater, which is lower than the Fenton method (125.32 baht per 1 m^3). The treatment systems of packed column with iron catalyst can effectively run with continuous flow mode at low cost and high performance. This removal technique can possibly be performed and leaded to develop for industry level.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “งบประมาณแผ่นดินปี 2556” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และหน่วยวิจัยการกำจัดมลพิษสิ่งแวดล้อม (PTRU) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณคุณรุ่งทิพา ธนพิทักษ์กุล หัวหน้ากลุ่มทัศนียภาพเมืองทองบาดึก ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่เครื่องมือ อุปกรณ์ น้ำเสียจากชุมชนผลิตผ้าบาดึก และให้ร่วมมือในการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(1)
Abstract	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 น้ำเสีย	5
2.1.1 ลักษณะของน้ำเสีย	5
2.1.2 สีของน้ำเสีย	7
2.2 กระบวนการฟอกย้อม	7
2.2.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม	8
2.2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับ โรงงานฟอกย้อม	10
2.3 สีย้อม	10
2.3.1 การเกิดของสีย้อม	11
2.3.2 ประเภทสีย้อม	12
2.3.3 เคมีของสีย้อม	13
2.2.4 ความเป็นพิษของสีย้อม	14
2.4 สีย้อมรีแอกทีฟ	14
2.5 สีย้อมเบสิก	15
2.6 การวัดสีในน้ำเสีย	16
2.7 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย	16
2.7.1 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย	16
2.7.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย	17

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน	19
2.8.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวกลางของแข็ง	22
2.8.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับกระบวนการ โซลเจล	24
2.8.3 วัสดุตัวกลาง	25
2.9 คอลัมน์บรรจุ Packed column	26
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีในน้ำเสียด้วย Packed column	27
2.10 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	27
2.10.1 พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design RSM)	28
2.10.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง	31
2.10.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM	32
2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ RSM	32
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	34
3.1 วัสดุ	34
3.2 สารเคมี	34
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	34
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Fe)	34
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำสีตั้งเคราะห์	35
3.3 อุปกรณ์	35
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	35
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการกำจัดสีย้อม	35
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง	36
3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	37
3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก	37
3.3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีของน้ำเสีย	38
3.4 การสร้างกราฟมาตรฐานของของสีย้อม	38
3.4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive red	38
3.4.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive blue	39
3.4.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Malachite green	39

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำเสียจากชุมชนโทนีสี่เขียว	39
3.4.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำเสียจากชุมชนโทนีสี่ม่วง	39
3.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	39
3.5.1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก	41
3.6 วิธีการทดลอง	43
3.6.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	43
3.6.2 การทดลองกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์	44
3.6.3 การออกแบบและสร้างชุดทดลองแบบคอลัมน์บรรจุ	45
3.6.4 การทดสอบกำจัดสีจากน้ำทิ้งของกลุ่มผลิตผ้าบาติก	52
3.6.5 การวิเคราะห์น้ำเสียด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (LC-MS)	53
3.6.6 ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	54
4.1 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน	54
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน	55
4.2 การทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์	57
4.3 ผลการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	64
4.4 การบำบัดน้ำทิ้งจริงของกลุ่มผลิตผ้าบาติกด้วยระบบแบบต่อเนื่อง	77
4.5 การวิเคราะห์น้ำเสียด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)	78
4.6 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์	80
4.6.1 การวิเคราะห์ต้นทุน	80
4.6.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียในระดับชุมชน	80
4.6.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	83
5.1 สรุปผลการทดลอง	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอทำหน้าที่เปลี่ยนวัตถุดิบสิ่งทอจำพวกเส้นด้ายดิบและผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมชั้นปลายเพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าผลิตภัณฑ์สิ่งทอและลดการนำเข้าวัตถุดิบในการผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมสิ่งทอและต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ปัจจุบันโรงงานฟอกย้อมมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว การส่งออกสินค้าสิ่งทอ เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่มสามารถทำรายได้เข้าประเทศถึง 7,677 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ต่อปี (กระทรวงพาณิชย์, 2553) ขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของโรงงานฟอกย้อมก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการผลิตมีการใช้สารเคมีและสีย้อมที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลาง โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ส่งผลให้โรงงานฟอกย้อมมีน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมส่วนใหญ่จึงมีสีตกค้างและสารเคมีปนเปื้อน ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยซึ่งไม่สามารถเกิดได้สมบูรณ์ทั้งหมด ส่งผลกระทบต่อปัญหามลพิษทางน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) นอกจากนี้ กลุ่มหัตถกรรมผ้าบาติกก็เป็นอีกกลุ่มที่มีการใช้สีย้อมในการย้อมผ้า การรวมกลุ่มผลิตสินค้า OTOP (One Tambol One Product) ทำให้สินค้าเป็นที่ยอมรับ มีการสั่งซื้อเพิ่มมากขึ้นและมีขอการผลิตสูง ส่งผลให้ปริมาณน้ำทิ้งสูงขึ้นเช่นกัน กลุ่มหัตถกรรมและโรงงานฟอกย้อมเหล่านี้ยังมีปัญหาในเรื่องขาดความรู้และเงินลงทุนในการบำบัดสีและสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากกระบวนการ ทำให้น้ำทิ้งที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะเกิดน้ำเน่าเสีย มีกลิ่นเหม็น และมีสีเป็นที่น่ารังเกียจ

สีย้อมผ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปในโรงงานฟอกย้อมมักจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสูตรโครงสร้างใหญ่ ซับซ้อน และอาจเป็นสารที่มีพิษ ซึ่งในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 11 ประเภท คือ สีเอซิก สีไครเร็กท์ สีเบสิก สีดิสเพอร์ส สีรีแอกทีฟ สีอะโซอิก สีเว็ด สีเมอร์แคนท์ และสีซัลเฟอร์ โดยที่ส่วนประกอบที่ทำให้เกิดสี คือ กลุ่มเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) สีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้น การเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมาก ตัวอย่างสีย้อมในอุตสาหกรรม เช่น การฟอกย้อมกางเกงยีนส์ ใช้สีเขียวมรกต Malachite green ส่วนสีรีแอกทีฟที่นิยมใช้ คือ สีแดง Reactive red และสีฟ้า Reactive blue ที่สำคัญสีรีแอกทีฟเป็นสีที่มีปริมาณการใช้งานสูงและน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีรีแอกทีฟจะกำจัดได้ยาก

ผลกระทบของสีย้อมผ้าต่อสิ่งแวดล้อม คือ ทำให้เกิดมลพิษทางสายตา โดยทั่วไปสามารถมองเห็นการปนเปื้อนของสีได้ด้วยตาเปล่าในแหล่งน้ำที่ปริมาณ 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (วรรณวิภา ผลาหาญ, 2547) จากข้อมูลของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม พบว่า มีน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมสีของกลุ่มอาชีพและวิสาหกิจชุมชน

ที่ผลิตผ้าทอเป็นจำนวนมากได้ถูกปล่อยทิ้งสู่ธรรมชาติโดยไม่มีกำบัง ส่งผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมและระดับน้ำใต้ดินของชุมชน (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2555) เนื่องจากมาตรฐานการปล่อยน้ำเสียอุตสาหกรรมของกรมควบคุมมลพิษกำหนดเพียงว่า สีของน้ำเสียก่อนปล่อยนั้นต้องเป็นสีที่ไม่พึงรังเกียจ ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมปล่อยน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ นอกจากนี้ น้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมยังมีกลิ่นเหม็น ทำให้ชาวบ้านไม่สามารถใช้น้ำในการอุปโภคบริโภคได้ สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ จะทำให้ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำลดลง และความเข้มของสียังขัดขวางการเดินทางของแสงที่จะลงสู่ผิวน้ำทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำหรืออาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำตามธรรมชาติในการอุปโภคบริโภค เช่น สีพวก โรดามีน บี (Rhodamine B) เอารามีน (Auramine) มาลาไคท์ กรีน (Malachite green) และไวโอเลท บี เอ็น พี (Violet BNP) อาจทำให้เกิดผื่นที่ผิวหนัง หน้าบวม อาเจียน ท้องเดิน อาการชา เพลีย และอ่อนแรง สีบางอย่างอาจทำให้เกิดมะเร็งที่ต่อมน้ำเหลือง และอวัยวะอื่นๆ นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดมีการส่วนผสมโลหะหนักต่างๆ เช่น โครเมียม แคดเมียม โปรท ตะกั่ว และพลวง เป็นต้น เมื่อเกิดปฏิกิริยาในการย้อมไม่สมบูรณ์โลหะหนักเหล่านี้จะปนเปื้อนมาในน้ำเสียเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์แม้ได้รับเพียงปริมาณเล็กน้อย อาการอาจเป็นทั้งอย่างฉับพลันหรือเรื้อรัง เป็นอันตรายแก่ชีวิตได้

โดยทั่วไปการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมมีหลายวิธี ได้แก่ การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีววิทยา (Biodegradation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) การใช้โอโซน (Ozonation) และการดูดซับ (Adsorption) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้ปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction) เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพสูง โดยการใช้สารไอออน (Iron) ในรูป Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} จากเฟอร์รัสซัลเฟต (Fe_2SO_4) เฟอร์ริกไนเตรท ($Fe(NO_3)_3$) หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) แต่วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องมีการปรับ pH น้ำเสียก่อนการบำบัด ให้มีสภาพเป็นกรด และสารเคมีที่ป้อนจะถูกกำจัดไปพร้อมตะกอน การพัฒนาสารไอออนสำหรับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบผิวตัวกลางด้วยวิธีการต่างๆ เช่น วิธี โซลเจล (Sol gel) วิธีสารละลาย (Solution) ที่ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบเป็นฟิล์มบาง (Thin film) บนตัวกลางเซรามิก โดยเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนเซรามิกที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ที่สามารถเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดความเสถียรของตัวเร่งปฏิกิริยา และนำมาใช้งานในรูปแบบ Heterogeneous Catalyst และฟื้นฟูสภาพได้ (Regeneration) โดยใช้ออกซิเจน ประกอบกับการออกแบบระบบกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงฟอกย้อมแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Packed column โดยสามารถป้อนน้ำเสีย เป็นแบบการบังคับผ่านให้น้ำไหลสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนที่บรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ ทำให้โครงสร้างของสีย้อมในน้ำเสียถูกทำลายและได้น้ำที่ผ่านการบำบัดจะไหลออกคอลัมน์

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodologies, RSM) เป็นการออกแบบด้วยเทคนิค Central Composite Design (CCD) ที่มีการออกแบบทุกระดับของแต่ละปัจจัย โดยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย โดยมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$) วิธีนี้เป็นการประเมินผลลัพธ์ที่ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการ

ทดลองตามการออกแบบอย่างเป็นระบบจะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบโดยรวมของพารามิเตอร์ในกระบวนการ การใช้โปรแกรม Design Expert RSM สำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) ของกระบวนการ ทำให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการและทำนายภาวะที่เหมาะสม (Optimum condition) ของการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดในการทดลอง ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ (Shahsavani *et al.*, 2009)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียของโรงงานหรือชุมชนที่มีกระบวนการฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน ที่ทำการสังเคราะห์จากเฟอริกคลอไรด์ด้วยวิธีการโซลเจลและทำการเคลือบบนตัวกลางเซรามิกชนิดโพรเซสที่แข็งและเซรามิกชนิดวงแหวน ทำการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ทดลองกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ในชุดการทดลองแบบแบทช์ (Batch) และชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous) ชนิด Packed column ด้วยการบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาในคอลัมน์และทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Design Expert RSM โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษา ประกอบด้วย พีเอช ความเข้มข้นของน้ำสี อัตราการไหลของน้ำสี และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา วัดค่า COD วัดค่าความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และแสดงผลของโครงสร้างของสารที่อยู่ในตัวอย่างด้วยเทคนิค LC-MS เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ทำการทดสอบการบำบัดเสียจริงจากกลุ่มผลิตภัณฑ์จากระบบ Packed column เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในชุมชนและพัฒนาสู่การใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการฟอกย้อมด้วยระบบแบบแบทช์
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบชุดทดลองแบบต่อเนื่องสำหรับการศึกษาทดลองการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการฟอกย้อม การหาสมการทางคณิตศาสตร์ และหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน
3. เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงจากการฟอกย้อมของชุมชนสำหรับหาแนวทางในการออกแบบระบบกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งของการฟอกย้อมในระดับชุมชนและ โรงงานอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบบนตัวกลางเซรามิกโดยวิธีโซลเจลสำหรับการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม
2. ทำการทดลองด้วยน้ำสีสังเคราะห์จากสีย้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ที่ความเข้มข้น 0.01-0.20 กรัมต่อลิตร
3. สร้างชุดทดลองแบบแบทช์และแบบต่อเนื่องชนิด Packed column ที่ใช้ในการศึกษาการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม
4. ออกแบบการทดลองและหาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในน้ำสีสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากการผลิตผ้าบาติกของชุมชนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนด้วยระบบแบบต่อเนื่องใน Packed column

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนโดยวิธีโซลเจล สำหรับกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมได้
2. ได้ระบบที่เหมาะสมและให้ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมด้วยระบบ Packed Column สำหรับใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมและอื่นๆ ที่มีน้ำเสียปนเปื้อนสีย้อม
3. สามารถลดต้นทุนในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งของโรงงานและชุมชนที่ผลิตผลิตภัณฑ์ฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดฟื้นฟูสภาพได้ด้วยระบบ Packed column

บทที่ 2

ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นำเสียน้ำ (รัชนี รุกชชาติ, 2544)

นำเสียน้ำ หมายถึง น้ำที่มีสารใดๆ หรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็น และเชื้อโรคต่างๆ สำหรับแหล่งที่มาของน้ำเสียแบ่งได้เป็น 2 แหล่ง คือ น้ำเสียจากแหล่งชุมชน มาจากกิจกรรมสำหรับการดำรงชีวิต เช่น อาคารบ้านเรือน และน้ำเสียจากกิจกรรมอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียประเภทนี้มีประมาณ 25% จากปริมาณน้ำเสียทั้งหมดที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม แม้จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่สิ่งสกปรกในน้ำเสียจะเป็นพวกสารเคมีที่เป็นพิษและพวกโลหะหนัก รวมทั้งพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีความเข้มข้นสูงด้วย

2.1.1 ลักษณะของน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสีย จำแนกออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ลักษณะน้ำเสียทางกายภาพ เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของน้ำเสียทางกายภาพ ประกอบไปด้วย

1) ปริมาณของแข็งทั้งหมด ประกอบด้วย ปริมาณของแข็งที่แขวนลอย (TSS, Total Suspended Solids) และปริมาณของแข็งละลาย (TDS, Total Dissolved Solids) ค่าปริมาณของแข็งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสกปรก ความหนาแน่นของน้ำเสียได้ และยังสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ ที่เลือกใช้ในการบำบัด

2) กลิ่น ส่วนมากจะมาจากก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เช่น ก๊าซไข่เน่า (H_2S) เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจน โดยทำการเปลี่ยนสภาพของซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ ในการกำจัดกลิ่นในน้ำเสียอาจใช้สารเคมีที่สามารถออกซิไดซ์สารที่ทำให้เกิดกลิ่นได้ เช่น คลอรีนหรือผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

3) อุณหภูมิของน้ำ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติจะมีผลทำให้ปฏิกิริยาชีวเคมีของพวกจุลินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำถูกใช้มากขึ้น และทำให้การเจริญเติบโตของพืชสูงมากกว่าปกติ ก่อให้เกิดปัญหาหมอกพิษทางน้ำ นอกจากนี้ยังมีผลให้การละลายของออกซิเจนในน้ำลดลง เนื่องจากค่าอิ่มตัวของออกซิเจนในน้ำจะลดลงเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น

4) สี สีของน้ำเสียเป็นปัญหาเนื่องจากโรงงานหลายแห่ง เช่น โรงงานทอผ้า โรงงานสีย้อม และโรงงานอื่นๆ ปล่อยน้ำเสียออกมา หรือสีเขียวซึ่งเกิดจากการเกิดสาหร่ายมาๆ ในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดผลเสียคือ จะเป็นตัวกั้นขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำ ทำให้แหล่งน้ำมีสีไม่น่าดู เนื่องจากสามารถมองเห็นสีของน้ำเสียได้ด้วยตาเปล่า

5) ความขุ่น เกิดจากการมีสารแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ จะกั้นหรือขวางแสงแดดไม่ให้ส่องลงได้น้ำได้มากกว่า 100% เช่นเดียวกันกับสี น้ำที่มีความขุ่นมากจะทำให้ยากต่อการกรองน้ำ

2. ลักษณะน้ำเสียทางเคมี จะประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ น้ำเสียที่มาจากบ้านเรือนจะประกอบด้วย 50% ของสารอินทรีย์และ 50% ของสารอนินทรีย์

1) สารอินทรีย์ ส่วนประกอบที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากชุมชน คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน น้ำมัน และปริมาณเล็กน้อยของผงซักฟอก สารประเภทฟีนอล และยาปราบศัตรูพืช

2) สารอนินทรีย์ ได้แก่ คลอไรด์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โลหะหนัก ก๊าซ และสภาพความเป็นกรดและเบสของน้ำเสีย เป็นต้น

3) คลอไรด์ ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ในน้ำเสีย ถ้าไม่มากจนเกินไป จะไม่อันตรายต่อมนุษย์ แต่จะมีผลทำให้น้ำมีรสเค็ม แต่ไม่ควรเกิน 250 มิลลิกรัมต่อลิตร

4) พีเอช (pH) เป็นค่าที่แสดงปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคไฮโดรเจน $[H^+]$ ในน้ำ ใช้บอกความเป็นกรดหรือด่างของน้ำทิ้ง เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบำบัดด้วยวิธีการทางเคมี ฟิสิกส์และชีววิทยา และจำเป็นต้องควบคุมค่าพีเอชของน้ำทิ้งให้คงที่หรือควบคุมให้อยู่ในช่วงที่จำกัดไว้

5) สภาพกรดและสภาพด่าง (Acidity and Alkalinity) สภาพกรดของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการแตกตัวให้โปรตอน น้ำทิ้งที่มีสภาพกรด คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีค่าพีเอชต่ำกว่า 8.2 สภาพด่างของสารละลายใดๆ คือความสามารถของสารละลายนั้นในการรับโปรตอน น้ำทิ้งที่มีสภาพด่าง คำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรของแคลเซียมคาร์บอเนต จะมีพีเอชสูงกว่า 4

6) โลหะหนัก เป็นสารซึ่งมีพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่มีโลหะหนักบางชนิดที่มีความจำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิตแต่ต้องได้รับในปริมาณที่พอเหมาะ ถ้ามากเกินไปจะเป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสี เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดที่ไม่เป็นที่ต้องการและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่วปรอท และนิกเกิล เป็นต้น

7) ซัลเฟอร์ มีอยู่ในน้ำธรรมชาติและในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของ Organic Sulfur เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาหากกลิ่นเหม็นจากการย่อยสลายน้ำเสียและการกัดกร่อนต่อสภาพแวดล้อม

8) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO, Dissolved Oxygen) ออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำธรรมชาติที่มีคุณสมบัติดีจะมีค่า DO ประมาณ 5-7 ppm แต่ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การละลายของออกซิเจนลดลง

9) ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่สำคัญธาตุหนึ่งต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ

3. ลักษณะน้ำเสียทางชีววิทยา ประกอบด้วยจุลินทรีย์มากมายหลายชนิดเจือปนอยู่ จุลินทรีย์ที่พบในน้ำเสียทั่วไป ได้แก่ แบคทีเรีย สาหร่าย ฟังไจ โปรโตซัว โรทีเฟอร์ คัสตาเซียน และไวรัส เป็นต้น

2.1.2 สีของน้ำเสีย (ปรางศิริ ศรีศุภพชร, 2551)

สีของน้ำที่ปรากฏให้เห็นโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ

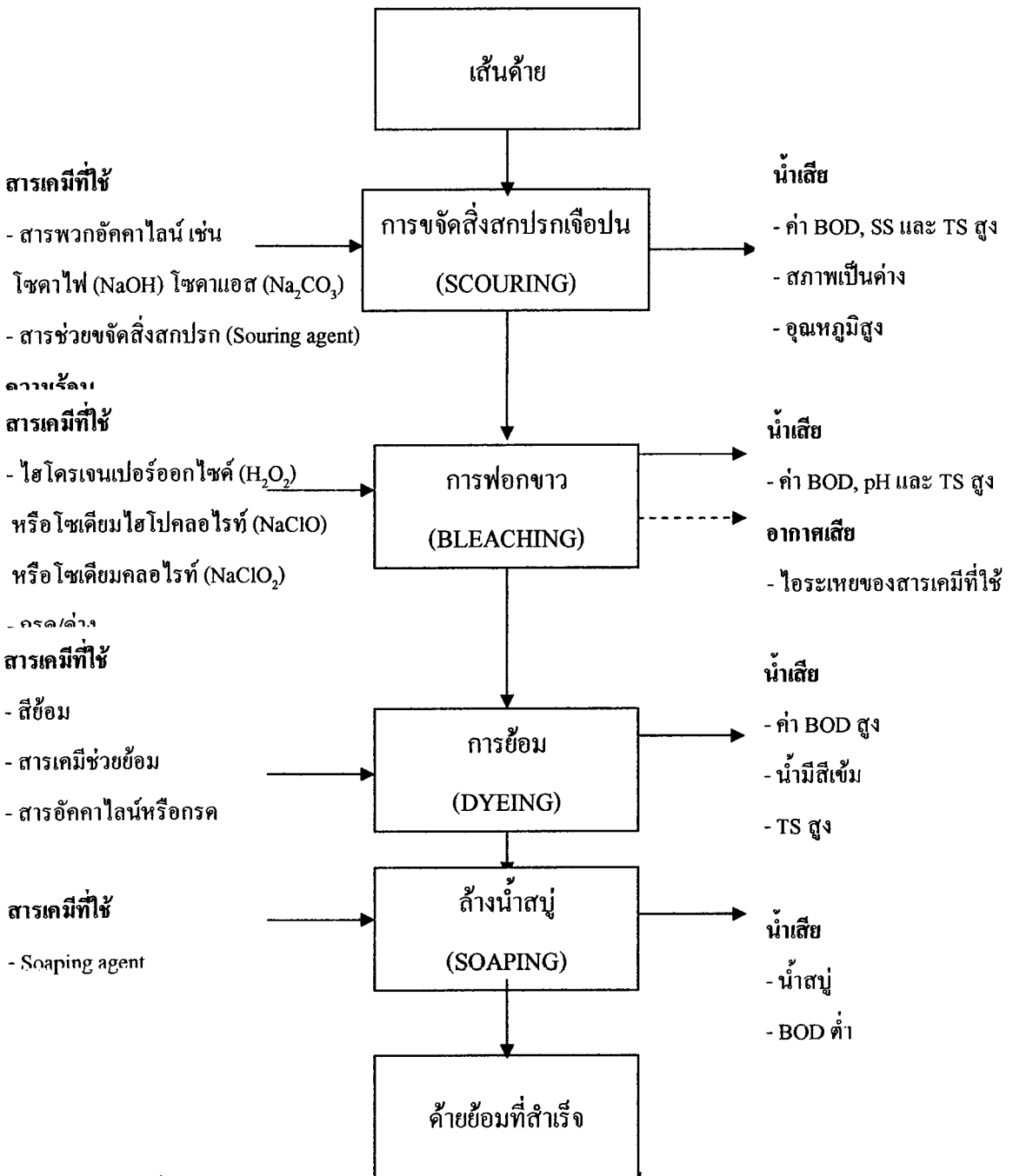
1. สีแท้หรือสีจริง (True color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ซึ่งสารที่ทำให้เกิดสีแท้ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารประกอบของสารประกอบทั้งสามดังกล่าว เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ

2. สีปรากฏ (Apparent color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีกายภาพ เกิดจากการสะท้อนของสิ่งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้แก่ พืชเล็กๆ ในน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช (Phytoplankton) และแพลงก์ตอนสัตว์ (Zooplankton) รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น ซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย

สีทั้งสองรูปแบบนี้อาจจะแยกจากกันโดยวิธีหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งสีปรากฏจะตกตะกอน ส่วนสีแท้จะไม่ตกตะกอน และเมื่อสามารถกำจัดสีปรากฏออกไปได้จะทำให้เห็นสีแท้ของน้ำได้ สำหรับสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าเกิดจากการใช้สีย้อมในกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งอนุภาคของสีย้อมเหล่านี้จะละลายเจือปนและแขวนลอยอยู่ในน้ำ เป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำเสียเกิดสีขึ้น อนุภาคของสีย้อมที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจัดเป็นอนุภาคที่ไม่สามารถถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีตกตะกอนทางธรรมชาติ ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดสีในน้ำเสียที่เกิดจากอนุภาคของสีย้อมจะทำให้เกิดสีแท้ในน้ำเสีย

2.2 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีที่สวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อมและให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้อาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่างๆ ในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะมีความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่ประเภทของการผลิตและการเลือกใช้สารเคมี กระบวนการฟอกย้อมผ้าเป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญทั้งในขั้นตอนการซักล้าง ฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างผ้าทอกับผ้าถักก็คือ การฟอกย้อมผ้าถักจะไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ดังนั้นกระบวนการเตรียมผ้าถักที่สำคัญ คือ การซักล้างทำความสะอาดก่อนทำขั้นตอนต่อไป โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมแสดงดังรูปที่



รูปที่ 2-1 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อม

2.2.1 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

จากข้อมูลของระบบเครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย (2553) พบว่า ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป มีดังต่อไปนี้

1. มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝ้าคลุมผิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟอง โดยทั่วไปแล้วน้ำเสียมักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูนต่อลิตร สารที่ทำให้น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)

3. มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปน้ำเสียในกระบวนการฟอกย้อมจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อมและขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

4. มีปริมาณทีเอส (ของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือ โซเดียมและกรดต่างๆ

5. มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมและจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

6. มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียมและสังกะสี

7. มีปริมาณทีเอสเอส (ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

8. มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะมีคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้างและจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจำนวน 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บแบบจ้วงตัก (Grab sampling) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียสามารถสรุปค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม	ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด					จำนวนข้อมูล
	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	สี หน่วย Pt Co	
ฟอกย้อมด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ฟอกย้อมผ้าถัก	9.0	110	370	150	570	16
ฟอกย้อมผ้าทอ	8.6	400	1200	40	670	41
ฟอกย้อมด้ายและผ้าอื่น	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2542, คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม

หมายเหตุ: ค่าลักษณะของน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับหรือน้อยกว่า 50

2.2.2 มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม

ปัจจุบันกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโดยระบุเพียงว่าน้ำทิ้งต้องไม่เป็นสีที่พึงรังเกียจ ต่างประเทศจะมีความเข้มงวดเรื่องการรักษาสีสิ่งแวดล้อม เช่น เยอรมัน ญี่ปุ่น และสิงคโปร์ก็ยังไม่มีความหมายน้ำทิ้งเช่นเดียวกัน สาเหตุที่สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่เข้มงวดในต่างประเทศนั้นเนื่องมาจากสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ ปริมาณสีในน้ำทิ้งซึ่งผ่านการบำบัดแล้วไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของ BOD ดังนั้นหากมีการกำหนดมาตรฐานสีในน้ำทิ้งขึ้นมาในขณะที่โรงงานสามารถบำบัดค่า BOD ให้ได้มาตรฐานอาจไม่สามารถบำบัดสีให้ได้ตามมาตรฐาน สำหรับประเทศไทยกรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ)

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้ง			
	กรมโรงงานอุตสาหกรรม	กรมควบคุมมลพิษ	กรมชลประทาน	กรมเจ้าท่า
พีเอช	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	5-9
บีโอดี (มก./ล.)	<60	<60	<20	<20-60
ซีโอดี (มก./ล.)	<400	<400	-	-
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	<50	<50	<30	-
ทีเคเอ็น (มก./ล.)	<100	<100	-	-
ปริมาณสี	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ	ไม่พึงรังเกียจ

2.3 สีย้อม (Dyes) (รัชนิย์ รุกขชาติ, 2544)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไชลีน แอนทราซีน โทลูอินและพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ซึ่งสีย้อมที่ผลิตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปใน โมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไอออนิก (Ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง การที่จะนำสีย้อมใดๆ มาย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยซึ่งต้องมีอำนาจมากกว่าน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อ โมเลกุลสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติดเส้นใยได้เอง (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะ

ไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals'force) แรงไอออนิก (Ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป การดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่นเกิดจากอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยคือ พันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอวาลส์ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์

1. พันธะไฮโดรเจน ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (Hydroxy) จะยึดอย่างหลวมๆ กับอะตอมอื่นๆ ได้เป็นวาเลนซีที่สอง (Secondary valency) เช่น การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ เส้นใยและสีเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซี

2. แรงแวนเดอวาลส์ แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นแรงที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดกันได้เอง โดยเฉพาะระหว่างตัวสีกับเส้นใย จะเกิดแรงนี้ยึดให้ติดกันได้ เมื่อโมเลกุลของทั้งสองมีเอกลักษณ์พิเศษ คือ มีโมเลกุลยาวและแบน ดังเช่น โมเลกุลของเซลลูโลส สีแว็คหรือสีไคเรทท์ หรือระหว่างเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตตกับสียิสเพอร์ส

3. พันธะไอออนิก เกิดขึ้นได้เนื่องจากการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างอะตอมของธาตุ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน อะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนออกไป ทำให้ตัวของมันเองมีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยลงจึงแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกออกมา ส่วนอะตอมของธาตุที่เป็นฝ่ายได้รับอิเล็กตรอนก็จะกลายเป็นประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่ต่างกันอย่างรุนแรงจึงเรียกว่าไอออนิก พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่แข็งแรง (Strong) แต่เปราะ (Brittle) จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีแบบนี้เกิดขึ้นโดยไฟฟ้าต่างศักย์ เส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนใหญ่สีซึ่งละลายน้ำจะมีไอออนของสีเป็นลบการดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอวาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าใช้ตัวสีที่มีไอออนเป็นบวกก็ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใย ตัวอย่างเช่นสีที่ใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก

4. พันธะโควาเลนต์ เป็นพันธะทางเคมีซึ่งอะตอมสองอะตอมหรือมากกว่าเกาะกันด้วยการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงกว่าแรงที่กล่าวมาแล้วทั้งสิ้น เช่น สีรีแอคทีฟจะยึดกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งสามารถยึดได้หนาแน่นและทำให้แยกตัวออกจากกันได้ยาก

2.3.1 การเกิดสีของสีย้อม

สีซึ่งปรากฏออกมาทำให้ตามนุษย์ปกคิมองเห็นได้ เกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกว่า “โครโมฟอร์ (Chromophor)” ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 กลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “โครโมฟอร์” และ โครงสร้างหลัก

กลุ่มอะตอมที่เรียกว่า “โครโมฟอร์”	โครงสร้าง
กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)	: -NO (หรือ =N-OH)
กลุ่มไนโตร (Nitro group)	: -NO ₂ (หรือ =NO.OH)
กลุ่มอะโซ (Azo group)	: -N=N-
กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)	: >C=O
กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group)	: >C=NH และ -CH=N-
กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulpher group)	: >C=S และ ≡C-S-S-C≡

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรมาติกโดยการดูดกลืนแถบสีขาวยาวไปบางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีข้อมีโทนสีที่แตกต่างกันไป สีข้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้วยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม (Auxochromes)” แสดงดังตารางที่ 2-4 เพื่อให้สีข้อมสามารถทำปฏิกิริยาคัดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีออกมาได้ แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน (Chromagen)” ทั้งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกโซโครมและโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีข้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 2-4 กลุ่มอะตอมออกโซโครม

Name	Group	Name	Group
Amino	-NH ₂	Chloro	-Cl
Methylamino	-NHCH ₃	Methyl	-CH ₃
Dimethyl Amino	-N(CH ₃) ₂	Methoxy	-OCH ₃
Sulphonic Acid	-SO ₃ H	Cyano	-CN
Hydroxy	-OH	Acetyl	-COCH ₃
Carboxylic Acid	-COOH	Amido	-CONH ₂

2.3.2 ประเภทสีข้อม

1. จำแนกตามแหล่งกำเนิดแบ่งสีข้อมออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1.1 สีข้อมธรรมชาติ เป็นสีข้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติโดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีข้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สีดำจากถั่ว

มะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม ส่วนสีข้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น

2.2 สีข้อมสังเคราะห์ เป็นสีข้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางเคมี

2. จำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

2.1 สีข้อม (Dyes) สามารถละลายน้ำ

2.2 พิกเมนต์ (Pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี

3. จำแนกตามวิธีใช้

การจำแนกสีข้อมที่นิยมกันมากที่สุด กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีข้อมตามวิธีใช้ออกเป็น 10 ประเภท โดยที่สีข้อมแต่ละประเภทจะมีสูตร โครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีข้อม ตลอดจนงานวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การจำแนกสีข้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีข้อม	สมบัติทางกายภาพเคมี	พันธะหรือกลไกการติดสี
1. สีข้อมเอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
2. สีข้อมเมทัลลอคอมเพล็กซ์เอซิด	ประจุลบ ละลายน้ำน้อย สีติดแน่นดี	พันธะไอออนิก
3. สีข้อมไคเรทท์	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดไม่แน่น	พันธะไอออนิก
4. สีข้อมเบสิก	ประจุบวก ละลายน้ำได้	พันธะไอออนิก
5. สีข้อมรีแอกทีฟ	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดแน่น	พันธะโควาเลนท์
6. สีข้อมดิสเพิร์ส	ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ สีติดแน่นดี	คอลลอยด์ของสีข้อมดูดซับเส้นใย

2.3.3 เคมีของสีข้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. พันธะคู่สลับ (Conjugated double bonds) ทั้งโครโมฟอร์และออกโซโครมต่างเชื่อมกับพันธะคู่สลับ ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า โครโมเจน (Chromogen)

2. โครโมฟอร์ เป็นกลุ่มอะตอมของสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีในกลุ่มไม่อ้อมด้วยวงแหวน -NR³⁺ หน้าที่ของโครโมฟอร์คือเป็นตัวรับอิเล็กตรอนให้สีแก่โมเลกุลของสีข้อม

3. ออกโซโครม (Auxochromes) เป็นกลุ่มข้างเคียงที่เกาะอยู่บนโครโมฟอร์ที่สร้างลักษณะของความเข้มขัณสี (Intensity) และปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดติดกับเส้นใยให้กับสีข้อม

เมื่อมีหมู่อื่นๆ มาเกาะแทนไฮโดรเจนอะตอมบนออกซิโครม เช่น หมู่อัลคิล (Alkyl group) หมู่เอไมด์ (Amide group) หรือหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) พบว่า จะทำให้สีเข้มขึ้นกว่าเดิมหรือในทางตรงกันข้ามทำให้สีอ่อนลงกว่าเดิม เพราะฉะนั้นสีที่มีโครงสร้างโครโมฟอร์เหมือนกันสามารถดัดแปรให้มีความหลากหลายของเฉดสีได้

2.3.4 ความเป็นพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยากมีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำที่ปัจจุบันจึง ไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม แม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้มีสีเป็นที่รังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็น ได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสงและระดับความใสของน้ำ จากการศึกษาพบว่าสีย้อมที่ปล่อยจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้โลหะเจือปนที่ปนเปื้อนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียมและสังกะสี จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดแทนที่โลหะสำคัญของเอนไซม์ทำให้เอนไซม์ทำงานได้น้อยลงหรือไม่ได้เลย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้ว่ามีความเป็นพิษต่ำก็ตาม (ปรางศิริ ศรีสุภพัชร, 2551) โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ ไม่พบรายงานว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมสูงกว่าบุคคลอาชีพอื่น แต่อย่างไรก็ตาม สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ ทางจุกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยสัมผัสและทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเข้าไปกับอาหารแต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าสารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อมมีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมากและมีหลายตัวที่เป็นสารก่อมะเร็ง

ผลกระทบของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อมหรือสมบัติด้านมลพิษของสีย้อม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ
4. การผลิตออกซิเจนลดลง เนื่องจากผลกระทบจากการขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งส่งผลต่อพืชน้ำและสัตว์น้ำ
5. ความเป็นพิษของสารที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อม บางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง ทั้งหมดข้างต้นจะส่งผลให้สถานะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

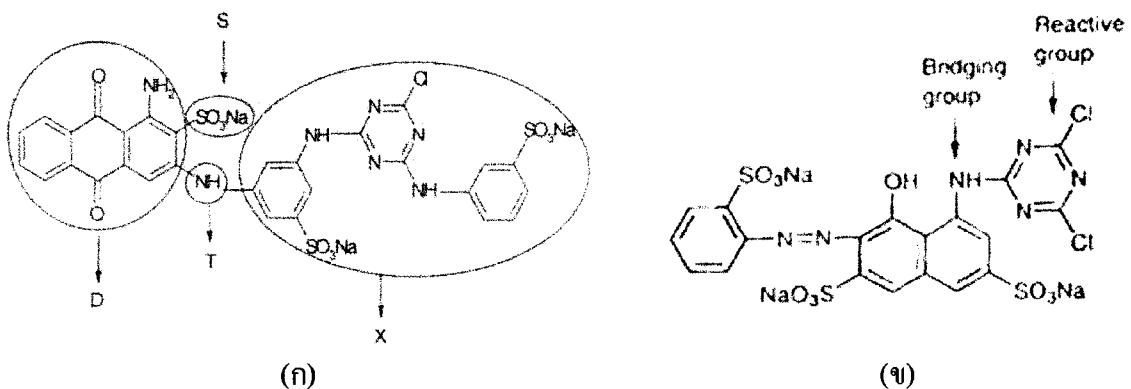
2.4 สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive Dyes) (วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์, 2546)

สีย้อมรีแอกทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นอออนลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อม โมเลกุลของสีจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซี (OH^-) ของเส้นใยเซลลูโลสแล้วเชื่อม โยงติดกัน

โดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงค์ (Cross link) กับเซลลูโลสได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วย 4 กลุ่ม และสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่าย คือ S-D-T-X เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีย้อมเกิดปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซี (OH) ของเส้นใย T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่างเช่น หมู่ $-NH$, $-NHCO$, $-SO_2$, $-NHSO_3$ และ $-NCH_3$ เป็นต้น S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงและเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นพวกกรดซัลโฟนิค ($-SO_3Na$) ซึ่งอาจมีกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม

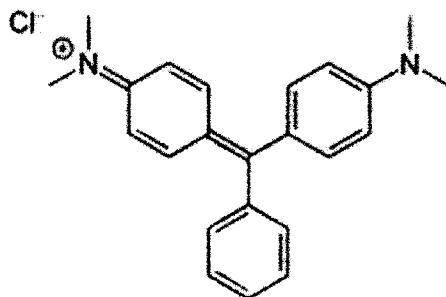
ในบางกรณีกลุ่มรีแอคทีฟอาจต่ออยู่กับโครโมฟอร์โดยตรง โดยที่ไม่มี Bridging group ก็ได้และกลุ่มรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะเป็นสาร Heterocyclic ring ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญ คือ สารที่ทำให้เกิดสีและกลุ่มรีแอคทีฟซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างสีย้อมรีแอคทีฟแสดงดังรูปที่ 2-2 และรูปที่ 2-3.



รูปที่ 2-2 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5 (ก) โครงสร้างสีย้อม Reactive red 1 (ข)

2.5 สีย้อมเบสิก (Basic or Cationic dyes)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ให้ประจุบวกละลายน้ำได้ โครงสร้างส่วนใหญ่ของสีย้อมเบสิกจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกกลุ่มของสารประกอบไตรเอริลมีเทน (Triaryl methane) หรือแซนทีนส์ (Xanthenes) นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และ โยอะคริลิกได้ดี ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทน ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซักและแสง ตัวอย่างสีย้อมเบสิกแสดงดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 โครงสร้างสีย้อม Malachite green

2.6 การวัดสีในน้ำเสีย (ปรางศิริ ศรีศุภพัชร, 2551)

1. วิธีเปรียบเทียบกับแพลทินัม โคบอลต์มาตรฐาน (Platinum cobalt standard) วิธีนี้กำหนดโดย American Public Health Association (APHA) โดยแพลทินัม โคบอลต์มาตรฐาน จะเป็นการเตรียมสารละลายมาตรฐานสีเหลืองๆ คล้ายน้ำตามแหล่งน้ำธรรมชาติทำให้การใช้งานจำกัดเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับแหล่งน้ำธรรมชาติ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในหลักการนี้คือ หลอดเปรียบเทียบสีมาตรฐาน (Standard color comparison tubes) หรือที่เรียกว่า หลอดเนสเลอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดสีมานานแล้ว ข้อดีคือ ราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ จะต้องมีการเตรียมมาตรฐานใหม่ทุกครั้งที่มีการใช้งานทุกครั้ง

2. วิธีวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) เป็นการวัดสีโดยการหาความยาวคลื่น (Wavelength) ที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด (Absorption maxima) แล้วใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าสีของน้ำตัวอย่าง ในรูปการวัดการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยมีหลักการที่ว่า สีเข้มจะดูดกลืนแสงมาก หรืออัตราการทะลุผ่าน ของแสงน้อย สำหรับการอ่านค่าความเข้มข้นของสีอ่านได้จากกราฟมาตรฐาน ที่ทำขึ้นมา

2.7 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย

สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมส่วนใหญ่จะเป็นสีย้อมและสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการได้เสียกันว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกรำรังเกียจต่อคนทั่วไปตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน

2.7.1 วิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ค่าง สามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้ คือ ปูนขาว และสารส้ม ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนของ

สีจมน้ำในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้

2. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วย โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) และระบบที่ 2 คือระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon)

3. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ดังนั้น ก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์

4. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone treatment) โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เป็นพวกวงแหวน กับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซน เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยไนโตรเจนคลอรีนหรือซัลเฟอร์ เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

5. เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane technology) กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และไดนามิก เมมเบรน (Dynamic membrane)

2.7.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย

Jiasheng *et al.*, 1999 ศึกษาการกำจัดสีย้อม 5 ชนิด ได้แก่ Acid Orange II, Acid Orange IV, Acid Orange GG, Acid Orange 3B และ Acid Orange I โดยการใช้ Fe^0 ซึ่งได้จาก ผงเหล็ก จากผลการศึกษาพบว่า ความเป็นกรดของสารละลายและพื้นที่ผิวของผงเหล็กมีผลต่อการกำจัดสีย้อม เมื่อความเป็นกรดของสารละลายเพิ่มจาก pH 5 เป็น pH 9 และพื้นที่ผิวของผงเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.178 เป็น 0.058 มิลลิกรัม โมลต่อลิตรน้ำเสีย ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น

Muruganandham and Swaminathan, 2000 ศึกษาการใช้ Photooxidation ในการกำจัดสีย้อม Reactive Orange 4 โดยการใช้ $H_2O_2/UV-A$ ซึ่งทำการศึกษาผลของ พีเอช ปริมาณของ H_2O_2 และกำลังของแสง UV พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อการกำจัดสีย้อมอย่างมาก จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง อัตราการกำจัดสีย้อมเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

(Pseudo first order reaction) เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดสีแบบ Solar-H₂O₂ กับ UV-H₂O₂ พบว่าสิ่งที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมคือ สารเคมี เช่น NaOH, NaCl และ Na₂SO₃ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะ ไปยับยั้งในการกำจัดสีย้อม

วรรณวิภา ผลาหาญ (2547) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอคทีฟที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ผงเหล็ก โดยใช้การทดลองแบบแบทช์และคอลัมน์ การทดลองนี้ใช้สีย้อมรีแอคทีฟ 5 ชนิดคือ Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม คือ พีเอช 3 ในการสัมผัส 30 นาที ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ขนาดของเศษผงเหล็ก 12-100 เมช ความเข้มข้นสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของเศษผงเหล็ก 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive Blue 5, Reactive Blue, Reactive Black, Reactive Red และ Reactive Yellow คือ 99.61, 98.61, 97.04, 99.00, 98.82 และ 94.89% ตามลำดับ

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ (2546) ได้ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟ โดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมีเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดสีในน้ำเสียสีแดง CI Reactive Red 180 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ขั้วเหล็กขนาด 3×6.5 เซนติเมตรขึ้นไปใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง การปรับค่าการนำไฟฟ้า แต่ถ้ามีการปรับค่าการนำไฟฟ้าเป็น 7.2 ms/cm ใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และใช้เวลาเหลือเพียง 30 นาที และพบว่าวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้มีประสิทธิภาพเป็นอย่างดีไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมโดยสามารถกำจัดสีได้สูงถึง 96%

บุษรา ประทุมญาติ (2545) ได้ทำการศึกษาการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride: NaBH₄) ในรูปของสารละลายที่เป็นค่างในการกำจัดสีย้อม จากการทดลองใช้ NaBH₄ ความเข้มข้น 1.2% ใน 4% ของ NaOH เพื่อกำจัดสีรีแอคทีฟที่มีหมู่อะโซ 3 ชนิด ได้แก่ Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 50, 70, 90, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสภาวะที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช ระยะเวลาควนเร็ว และปริมาณของ NaBH₄ เป็น 1, 3, 5 และ 7 เท่าของค่า Stoichiometric จากผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาควนเร็วสำหรับสี Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 เป็น 30, 10 และ 25 นาที ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด คือ พีเอช 10 และปริมาณ NaBH₄ เป็น 7 เท่าของ Stoichiometric โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี Reactive Black 5, Reactive Red 180 และ Reactive Blue 171 ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 94.08, 93.85 และ 99.03% ตามลำดับ

ปวีณา ชนะสังข์ (2539) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยวิธีออกซิเดชันและวิธีรีดักชัน สารออกซิไดซ์ที่ทำการศึกษา คือ เฟนทอนรีเอเจนต์ และสารรีดิวซ์ที่ทำการศึกษาคือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ศึกษาผลของพีเอชและปริมาณสารต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ หาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีจาร์เทสต์ ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ทดลองแบ่งตามประเภท

ของสีข้อมออกเป็น 4 ประเภท คือ ไคเรคท์ รีแอกทีฟ แอซิด และเบสิก พบว่าผลของ พีเอช ปริมาณสาร และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการลดสี และ COD ของน้ำ ที่จริงจากโรงงานฟอกย้อม พีเอชที่เหมาะสมสำหรับสีไคเรคท์และสีแอซิด คือ 4.0 สำหรับน้ำสีไคเรคท์ รีแอกทีฟ แอซิด และเบสิก มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 99.5%, 98.4%, 96.0% และ 99.2% ตามลำดับ

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) คือ สารที่ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยไม่สูญหายไปในช่วงการเกิดปฏิกิริยาและจะได้อกลับคืนมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ประเภท

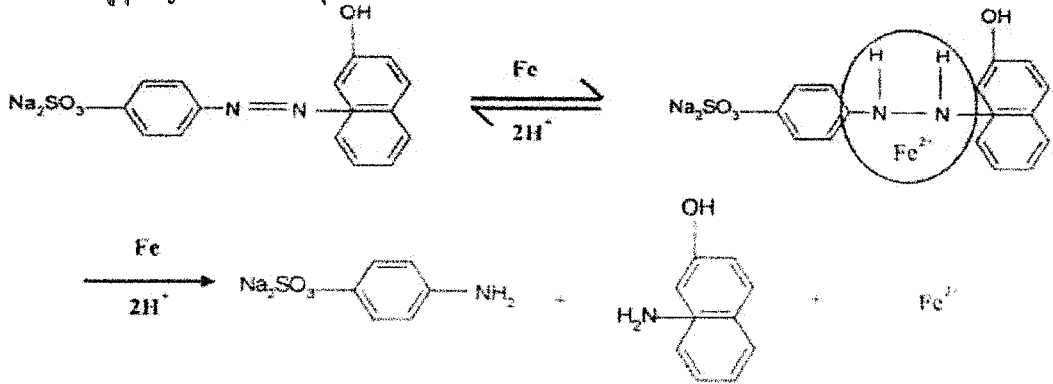
1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalysis) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาค (Phase) เหมือนกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาในวัฏภาคของแก๊ส ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ต้องอยู่ในวัฏภาคของแก๊สด้วย

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalysis) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีวัฏภาคแตกต่างกับสารที่เข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มักเป็นของแข็ง โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

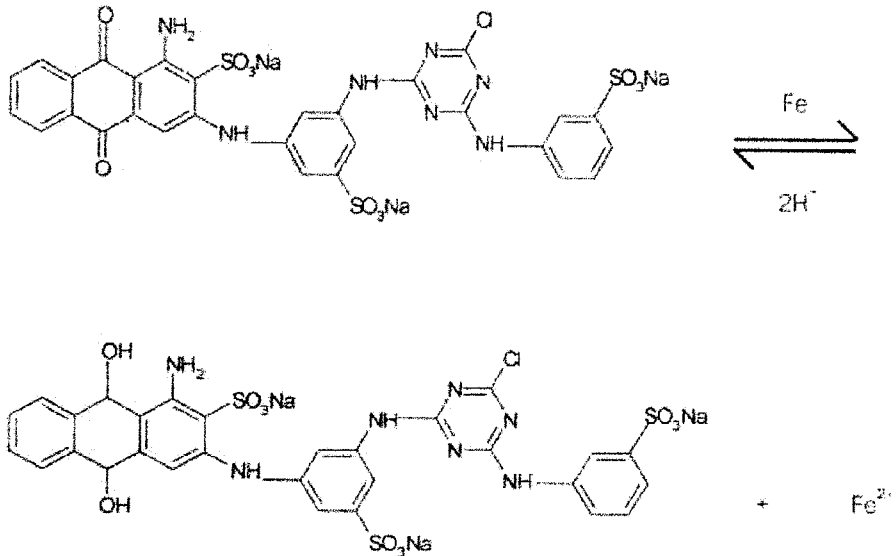
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท Heterogeneous Catalysis ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีการ โซลเจลเคลือบที่พื้นผิวของตัวกลางเซรามิก คุณสมบัติของ Fe^{3+} ที่เคลือบบนผิวของเซรามิกจะทำปฏิกิริยากับหมู่โครโมฟอร์ของโครงสร้างสีข้อม โดยเข้าไปทำลายพันธะโครโมฟอร์ ทำให้สีถูกกำจัด ซึ่งโครงสร้างของสีข้อมจะมี Azo chromophore (N=N) ทำให้เกิดสี เหล็ก Fe^0 ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีในสารละลายที่เป็นกรด ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาการกำจัดสีข้อม Acid Orange 2 โดยใช้ Fe^0 จะเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2-1) และดังแสดงในรูปที่ 2-4 ได้เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เฟอร์รัสไอออนจะเข้าไปทำลายพันธะคู่ทำให้สีถูกกำจัด นอกจากนี้ผลการบำบัดสีด้วยผงเหล็กในงานวิจัยของ วรณวิภา, 2547 จะเห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการบำบัดมีหมู่ OH เข้าแทนที่หมู่โครโมฟอร์ในโครงสร้างสีข้อม Reactive blue ทำให้โครงสร้างสีข้อมมีความเป็นเบสเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2-5



เพื่อเตรียมการการเริ่มรู้คุณหญิงหลง อรรถกรวิสุนทร



รูปที่ 2-4 ปฏิกิริยาการกำจัดสีของ Acid Orange 2 โดยใช้ Fe^0



รูปที่ 2-5 ปฏิกิริยาการกำจัดสีของ Reactive blue โดยใช้ผงเหล็ก

(วรรณวิภา ผลหาญ, 2547)

นอกจากปฏิกิริยาข้างต้นดังกล่าวมาการกำจัดสียังสามารถทำได้ด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยการผสมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) โดยเหล็กทำหน้าที่เป็นคะตะลิสต์เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดดิคัล (Hydroxyl radical; $\text{OH}\cdot$) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูงโดยสูงกว่าโอโซน 25% และสูงกว่าคลอรีนถึง 200% โดยมีค่ารองจากอนุมูลฟลูรีน (Flurine radical) เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

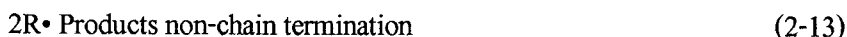
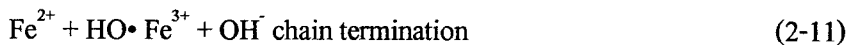
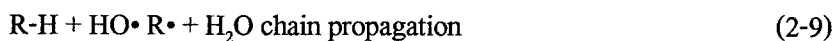
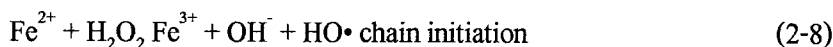
ตารางที่ 2-6 แสดงลำดับศักย์ออกซิเดชัน

Oxidant		Potential (Volts)
$F_2 + 2e^-$	\longrightarrow $2F^-$	2.87
$HO\bullet + H^+ + e^-$	\longrightarrow H_2O	2.33
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e^-$	\longrightarrow $MnO_2 + 2H_2O$	1.68
$O_3 + 2H^+ + 2e^-$	\longrightarrow $O_2 + H_2O$	2.07
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	\longrightarrow $2H_2O$	1.77
$Cl_2 + 2e^-$	\longrightarrow $2Cl^-$	1.39
$ClO_2 (g) + e^-$	\longrightarrow ClO_2^-	0.95
$ClO_2^- + 2H_2O + 2e^-$	\longrightarrow $Cl^- + 2OH^-$	0.90

ความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ได้จากสารละลายเฟนตัน ทำให้มีการนำสารละลายเฟนตัน ไปใช้กันอย่างกว้างขวางในด้านการบำบัดของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านน้ำ ดิน อากาศ และของเสียอันตราย โดยการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตัน ใช้สมการของ Pure system คือ แสดงเฉพาะปฏิกิริยาที่จะเกิดสำหรับสารละลายเฟนตันเท่านั้น ซึ่งได้มีการพิสูจน์ และ ได้รับการยอมรับ (Flaherty, 1992)



โดยสมการทั้งหมดจะไม่ได้เกิดขึ้นทุกสมการ แต่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเหล็ก (Fe^{2+}) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยถ้ามีปริมาณเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) มากเกินไป การเกิดปฏิกิริยาจะเป็นไปตามสมการที่ (2-2) และ (2-3) หากมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มากเกินไปในสถานะที่เป็นกรด การเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2-6) และ (2-7) จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดปฏิกิริยาตามสมการ (2-2), (2-4) และ (2-5) แทน โดยปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตันกับสารอินทรีย์นั้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งด้วยกลไกแบบลูกโซ่ (Chain) หรือไม่ใช่ลูกโซ่ (Non-chain) ซึ่งกลไกเหล่านี้ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง (Flaherty, 1992) แสดงดังสมการต่อไปนี้

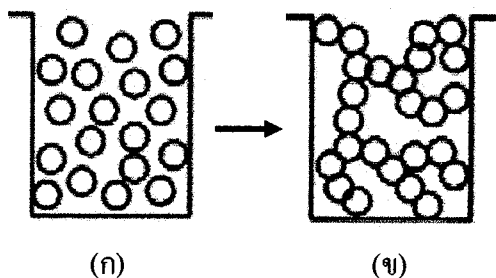


นอกจากนั้น Flaherty (1992) ยังได้อ้างคำกล่าวของ Walling (1975) ที่ได้มีการคาดการณ์ว่าอนุมูลของสารอินทรีย์ (Organic radical) 3 รูปแบบที่เกิดขึ้น จะสามารถปรีดิคซ์ Fe^{3+} ให้กลับมาเป็น Fe^{2+} ได้อีก และทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ยาวออกไปอีก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเฟนตัน ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเหล็ก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเหล็ก แม้ว่าปฏิกิริยาเฟนตันจะสามารถใช้ประโยชน์ได้แต่ยังมีจุดด้อย เนื่องจากไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้เกิดการสิ้นเปลือง มีต้นทุนสูง

2.8.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวกลางของแข็ง

1. กระบวนการ โซล-เจล (Sol-gel technology)

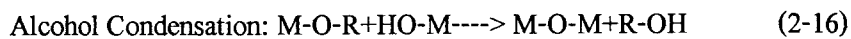
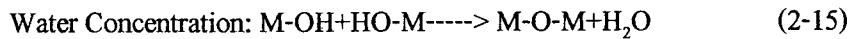
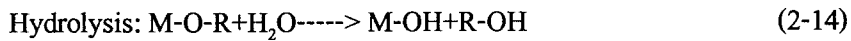
กระบวนการ โซล-เจล (Sol-gel process) เป็นวิธีการที่ใช้เตรียมสารละลายในการเคลือบวัสดุจำพวก เซรามิกและแก้ว กระบวนการ โซล-เจล เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกันระหว่างสารประกอบตั้งต้น (Precursor) กับตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์ เกิดเป็นสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ ในของเหลวที่เรียกว่า “โซล” เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของของเหลวเป็นสารที่เรียกว่า “เจล” ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายโซล (ก) เป็นสารละลายเจล (ข)

ที่มา <http://phys.suwon.ac.kr>

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการ โซล-เจลมี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water Condensation และ Alcohol condensation ดังสมการที่ (2-14) ถึงสมการที่ (2-16) เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ พีเอช ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วน โมลของตัวทำละลายและ โลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติและ โครงสร้างต่างกัน



โดยกระบวนการ โซลเจลประกอบไปด้วยหลายขั้นตอนดังนี้

1) การเตรียมสารละลายตั้งต้นในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามด้วยปฏิกิริยาการรวมตัว ปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นกลายเป็น โซล ทั้งนี้ความเข้มข้นของสารประกอบตั้งต้นมีผลต่อความหนืดของโซล

2) จากสารละลายที่เรียกว่า โซล เกิดการเจลเลชัน (Gelation) ซึ่งเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเหลว เป็นเจลที่มีความหนืด (Viscosity) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิด โครงตาข่าย โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ พีเอช ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อโลหะ และอุณหภูมิ

3) การเคลือบ (Coat) เมื่อได้สารละลายที่เรียกว่า โซล ก็ทำการเคลือบโซลลงบนตัวกลางเซรามิก โดยการจุ่มชิ้นเซรามิกลงไป หลังจากนั้นนำมาอบให้แห้ง

4) การเผา (Calcined) หลังจากผ่านกระบวนการ โซลเจล สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า โซล (Sol) จะเคลือบอยู่บนตัวกลาง แล้วจึงนำไปเผาในบรรยากาศที่อุณหภูมิที่กำหนดเพื่อให้สารละลายและ สารเคมีอื่นๆสลายไปเหลือเพียง โลหะบริสุทธิ์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาคาร์โบเทอร์มอลรีดักชันขึ้น ทำให้ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นของแข็ง

โดยทั่วไปนั้นมีการนำเทคโนโลยีโซลเจล มาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น พง ละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป เช่น แก้วซิติลิกา สารเคลือบป้องกันสารสึกกร่อน การสะท้อนแสง และ การเกาะติดผิวของน้ำเป็นต้น เทคโนโลยีโซลเจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุมีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมียู่งจำกัดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ โซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับ โมเลกุลทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสารเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีการ โซลเจล เป็นวิธีการที่ง่ายสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง ได้สารที่มีความบริสุทธิ์และ

เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากกว่าวิธี Conventional process ซึ่งใช้อุณหภูมิสูงกว่า สามารถเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนชิ้นเซรามิกโดยการจุ่มขึ้นลงไปนสารละลาย และสามารถกำหนดความหนาของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนชิ้นเซรามิกได้จากจำนวนครั้งการจุ่ม ที่สำคัญวิธีการ โซลเจล เป็นวิธีประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.8.2 การตรวจเอกสารเกี่ยวกับกระบวนการโซลเจล

Rakmak *et al.*, 2010 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเริ่มจากสารละลาย A โดยการละลาย 0.1 M ของ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร สารละลาย B ละลาย 0.1 M ของ $(COOH)_2 \cdot 2H_2O$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร และสารละลาย C ละลายของ 0.1 M $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ในเอทานอล 80 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 10 นาที โดยใส่สารละลาย B ผสมในสารละลาย A กวนเป็นเวลา 10 นาทีหลังจากนั้นผสมสารละลาย C ลงไป และกวนอีก 10 นาที ได้สารละลายที่เป็นโซลเจล นำชิ้นเซรามิกจุ่มลงในสารละลาย อบให้แห้งที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ชิ้นเซรามิกที่มีการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Fe (III)

Kumar and Kumar, 2008 เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แมกนีเซียมออกไซด์อนุภาคขนาดนาโน โดยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อนุภาคขนาดนาโนขนาดสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ไฮเดรต $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ และกรดออกซาลิก $(COOH)_2 \cdot 2H_2O$ เป็นสารตั้งต้น โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ได้สารที่เป็นโซล นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้อยู่ในฟอร์มของแมกนีเซียมออกซาลาเตไฮเดรต ($\alpha-MgC_2O_4 \cdot 2H_2O$) และทำการเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 800 และ $1000^\circ C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผง MgO มีอนุภาคขนาดนาโน (ค่าเฉลี่ยของผลึกขนาด 6.5-73.5 nm) ผง MgO ที่ได้มีโครงสร้างแบบ f.c.c. การดูดซึมรังสีอินฟราเรดของ MgO จะสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ นอกจากนี้ระดับพลังงานภายใน MgO อยู่ที่ (7.8 eV) น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในการแสดงพลาสมาสำหรับการปล่อยอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น

Huang *et al.*, 2003 เป็นการศึกษาการใช้กระบวนการ โซล-เจล ในการผลิตของ $\alpha-Fe-Al_2O_3$ อนุภาคขนาดนาโนบริสุทธิ์จากสารตั้งต้น อลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ และเฟอริกไนเตรตอธิบายและวิเคราะห์ ปฏิกิริยาการย่อย การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ และการรีดิวซ์ของไฮโดรเจนไนบรียากาสมีการควบคุม pH และอุณหภูมิเพื่อให้ได้เจล และไม่มีการตกตะกอน มีการทดสอบคุณสมบัติโครงสร้างของ $\alpha-Fe-Al_2O_3$ โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) และ Transmission Electron Microscopy (TEM) $FeAl_2O_4$ พบว่า สามารถเห็นได้ในระหว่างการอบไนบรียากาสออกซิไดซ์ที่ $300^\circ C$ องค์ประกอบ $\alpha-Fe-Al_2O_3$ มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน

Ikeda *et al.*, 2001 สังเคราะห์ Pt/Al_2O_3 ด้วยวิธีการต่างๆ กัน คือ Micro-Emulsion, Sol-gel และ Impregnation เพื่อปรับปรุงสมบัติของความต้านทานในการเกิด Sintering ของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการจุ่มด้วย Pt พบว่าเมื่อให้ความดันแก่ตัวเร่งปฏิกิริยา 156 MPa ภายใต้อัตราการไหลที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ เป็นเวลานาน 12

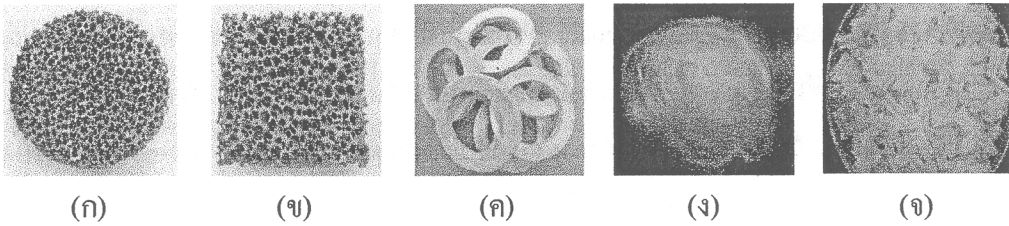
ชั่วโมง Pt/Al₂O₃ ที่เตรียมโดยวิธี Impregnation และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมข้างต้นไปเร่งปฏิกิริยา NO-CO พบว่า Pt/Al₂O₃ ที่เตรียมโดยวิธี Micro-Emulsion มีค่า Catalytic activity สูงกว่าเช่นกัน

Wang *et al.*, 2000 สังเคราะห์ Co/Al₂O₃ ด้วยวิธี Impregnation และ Sol-gel โดยศึกษาสมบัติทางเคมีและคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยเทคนิค XRD, FTIR, DRIFT, N₂-BET, XPS และ TPR พบว่าที่อัตราส่วนโดยอะตอมของ Al/Co มีค่าสูงๆ แล้วจะพบพันธะ (=Al-O-H) เป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความเป็นเบสสูง จากการศึกษาคู่จับของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) บน Co/Al₂O₃ พบว่า สามารถคู่จับได้บนตำแหน่งที่เป็นประจุบวก (Cationic sites) และ Metallic sites และเมื่อนำไปใช้ในปฏิกิริยา Ethanol stream reforming ปรากฏว่ามีค่า Selectivity ต่อแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 67%

West *et al.*, 2001 ศึกษาของการจุ่มโลหะ 3% ลงบน γ -Al₂O₃ โดยโลหะที่ใช้จุ่มมีดังนี้คือ Na, Fe, Co, Cu และ Zn พบว่า ภายหลังจากจุ่มนั้นค่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลงในขณะที่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 2 nm และจาก XRD แสดงให้เห็นว่าผลของการจุ่มด้วยโลหะนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง Al₂O₃ จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่จุ่มแล้วนี้ไปใช้เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Carbonyl sulphide โดยเปรียบเทียบตั้งแต่เริ่มปฏิกิริยาจนกระทั่งปฏิกิริยาคำเนินไป 5 ชั่วโมง พบว่า Specific activity ของ Zn/Al₂O₃ และ Ni/Al₂O₃ มีค่าคงเดิม ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่จุ่มประกอบด้วย Na, Fe, Co และ Cu มีค่า Specific Activity ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

2.8.3 วัสดุตัวกลาง

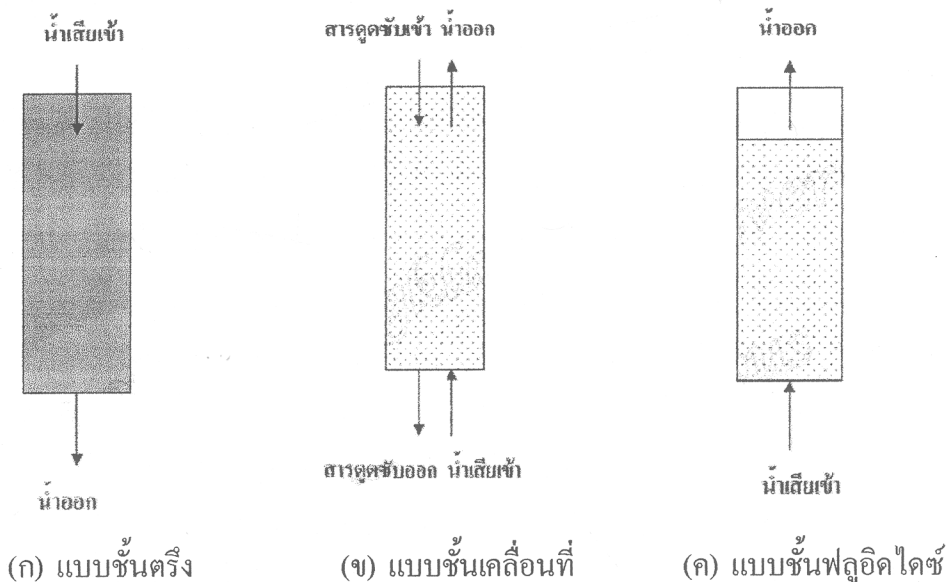
วัสดุทุกประเภทไม่ว่าจะเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ วัสดุที่ได้จากการแปรรูป วัสดุธรรมชาติหรือวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น จะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป แม้กระทั่งวัสดุประเภทเดียวกันยังมีสมบัติต่างกัน เช่น ไม้มีหลายชนิด โลหะมีหลายประเภท มีเหล็กหลายจำพวกและเซรามิกซึ่งมีชนิดและสมบัติที่แตกต่างกัน สมบัติต่างๆ ของวัสดุเป็นสิ่งที่ผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้สามารถจำแนกลักษณะเฉพาะ สามารถเลือกวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ การผลิตและการใช้งาน โดยสมบัติของวัสดุแบ่งเป็นหลายประเภท หลายลักษณะ รวมทั้งมีหลักการพื้นฐานที่จำเป็นต้องศึกษาก่อนการทดสอบ เพื่อให้เกิดทั้งความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด โดยตัวกลางหรือวัสดุตัวกลางที่นำมาใช้สำหรับการเคลือบสารละลายหรือตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายชนิด งานวิจัยนี้เลือกใช้เซรามิกชนิดรังผึ้ง (Honey comb) ในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงที่สำคัญเซรามิกเป็นวัสดุทนความร้อนมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนและความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock resistance) ต่ำ และมีค่าความแข็งแรงของพันธะในโครงสร้างสูงมากส่งผลให้เซรามิกมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าโลหะและพอลิเมอร์ นอกจากนี้เซรามิกยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดีมาก ตัวอย่างวัสดุตัวกลางที่นิยมนำมาใช้ในการเคลือบผิวแสดงดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 แสดงวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโฟมขึ้นวงกลม (ก) เซรามิกโฟมขึ้นสี่เหลี่ยม (ข) เซรามิกโฟมขึ้นวงแหวน (ค) โยแก้ว (ง) และหลอดแก้ว (จ)

2.9 คอลัมน์บรรจุ Packed column

คอลัมน์บรรจุ (Packed column) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับการแยกแก๊สหนึ่งหรือหลายองค์ประกอบออกจากของผสมที่เป็นแก๊ส มีหลักการทำงาน คือ ใช้ของเหลวสัมผัสกับแก๊สที่ไหลสวนทางกัน โดยป้อนอากาศไหลเข้าระบบทางด้านล่างและของเหลวไหลเข้าทางด้านบนของ Packed column สัมผัสกันที่พื้นผิวของวัสดุบรรจุ (Packing media) นอกจากนี้มีการใช้ Packed column ในกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบเบตซ์ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบตรง แบบขึ้นเคลื่อนที่ และแบบฟลูอิดไดซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-8 แสดงการใช้ Column ในกระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสีในน้ำเสียด้วย Packed column

Reference	ภาพประกอบ	ลักษณะการใช้งาน
พรนิภา เอี่ยมคำรงค์ และ โสธดา ชะโน, 2554		ศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสี ทั้งในกระบวนการดูดซับแบบกะและแบบหอดูดซับ
Ozdenir <i>et al</i> , 2009		ศึกษาการใช้ zeolite ในการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยใช้คอลัมน์บรรจุ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพในการกำจัดสี
Robinson <i>et al</i> , 2002		ศึกษาการดูดซับสีย้อม โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ 5 ชนิดที่มีการไหลของน้ำเสียต่อเนื่องในคอลัมน์ พิจารณาผลของ Retention time และประสิทธิภาพการบำบัด

2.10 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (Factor) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output

(Response) ที่เกิดขึ้นในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งกระบวนการต้องมีปัจจัยหรือ Input (X_1, X_2, X_3, X_4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality characteristic) ของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เกิดพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค RSM มาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อการศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ ตามหลักสถิติ โดยรายละเอียดและประโยชน์ของเทคนิค RSM ดังนี้

2.10.1 พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design, RSM) (สุदारัตน์ ถิ่นจะนะ, 2554)

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง RSM เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาเพื่อพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพและการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการ RSM ประกอบด้วย กลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติ โดยจะใช้หลักการเหล่านี้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดย RSM ประมวลผลจากผลของตัวแปรอิสระซึ่งอาจมีเพียงตัวเดียวหรือหลายตัวสำหรับการวิเคราะห์ของตัวแปรอิสระที่ได้จากผลการทดลองนั้นจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของผลตอบสนองในรูปแบบของพื้นผิวผลตอบสนอง โดยความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่ได้กับข้อมูลดิบแสดงดังสมการที่ 2-17

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-17)$$

เมื่อ y คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น

f คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบต่อผลตอบสนอง

x_1, x_2, \dots, x_n คือ ตัวแปรอิสระ ซึ่งจะถูกรเรียกว่า ตัวแปรธรรมชาติด้วย

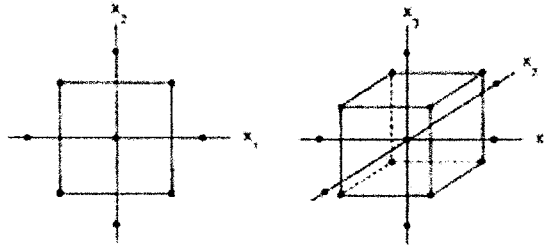
n คือ จำนวนของตัวแปรอิสระ

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ε เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดมาจากแหล่งต่างๆ ซึ่งไม่สามารถถูกรวบรวมเอาไว้ใน f ได้ ซึ่งแหล่งที่ว่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบ เช่น ค่าการวัดผิดพลาด โดยที่จะถูกคาดคะเนด้วยค่า ε มีการกระจายตัวด้วยค่าเฉลี่ยศูนย์และค่าความแปรปรวน

การออกแบบสำหรับพีดแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพีดแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพีดแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดรatic ของผลตอบสนอง วิธีการที่สนใจ คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป

CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี nc รัน ซึ่ง 2^k รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาวและ nc รันที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 2-9 แสดง CCD สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ ปัจจัย



รูปที่ 2-9 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$

ข้อดีของแผนการทดลอง CCD คือ เหมาะในการศึกษาสมการ โพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second-order model) กรณีการศึกษาเชิงปริมาณ (Quantitative factors) และมีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ (2^k Full factorial) และการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน นอกจากนี้ การออกแบบแบบ CCD สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial portion) และจุดศูนย์กลาง (Center point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการแบบเชิงเส้นตรง สำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของจุดศูนย์กลาง ถ้าสมการในรูปเส้นตรงไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial portion) จะได้สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 หรือ Quadratic model ข้อเสียของแผนการทดลอง CCD คือ ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factors)

1. การออกแบบการทดลอง โดยใช้เทคนิค RSM

1) กำหนดตัวแปรที่จะศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม กระบวนการทางเคมีและชีวเคมีสามารถรับผลกระทบจากกระบวนการต่างๆ มากมาย เพราะเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นในการเลือกตัวแปรบางตัวที่สร้างผลกระทบได้โดยตรงออกมา การคัดเลือกโดยการทดลองนั้นมีความสำคัญในการระบุตัวแปรอิสระ โดยหลังจากทำการระบุตัวแปรสำคัญต่างๆ แล้วจะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนารูปแบบขึ้นซึ่งจะสามารถระบุระดับความสำคัญของตัวแปรต่างๆ ขึ้นมาได้ การระบุความสำคัญของตัวแปรต่างๆ นั้นมีความสำคัญเพราะความสำเร็จของการหาจุดที่เหมาะสมนั้นเกี่ยวข้องกับสิ่งนี้โดยตรง ความผิดพลาดในการระบุระดับความสำคัญอาจส่งผลถึงความผิดพลาดในการระบุจุดที่เหมาะสมได้

2) กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะที่ใช้ในการทดลอง โดยวิธีการ CCD และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ที่ได้ออกแบบไว้เป็นตัวแปรเดิมทำได้โดยใช้สมการที่ 2-18

$$X = \left[\frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right] \quad (2-18)$$

โดยที่ $X =$ Coded Variables

$X =$ ตัวแปรอิสระ

$X_{\max} =$ ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

$X_{\min} =$ ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ

3) ทำการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้ออกแบบไว้

4) แสดงผลของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในรูปแบบของ Surface Plot โดยใช้โปรแกรม Regression analysis แบบจำลองที่ได้จะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังแสดงในสมการที่ 2-19

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left[\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right]_{i < j} \quad (2-19)$$

โดยที่ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือ สัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและแบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน ตามลำดับ

2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

วิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มแตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมาภายในแต่ละกลุ่มนั้นมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

3. แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบสนองที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่

ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด ($2E$) มีค่าน้อยที่สุด บางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

- 1) สร้างผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด โดยการพิชิตผลตอบสนอง
- 2) ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
- 3) นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบสนองเนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD มีการทดลองไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด Cubic model ได้ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีลักษณะทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบ Linear Model แบบ 2FI (Two-factor Interaction) และ แบบ Model Quadratic Model ดังแสดงในสมการที่ (2-20) ถึง (2-22)

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i \quad (2-20)$$

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \beta_{ij} X_i X_j \quad (2-21)$$

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^P \beta_i X_i + \sum_{i < j}^P \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^P \beta_{ij} X_i^2 \quad (2-22)$$

2.10.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1. ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ โดยพิจารณาจากค่า P-value
2. การทดสอบ Lack of fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือ แบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value
3. วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ซึ่งพิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้
 - 1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย คำนวณได้จากสมการที่ (2-23)

$$\text{Std. Dev.} = \sqrt{\text{MSE}} ; (\text{Mean Squared Error, MSE}) \quad (2-23)$$

- 2) R-squared (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้น จึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น คำนวณได้จากสมการที่ (2-24)

$$R^2 = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}, 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (2-24)$$

SSE คือ ค่าผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of Square for Error, SSE) ($SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$)

SST คือ ค่าความแปรปรวนทั้งหมด (Sum of Square Total, SST) ($SST = \sum (y_i - \bar{y})^2$)

3) Adjusted R-squared ($Adj-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of Freedom มาพิจารณาด้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2-25)

$$Adj - R^2 = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{SST/(n-1)}, 0 \leq Adj - R^2 \leq 1 \quad (2-25)$$

4) Predicted R-squared ($Pred-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือร้อยละที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย คำนวณได้จากสมการที่ (2-26)

$$Pred - R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2-26)$$

5) Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ คำนวณได้จากสมการที่ (2-27)

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1-h_{ii}} \right)^2 \quad (2-27)$$

2.10.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

เทคนิค RSM มีประโยชน์ที่สำคัญ คือ จำนวนชุดการทดลองที่ออกแบบโดยใช้ RSM นั้นมีจำนวนที่น้อยกว่า เพราะ RSM จะนำเสนอข้อมูลจำนวนมากจากการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งต่างจากการทดลองในแบบดั้งเดิมที่จะใช้จำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ และ RSM มีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบที่มีลักษณะเป็นผลกระทบภายใน (Interactive effect) จากตัวแปรอิสระ โดยเฉพาะกระบวนการทางชีวเคมี นอกจากนี้ โมเดลสมการอย่างง่ายของ RSM จะเพิ่มความเข้าใจต่อผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ เมื่อสังเกตสมการนั้นผ่านการทดลองต่างๆ จะพบว่า ข้อมูลของตัวแปรอิสระที่ได้กับผลตอบสนองมีความสอดคล้องกัน จึงกล่าวได้ว่า RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวเคมี

2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ RSM (ปรางศิริ ศรีสุภพชร, 2551)

Garcia *et al.* 2011 ศึกษาการดักจับก๊าซ CO₂ ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ในหอดูดซับแบบ Packed bed โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำการออกแบบการ

ทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO₂ (Y₁) และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ (Y₂) โดยปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความดันส่วนก๊าซ CO₂ (1-3 บาร์) และอุณหภูมิ (25-65 °C) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และยังพบว่าความดันส่วนก๊าซ CO₂ เป็นปัจจัยมีผลมากที่สุด เมื่อค่าความดันส่วนก๊าซ CO₂ มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ สูงขึ้นเช่นกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกลับส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการดักจับและความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ ลดลงซึ่งจะได้สภาวะเหมาะสมที่สุด คือที่อุณหภูมิ 25°C และความดันส่วนก๊าซ CO₂ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดักจับก๊าซ CO₂ เป็น 10.50 นาที และความสามารถในการดักจับก๊าซ CO₂ เป็น 3.96 โมล/กิโกลกรัม_{Adsorbent}

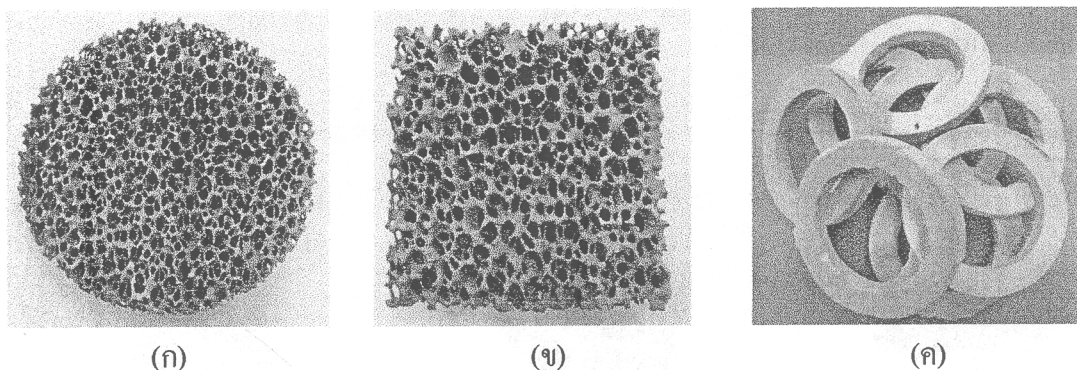
Tan *et al.* 2007 ศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองด้วย CCD เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียม Activated carbon ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสำหรับการกระตุ้น ระยะเวลาการกระตุ้น และอัตราส่วน KOH: char ต่อการดูดซับ Methyl Blue แต่ผู้ทำการวิจัยต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียม Activated carbon จึงนำไปสู่การวิเคราะห์การทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method of Process Optimization) พบว่าสภาวะเหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ คือ สภาวะอุณหภูมิประมาณ 816°C ระยะเวลาในการกระตุ้นประมาณ 1 ชั่วโมง และต้องใช้อัตราส่วน KOH : char เท่ากับ 3.9

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุตัวกลางที่ใช้เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเหล็กสำหรับนำไปใช้ในการทดลองกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมี 3 ชนิด คือ เซรามิกโฟมวงกลม เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยมและเซรามิกวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกโฟมวงกลม (ก) เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม (ข) และเซรามิกวงแหวน (ค) ที่ใช้ในการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

3.2 สารเคมี

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

- เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3)
- แมกนีเซียมไนเตรท เฮกซะไฮเดรท ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99.5%) จากบริษัท QREC
- ออกซาลิก เอซิด ($(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99.5%)
- เอทานอล 99.9% จากบริษัท AJAX

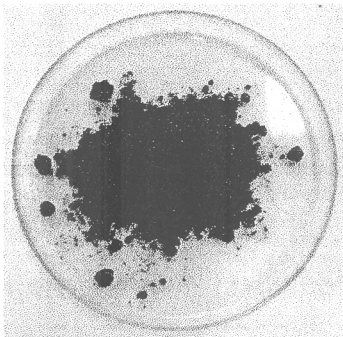
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก (Fe)

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- กรดไนตริก (HNO_3)
- สารละลายไฮดรอกซีลามีน ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$)
- สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}$)
- สารละลายฟีนานโทโรลีน ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- สารละลายสต็อกเหล็ก $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

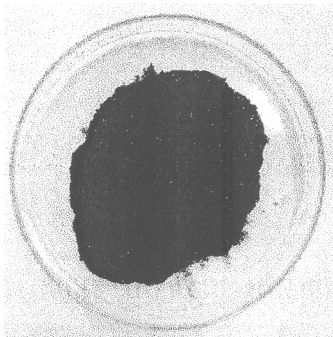
- 0.1 นอร์มอล โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4)
- น้ำกลั่น (Distillation water)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำสีสังเคราะห์

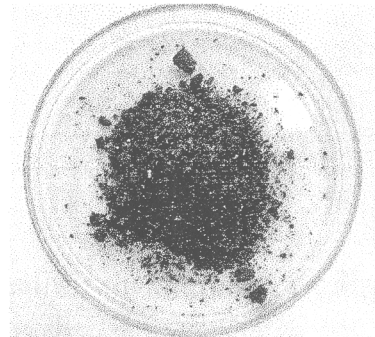
- สีย้อม Reactive red เป็นผงละเอียด สีแดง แสดงดังรูปที่ 3-2 (ก)
- สีย้อม Reactive blue เป็นผงละเอียด สีนํ้าเงิน แสดงดังรูปที่ 3-2 (ข)
- สีย้อม Malachite green เป็นผงเกล็ด สีเขียว แสดงดังรูปที่ 3-2 (ค)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สำหรับปรับ pH
- ไฮโดรคลอริก (HCl) สำหรับปรับ pH
- น้ำกลั่น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3-2 แสดงสีย้อมที่ใช้ในการทดลอง Reactive red (ก) Reactive blue (ข) และ Malachite green (ค)

3.3 อุปกรณ์

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- บีกเกอร์
- กระบอกตวง
- ถาด
- คีม
- พาราฟิน

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการกำจัดสีย้อม

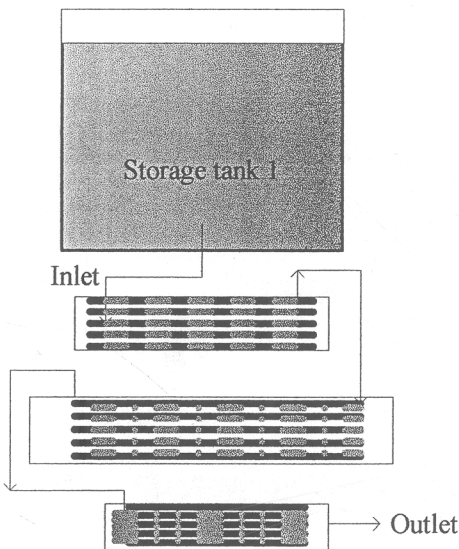
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในการกำจัดสีย้อมเป็นอุปกรณ์สำหรับการเกิดปฏิกิริยาการทำลายโครงสร้างสีย้อมในน้ำเสียที่ประกอบด้วย 3 ระบบ

- 1) ปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor) สำหรับศึกษาการกำจัดสีย้อมประกอบด้วย บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำสีสังเคราะห์ เครื่องกวน (Stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic bar)

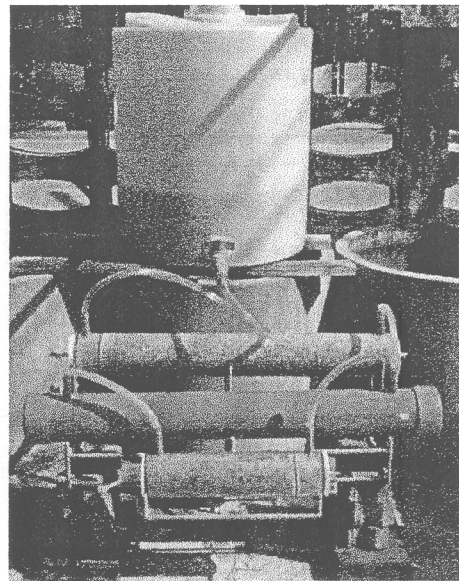
2) ชุดคอลัมน์บรรจุ (Packed column) ประกอบด้วย คอลัมน์ ตัวเร่งปฏิกิริยา ถังเก็บน้ำ ปั๊มและโรตารีมิเตอร์ โดยคอลัมน์ทำจากท่ออะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 85 เซนติเมตร เจาะรูสำหรับเก็บตัวอย่างที่ความสูง 30, 42, 60, 74 และ 90 เซนติเมตรภายในคอลัมน์บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคลือบบนเซรามิกชั้นวงกลมและสี่เหลี่ยมวางสลับกัน

3) ชุดคอลัมน์บรรจุ ขนาดชุมชน ประกอบด้วย ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร คอลัมน์ (ทำจากท่ออะคริลิก 2 คอลัมน์และท่อพีวีซี 1 คอลัมน์) วางต่างระดับกันและมีถังพักน้ำสำหรับใส่น้ำหลังการบำบัด แสดงดังรูปที่

3-3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-3 แสดงไดอะแกรมชุดคอลัมน์บรรจุขนาดชุมชน (ก) ชุดคอลัมน์บรรจุขนาดชุมชน (ข) สำหรับศึกษาการกำจัดสีข้อม

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

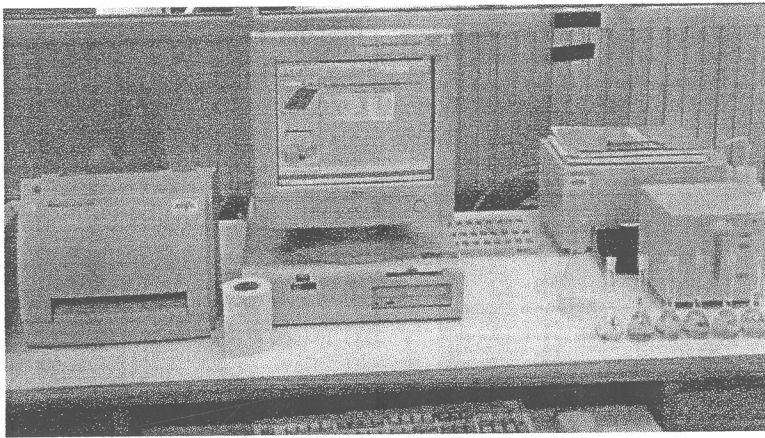
- ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 30 ซีซี
- นาฬิกาจับเวลา (Stop watch)
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- ปั๊มดูดจ่ายสาร (Peristaltic pump)

3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

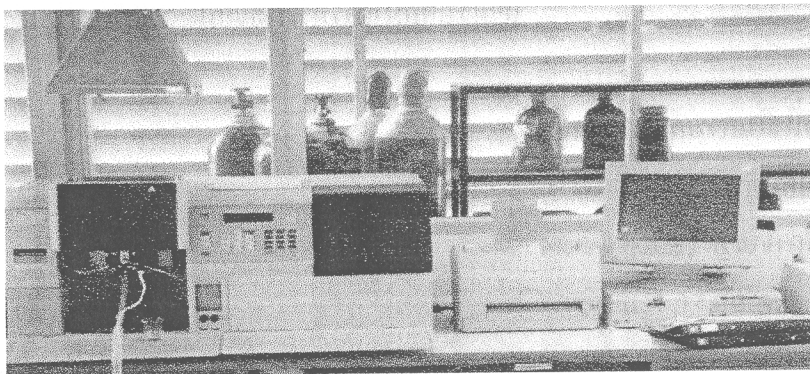
- เตาเผาอุณหภูมิสูง Muffle Furnaces Model ยี่ห้อ CARBOLITE ชนิด ELF 11/14B
- ตู้อบความร้อน (Natural oven) ผลิตโดย EYELA รุ่น NDO-600N
- เครื่องชั่ง (Weighing machine)
- เครื่องกวน (Stirrer) พร้อมแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic bar)

3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก

- เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (รุ่น Hewlett Packard 8453) ดังแสดงในรูปที่ 3-4
- เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-4 แสดงเครื่อง UV-vis Spectrophotometer รุ่น (HEWLETT PACKARD 8453) สำหรับใช้วิเคราะห์หาเหล็กเฟอรัส Fe^{2+} และความเข้มข้นสีในน้ำเสีย

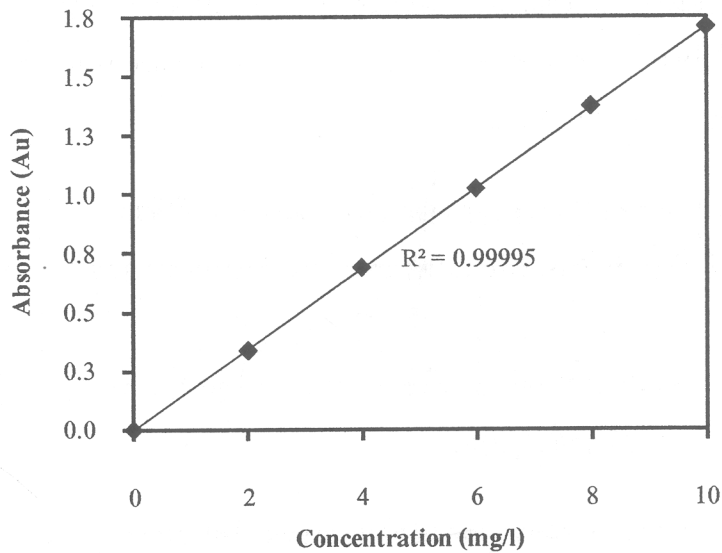


รูปที่ 3-5 แสดงเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) รุ่น (Perkin Elmer model AA Analyst) สำหรับใช้วิเคราะห์ปริมาณเหล็กรวม

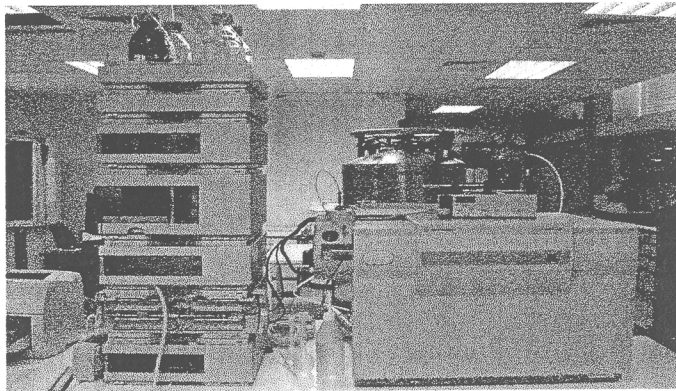
3.3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นสีของน้ำเสีย

- วิเคราะห์ความเข้มข้นสีของน้ำด้วยเครื่อง UV-vis Spectrophotometer ดังแสดงในรูปที่ 3-5 โดยการเทียบความเข้มข้นของสีที่อยู่ในน้ำกับค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ตาม Calibration curve ของสีนั้นๆ ตัวอย่าง Calibration curve ของสี Malachite green ดังแสดงในรูปที่ 3-6

- เครื่องวิเคราะห์ HPLC MS ดังแสดงในรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-6 Calibration curve ของสี Malachite green



รูปที่ 3-7 แสดงเครื่องวิเคราะห์ HPLC MS

3.4 การสร้างกราฟมาตรฐานของของสีย้อม

3.4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Reactive red

1. เตรียมน้ำสี Reactive red ความเข้มข้น 0, 10, 20, 40, 80, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 513 นาโนเมตร (โดยการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด)

3.4.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม reactive blue

1. เตรียมน้ำสี Reactive red ความเข้มข้น 0, 10, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร (โดยการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด)

3.4.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของสารละลายสีย้อม Malachite green

1. เตรียมน้ำสี Malachite green ความเข้มข้น 0, 10, 20, 40, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 617 นาโนเมตร (โดยการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด)

3.4.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำเสียจากชุมชนโทนสีเขียว

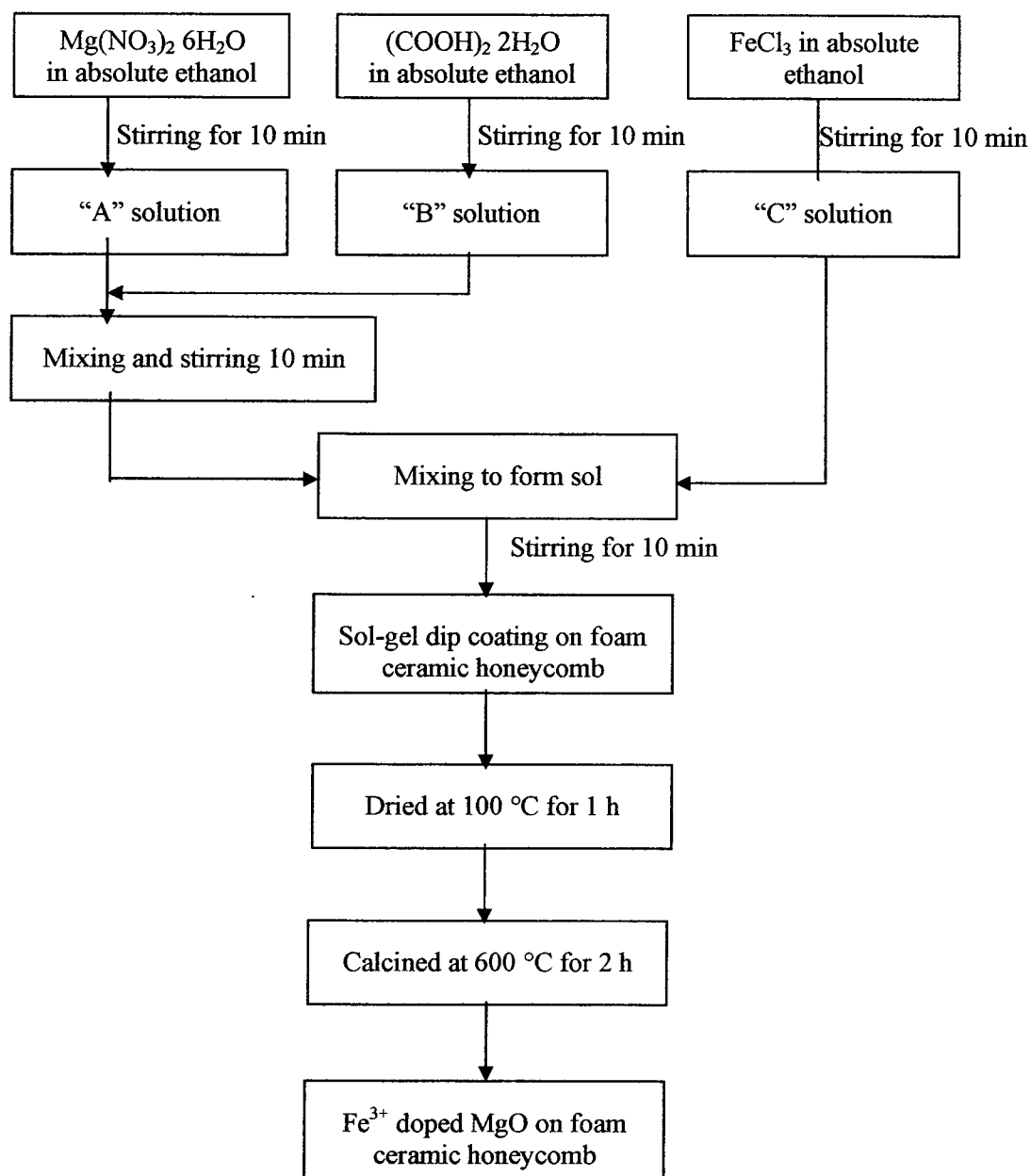
1. นำน้ำสีเริ่มต้นโทนสีเขียวจากชุมชนก่อนการบำบัดมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น 0, 5, 10, 20, 50 และ 100 เท่า
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร (โดยการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด)

3.4.5 การเตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำเสียจากชุมชนโทนสีม่วง

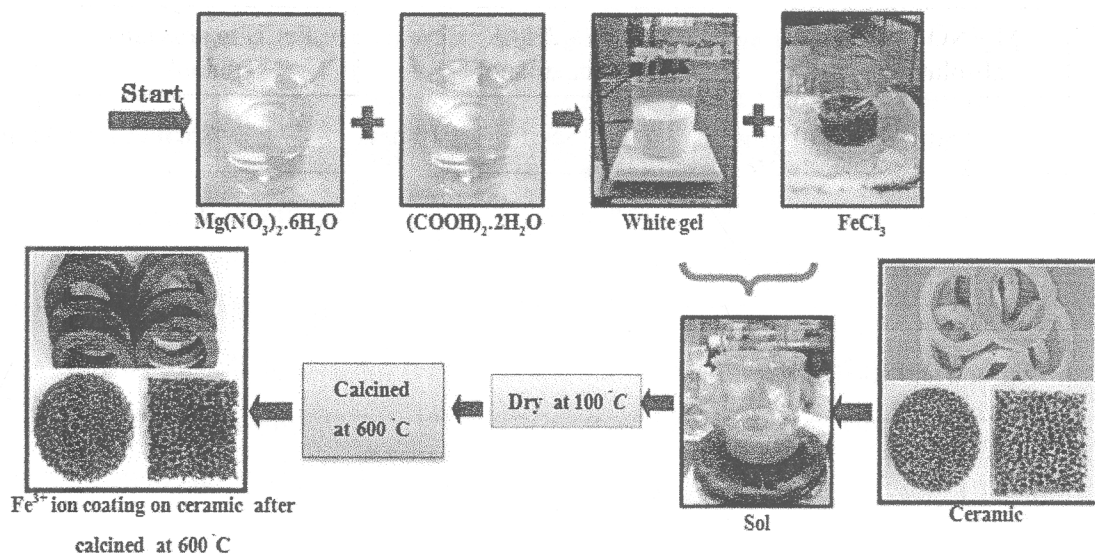
1. นำน้ำสีเริ่มต้นโทนสีม่วงจากชุมชนก่อนการบำบัดมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น 0, 5, 10, 20, 50 และ 100 เท่า
2. นำไปหาค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 557 นาโนเมตร (โดยการสแกนหาความยาวคลื่นสูงสุด)

3.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนด้วยเทคนิคโซล-เจล สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมและทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวกลางเซรามิกชนิด คือ เซรามิกโพรซันวงกลม เซรามิกโพรซันสี่เหลี่ยมและเซรามิกซันวงแหวน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาตามวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยของ Rakmak *et al.*, 2010 มีการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอลสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน คือ อัตราส่วนของสารละลายแมกนีเซียมไนเตรท สารละลายกรดออกซาลิก และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ (โมลต่อ โมล) ขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปแบบที่ 3-8 และ 3-9



รูปที่ 3-8 แผนภาพวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ด้วยวิธีโซล-เจล
สำหรับใช้ในกำจัดสีขุ่นในน้ำเสีย



รูปที่ 3-9 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนด้วยวิธีโซล-เจล

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไอออนด้วยวิธีโซล-เจล ทำได้โดยเตรียมสารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการผสมของสารละลายแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) สารละลายกรดออกซาลิก ($(COOH)_2 \cdot 2H_2O$) และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) ในตัวทำละลายเอทานอลที่อุณหภูมิห้องด้วยสัดส่วนโมลาร์ตามที่กำหนด ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ค่อยๆ เติมสารละลายกรดออกซาลิกลงในสารละลายแมกนีเซียมไนเตรตและกวนผสมสารละลายด้วย Sterrer ต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที ได้เป็นสารละลายที่เรียกว่าโซล (Sol)

2. เติมสารละลาย $FeCl_3$ ลงในสารผสมแล้วกวนผสมสารละลายด้วย Sterrer ต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที

3. ทำการเคลือบโซลลงบนตัวกลางเซรามิกด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในตู้อบ (Oven) เพื่อให้ตัวทำละลายระเหยออกจากฟิล์มที่เคลือบบนเซรามิก ทำซ้ำกัน 5 ครั้ง

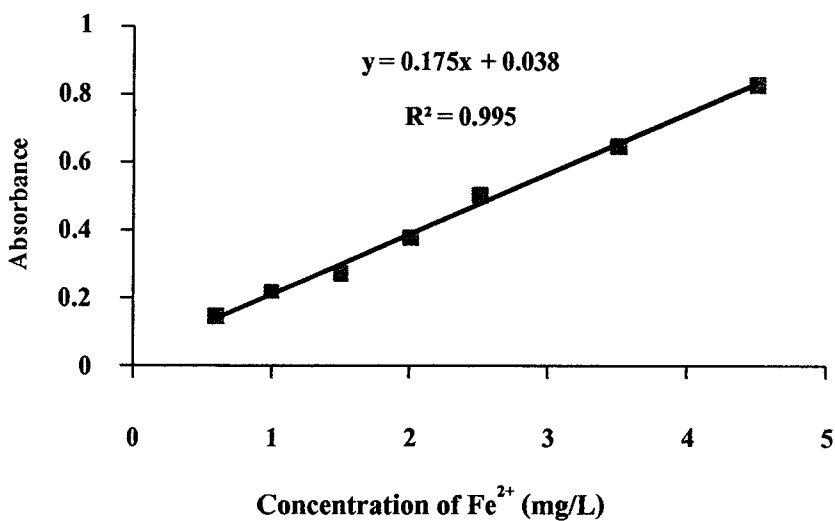
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ $600^\circ C$ เพื่อให้สารเคมีชนิดอื่นสลายตัวหมดคงเหลือเพียง Fe^{3+} เคลือบติดแน่นบนผิวเซรามิกที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะติดที่พื้นที่ผิวปริมาณมาก

3.5.1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก (อิสิรินทร์ มะหมัด, 2555)

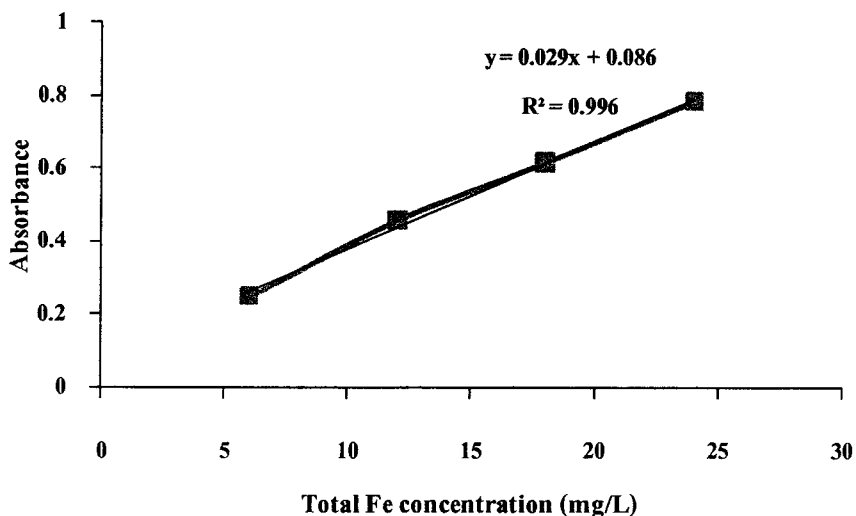
วิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายไอออนที่เคลือบอยู่บนเซรามิก โดยดึงตัวอย่างของสารละลายที่ได้จากการชะ (Leaching) เหล็กที่เคลือบผิวเซรามิกด้วยกรดเข้มข้น ดึงออกมาปริมาตร 100 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต บรรจุตัวอย่างลงขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL ซึ่งบรรจุด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซีเตตบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร และสารละลายฟีแนนโทรีน (Phenanthroline) 20 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้ปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเขย่าแล้ววางทิ้งไว้ 5 นาทีจนเกิดสีส้ม จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร (nm) ด้วย UV-vis

spectrophotometer โดยวิธีการของพีแวนโทรีน (APHA, 1985) เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายไอออน (Fe^{2+}) จากกราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 3-10 และทำการเก็บตัวอย่างของสารดูดซึม 50 μL เพื่อหาความเข้มข้นของเหล็กรวม (Total Fe) โดยทำการเติม 2% กรดไนตริก และปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น (DI) จากนั้นนำไปวัดค่าเหล็กรวม (Total Fe) โดยใช้ AAS และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กรวม (Total Fe) ดังรูปที่ 3-11 จากนั้นจึงคำนวณความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เวลาต่างๆ จากความเข้มข้นของเหล็กรวมและความเข้มข้นของ Fe^{2+} ดังแสดงในสมการที่ 3-1

$$\text{Fe}^{3+} = \text{Total Fe} - \text{Fe}^{2+} \quad (3-1)$$



รูปที่ 3-10 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็ก Fe^{2+} โดยใช้อุปกรณ์ UV-vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร



รูปที่ 3-11 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กรวม (Total Fe) โดยใช้อุปกรณ์ AAS

3.6 วิธีการทดลอง

การศึกษาการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน แบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนจากเหล็กชนิดเพอริคลอไรด์โดยเทคนิค โซล-เจล เคลือบบนวัสดุตัวกลาง การทดลองการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบทซ์ การสร้างชุดทดลองแบบคอลัมน์บรรจุและทดสอบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ การทดสอบระบบกับการกำจัดสีจากน้ำทิ้งจริงของกลุ่มผลิตผ้าบาติก การวิเคราะห์น้ำเสียด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS) และการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งรายละเอียดในแต่ละตอนมีดังนี้

3.6.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนด้วยเทคนิค โซล-เจล สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมและทำการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวกลางเซรามิกใช้อัตราส่วนของสารละลายแมกนีเซียมไนเตรท สารละลายกรดออกซาลิกและสารละลายเพอริคลอไรด์ แสดงดังตารางที่ 3-1 หลังจากสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก็นำตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบหาโครงสร้างของผลึกที่เคลือบบนผิวเซรามิกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) ทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวหลังเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) และการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เคลือบที่ผิวเซรามิกด้วยวิธีของพีแอนด์ไอ (APHA, 1985)

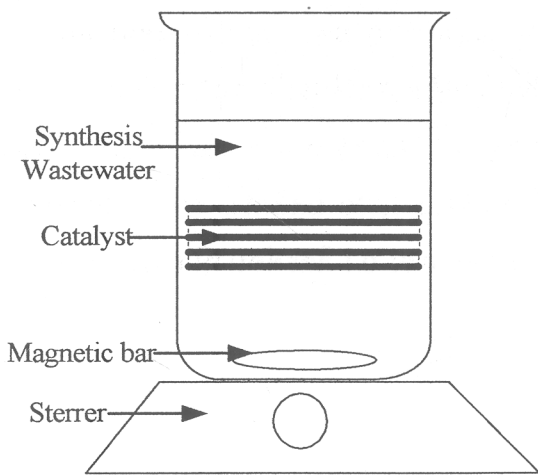
ตารางที่ 3-1 สภาวะการทดลองศึกษาอัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอลต่อการเคลือบติดบนวัสดุตัวกลางเซรามิก

การทดลองที่	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (mol/L)	$(COOH)_2 \cdot 2H_2O$ (mol/L)	$FeCl_3$ (mol/L)
1	0.1	0.1	0.1
2	1	1	1
3	1	1	1.25
4	1.25	1.25	3.75

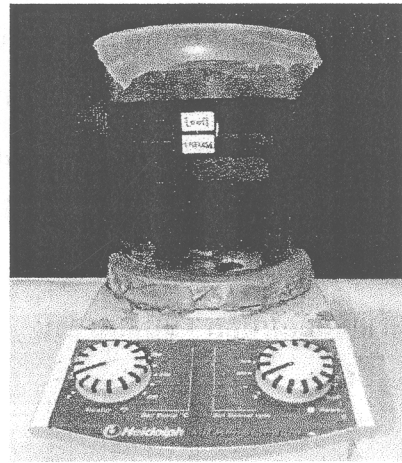
3.6.2 การทดลองกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบทซ์

1. การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

ทำการทดสอบโดยการกำจัดสีย้อมในน้ำสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากการนำสีย้อมผ้ามาละลายในน้ำตามความเข้มข้นตามที่ต้องการปรับ pH ให้มีสภาพเป็นกรดด้วย HCl ให้มีสภาพเป็นด่างด้วย NaOH จากนั้นทดลองในชุดทดลองแบบเบทซ์ (ใช้บีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร) ดังแสดงในรูปที่ 3-12 โดยใส่ชิ้นเซรามิกที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนจำนวน 2 ชิ้น (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 81 มิลลิกรัม) ลงไปในชุดทดลองแบบ Batch และกวนโดยใช้ Magnetic stirrer เพื่อให้ น้ำสีสังเคราะห์ไหลสัมผัสกับ Fe^{3+} ที่พื้นที่ผิวของเซรามิก เก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดที่เวลา 1, 5, 10, 20, 40, 80 และ 120 นาที โดยดึงปริมาณน้ำตัวอย่างในชุดการทดลองมาครั้งละ 15 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสีด้วยเครื่อง UV-vis spectrophotometer



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-12 ชุดการทดลองการกำจัดสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์แบบเบทซ์ในบีกเกอร์

2. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งสังเคราะห์

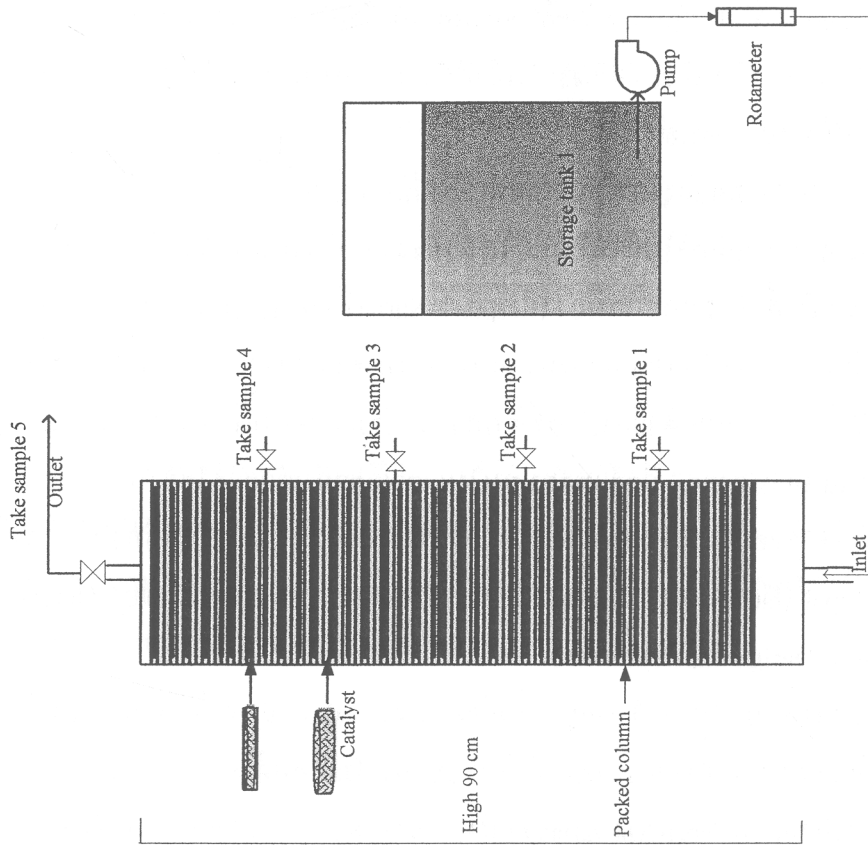
ตัวแปรที่ศึกษา คือ pH ของน้ำสีสังเคราะห์อยู่ในช่วง 5-8 ความเข้มข้นสีในน้ำ 0.01-0.2 กรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำเสีย 40.5-162 มิลลิกรัมต่อลิตร ศึกษาการฟื้นฟูสภาพด้วยการเติมออกซิเจน และการศึกษาการใช้ซ้ำของ ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้บำบัดสีแล้วมาใช้ในการกำจัดสีซ้ำ และนำตัวอย่างน้ำสีสังเคราะห์ที่ผ่านการกำจัดสีด้วยชุดการทดลองแบบเบทซ์ที่เวลา 0, 5, 10, 20, 40 และ 80 นาที ไปวัดความเข้มข้นของสีในน้ำด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เทียบความเข้มสีที่ได้กับ Calibration curve และคำนวณหาประสิทธิภาพ (%Efficiency) ของระบบ โดยใช้สมการที่ (3-2)

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (3-2)$$

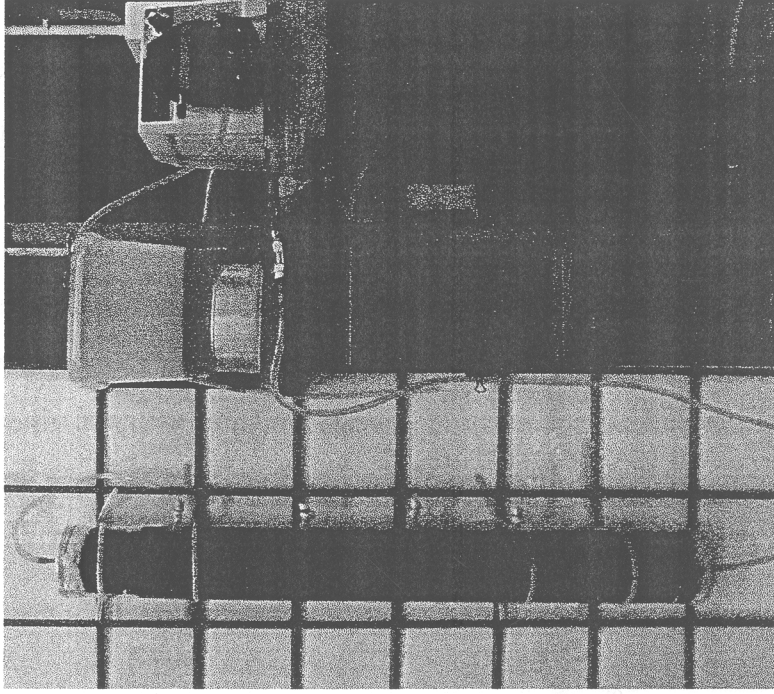
เมื่อ %Efficiency คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำสีของระบบ กำหนดให้ C_1 คือ ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อยู่ในน้ำสีสังเคราะห์ที่สภาวะเริ่มต้น และ C_2 คือ ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อยู่ในน้ำสีสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดที่เวลาใดๆ

3.6.3 การออกแบบและสร้างชุดทดลองแบบคอลัมน์บรรจุ

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างคอลัมน์บรรจุสำหรับใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย โดยคอลัมน์สร้างขึ้นจากท่ออะคริลิกทรงกระบอกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร สูง 90 เซนติเมตร เจาะรูด้านข้างของคอลัมน์ที่มีความสูง 30, 42, 60, 74 และ 90 เซนติเมตร ใช้สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำสีที่จุดต่างๆ ด้านในคอลัมน์บรรจุตัวกลางเซรามิกที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไอออนชนิดเซรามิก โฟมรูปลวงกลมและสี่เหลี่ยมวางสลับกัน และใช้ปั๊มคูดของเหลวสำหรับป้อนน้ำสีจากถังเก็บ 1 (Storage tank 1) เข้าสู่ระบบทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ ค่อยๆ ไหลแบบบังคับผ่านสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาสวนทางจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนและไหลออกบริเวณท่อเก็บตัวอย่าง ไดอะแกรมชุดคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบและคอลัมน์บรรจุแบบไหลต่อเนื่องสำหรับศึกษาการกำจัดสีย้อมดั่งแสดงในรูปที่ 3-13 การทดลองกำจัดสีย้อมจากน้ำสีสังเคราะห์มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ ชนิดของสี ได้แก่ Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ที่พีเอช 5-8 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม ความเข้มข้นของน้ำสีอยู่ในช่วง 0.01-0.10 กรัมต่อลิตร และอัตราการไหลของน้ำสี 0.01-0.1 ลิตรต่อนาที การดำเนินการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-13 แสดงโต๊ะแกมชุดคอลัมน์บรรจุขนาดต้นแบบ (ก) คอลัมน์บรรจุแบบไหลต่อเนื่อง (ข) สำหรับศึกษาการกำจัดดีไฮม

การดำเนินการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมน้ำสีสังเคราะห์

การเตรียมน้ำสีสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สี Reactive red ที่ความเข้มข้น 20, 32, 50, 67 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร สี Malachite green ที่ความเข้มข้น 4, 7, 12, 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และ สี Reactive Blue ที่ความเข้มข้น 4, 7, 12, 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย

2. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบ Packed column ในการกำจัดสีข้อม

ทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ Packed column จากด้านล่างคอลัมน์ไหลขึ้นสู่ด้านบนสัมผัสตัวเร่งปฏิกิริยาที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่เวลาต่างๆ ณ จุดเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3-13 โดยใช้ขวดเก็บตัวอย่างขนาด 20 มิลลิลิตรรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดตรงจุดเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียหลังการบำบัดเทียบกับ Calibration curve จากเครื่อง UV-vis spectrophotometer คำนวณหาประสิทธิภาพ (%Efficiency) จากสมการที่ (3-2) และเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Retention time)

$$\% \text{Efficiency} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (3-2)$$

เมื่อ %Efficiency คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำสีของระบบแบบต่อเนื่อง กำหนดให้ C_i คือ ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำสีสังเคราะห์ที่ท่อทางเข้าของระบบ และ C_o คือ ความเข้มข้นของสีในน้ำสีที่ท่อทางออกของระบบ

3. การออกแบบการทดลองโดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบสนอง

การออกแบบการทดลองในการกำจัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบ Packed column ดำเนินการ โดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบการทดลองหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาภาวะที่เหมาะสมเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ Input (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Output (Response) ที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม Design Expert software

ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการกำจัดสีในน้ำเสียด้วยระบบ Packed column แสดงดังต่อไปนี้

1) กำหนดตัวแปรและช่วงของการดำเนินการที่ศึกษา ประกอบด้วย

1.1) ตัวแปรอิสระ (Independent variable) ประกอบด้วย 3 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์ 10-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม และอัตราการไหลของน้ำสี

สังเคราะห์ 0.01-0.1 ลิตรต่อนาที กำหนดให้ x แทนตัวแปรอิสระ ระดับขอบเขตและสัญลักษณ์แทนการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-2

1.2) ตัวแปรตอบสนอง (Response) มี 1 ตัวแปร คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละการทดลอง กำหนดให้ y เป็นตัวแปรตาม

ตารางที่ 3-2 แสดงช่วงของตัวแปรดำเนินการและสัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรอิสระ	ระดับต่ำสุด (lower limit)	ระดับสูงสุด (upper limit)	สัญลักษณ์
ความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์ (mg/L)			
Reactive red	10	80	x_1
Malachite green	4	20	
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (mg)	432.5	1,730	x_2
อัตราการไหลของน้ำสีสังเคราะห์ (L/min)	0.01	0.1	x_3

2) กำหนดรหัส (Code) ของช่วงดำเนินการออกแบบการทดลองของตัวแปรอิสระที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการออกแบบภาวะที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) และทำการแปลงค่ารหัสตัวแปรอิสระ (Coded variables) ผลการออกแบบการทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 3-3

3) แปลงรหัส (Decode) จากการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิคของ Central Composite Design (CCD) ในตารางที่ 3-3 ทำการแปลงค่าตัวแปรให้เป็นค่าดำเนินการของตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในแต่ละตัวในการดำเนินการทดลอง เพื่อหาค่าตัวแปรตอบสนองของกระบวนการ โดยการแปลงค่าตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3-3 ทำการทดลองซ้ำค่ากลาง (ความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์ 10-100 และ 4-20 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำสีสังเคราะห์ 0.01-0.1 ลิตรต่อนาทีและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม ของแต่ละตัวแปรที่เกิดจากการออกแบบเป็น 3 ซ้ำ เพื่อทดสอบเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระเนื่องจากการออกแบบด้วยเทคนิค RSM จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรอิสระตัวละ 3 ค่า ซึ่งข้อมูลยังไม่เพียงพอในการแสดงค่ากราฟ 2 มิติ จึงมีการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมให้ได้ผลของค่าตัวแปรอิสระ ตัวแปรละ 4 ค่า เพื่อได้แนวโน้มของตัวแปรนั้นสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3-3 ผลการแสดงผลตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร

Run no.	x_1	x_2	x_3	Response
1	1	-1	-1	y = %Color Removal Efficiency
2	$-\alpha$	0	0	
3	α	0	0	
4	0	0	α	
5	1	1	-1	
6	0	α	0	
7	0	0	0	
8	0	0	0	
9	0	$-\alpha$	0	
10	-1	1	1	
11	0	0	0	
12	1	1	1	
13	1	-1	1	
14	0	0	$-\alpha$	
15	-1	1	-1	
16	-1	-1	-1	
17	-1	-1	1	
18	-1	0	0	
19	0	0	1	
20	0	-1	0	

ตารางที่ 3-4 ผลการแปลงรหัสตัวแปรสำหรับศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อม Reactive red

Run no.	Concentration (mg/L)	Amount of Catalyst (mg)	Flow rate of Wastewater (ml/min)	Response
1	68	692	56	%Color Removal Efficiency
2	20	1,084	110	
3	80	1,084	110	
4	50	1,084	200	
5	68	1,470.5	56	
6	50	1,730	110	
7	50	1,084	110	
8	50	1,084	110	
9	50	432.5	110	
10	32	1,470.5	164	
11	50	1,084	110	
12	67	1,470.5	164	
13	67	692	164	
14	50	1,084	20	
15	32	1,470.5	56	
16	32	692	56	
17	32	692	164	
18	32	1,084	110	
19	50	1,084	164	
20	50	692	110	

ตารางที่ 3-5 ผลการแปลงรหัสตัวแปรสำหรับการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อม Malachite green

Run no.	concentration (mg/l)	Amount of catalyst (g)	Flow rate of Wastewater (ml/min)	Response
1	68	692	56	%Color Removal Efficiency
2	20	1,084	110	
3	80	1,084	110	
4	50	1,084	200	
5	68	1,470.5	56	
6	50	1,730	110	
7	50	1,084	110	
8	50	1,084	110	
9	50	692	110	
10	32	1,470.5	164	
11	50	1,084	110	
12	68	1,470.5	164	
13	68	692	164	
14	50	1,385	20	
15	32	1,470.5	56	
16	32	692	56	
17	32	692	164	
18	32	1,084	110	
19	50	1,084	164	
20	50	692	110	

4. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหาภาวะที่เหมาะสม

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดำเนินการ โดย Regression analysis ใช้โปรแกรม Design Expert โดยมีรายละเอียดในการดำเนินการดังนี้

1) ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วย ANOVA แบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นโค้ง (Quadratic equation) ดังสมการที่ (3-4)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \left(\sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j \right)_{i < j} \quad (3-3)$$

เมื่อ β_0 , β_i , β_{ii} และ β_{ij} คือสัมประสิทธิ์ถดถอยทั้งแบบเชิงเส้น แบบกำลังสอง และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อนตามลำดับ

2) การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA (Analysis of variance) เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมานั้นภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน

3) หากกราฟพื้นผิว (Surface plot) ของการทดลองเพื่อแสดงผลของตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม กราฟพื้นผิวได้จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง โดยการเอาผลความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปรที่ทำการศึกษานำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวเพื่อนำไปหาภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4) หาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ ด้วยโปรแกรม Design Expert software

3.6.4 การทดสอบกำจัดสีจากน้ำทิ้งของกลุ่มผลิตผ้าบาติก

การกำจัดสีจากน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมของชุมชนผลิตผ้าบาติก ซึ่งใช้สีย้อมที่มีจำหน่ายในท้องตลาดในการย้อมผ้า โทนสีม่วง สีเขียว และสีฟ้า ทดสอบสอปกำจัดสีด้วยชุดคอลัมน์บรรจุขนาดชุมชน ติดตั้งที่ชุมชน กลุ่มทักย้อมเมืองทองบาติก อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ซึ่งเป็นกลุ่มผลิตผ้าบาติกในอำเภอหาดใหญ่ ซึ่งมีการใช้สีย้อมในการย้อมผ้าบาติก มีการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมปริมาณสูง มีการเจือจางน้ำทิ้งด้วยน้ำก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ทางเข้าและทางออกของ Packed column เพื่อทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง UV-vis spectrophotometer เทียบกับ Calibration

curve และคำนวณหาประสิทธิภาพ (%Efficiency) ของสีในน้ำเสียจากการผลิตผ้าบาติกที่หายไปจากสมการที่ (3-3)

3.6.5 การวิเคราะห์น้ำเสียด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometry (LC-MS)

LC-MS เป็นเทคนิคขั้นสูงสำหรับการวิเคราะห์สารที่มีความซับซ้อน 1 ตัวอย่างจะถูกแยกให้บริสุทธิ์ด้วยคอลัมน์ (Column) โดยเทคนิคที่เรียกว่าโครมาโทกราฟีชนิดของเหลว (Liquid Chromatography, LC) จากนั้นสารบริสุทธิ์จะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer) การแยกสารด้วย LC เป็นการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของเหลว ซึ่งจะถูกปั๊มเข้าสู่คอลัมน์ที่ภายในบรรจุด้วยอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคคงที่ (Stationary phase) การแยกเกิดขึ้นในคอลัมน์ได้เนื่องจากสารแต่ละชนิดเคลื่อนที่ผ่านวัฏภาคคงที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน แมสสเปกโตรเมตรี (Mass Spectrometry, MS) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนด้วยวิธีต่างๆ เช่น Electro Spray ionization, (ESI) ที่สามารถทำให้เกิดไอออนได้โดยสารไม่สลายตัว จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และระเหยได้ยาก LC-MS มีข้อดีเหนือกว่าเทคนิคอื่น โดยเฉพาะความไวและความจำเพาะเจาะจงในการตรวจวิเคราะห์สาร โดยเป็นการศึกษาในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สารที่มีขี้ผึ้งและน้ำหนักโมเลกุลสูงได้เป็นอย่างดี

3.6.6 ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

ประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนกับการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า การใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ และปฏิกิริยาเฟนตัน คิดการกำจัดสีในน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ เป็นระยะเวลา 1 ปี คิดค่าใช้จ่ายตั้งต้น (Initial cost) ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากสารเคมี ค่าวัสดุตัวกลางและค่าใช้จ่ายจากไฟฟ้าในการสังเคราะห์ปฏิกิริยา โดยไม่รวมหน่วยของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้และค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการ (Operating cost)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองกำจัดสีด้วยน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนที่ผ่านการเคลือบบนวัสดุตัวกลางเซรามิก โฟมวงกลม เซรามิก โฟมสี่เหลี่ยม และเซรามิกวงแหวน โดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 6 ตอน คือ

1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณสารตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอล โดยการใช้เทคนิค โซลเจล (Sol-gel) ในการเคลือบสารไอออนบนวัสดุตัวกลาง

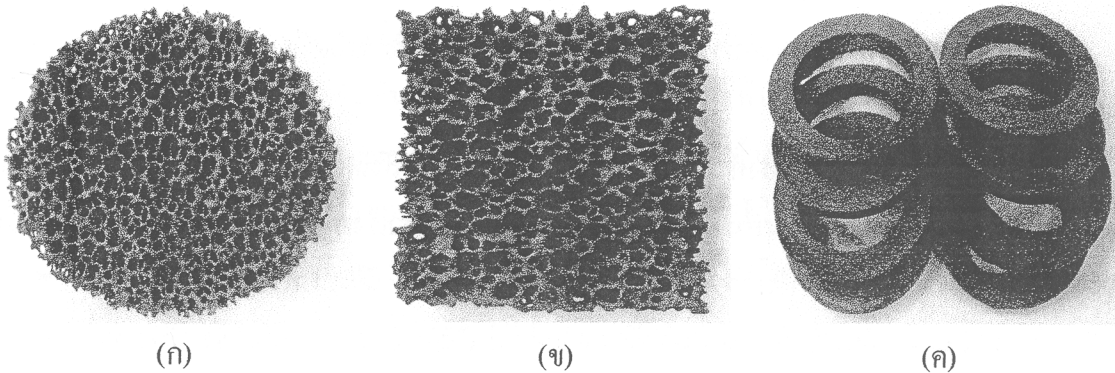
2) การทดลองกำจัดสีด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนในชุดการทดลองแบบแบทช์ (Batch reactor)

3) การสร้างชุดทดลองสำหรับกำจัดสีด้วยน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)

สามารถแสดงผลและวิเคราะห์ผลโดยนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม (Color removal efficiency, %)

4.1 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบบนตัวกลางชนิดเซรามิก โฟมด้วยวิธี โซล-เจล ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอลสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน คือ อัตราส่วนของสารละลายแมกนีเซียมไนเตรท สารละลายกรดออกซาลิก และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ (โมลต่อโมล) เป็น 1.25:1.25:3.75 ได้สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาลักษณะของเหลว จุ่มเซรามิกในตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เพื่อไล่ตัวทำละลาย ขั้นตอนสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบติดบนเซรามิกและให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุด โดยเซรามิก โฟมวงกลมและสี่เหลี่ยมจะมีพื้นที่ผิวให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะติดมากกว่าแบบวงแหวน แสดงดังรูปที่ 4-1



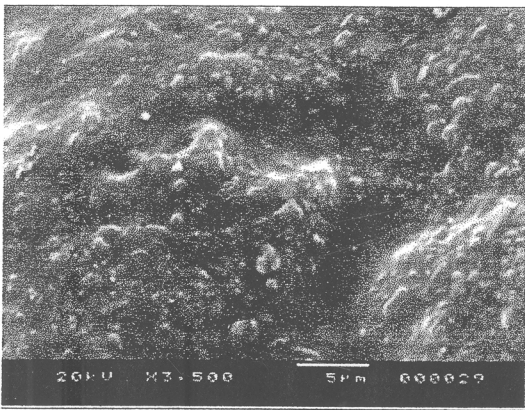
รูปที่ 4-1 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนที่ได้บนตัวกลางเซรามิก โฟมวงกลม (ก) เซรามิก โฟมสี่เหลี่ยม (ข) และเซรามิกวงแหวน (ค) ที่ใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสีย

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน

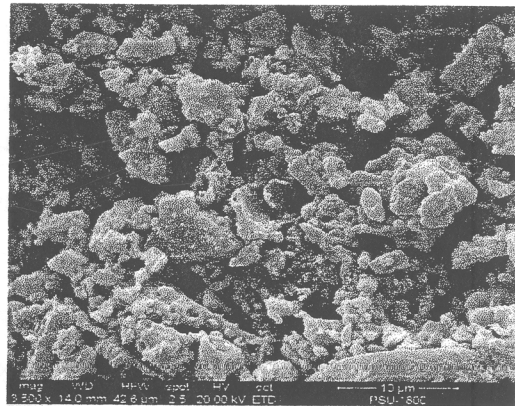
นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่างด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฟอร์รัส (Fe^{3+}) ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก ด้วยวิธีการของพีแนน โทรลีน (APHA, 1985) สามารถอธิบายผล ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่อนำเซรามิกก่อนและหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ไอรอน ไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่า เซรามิกก่อนเคลือบมีลักษณะผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ก) และเซรามิกหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ไอรอนที่สม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวกลางชนิดเซรามิก เนื่องจากพื้นผิวของเซรามิกมีลักษณะขรุขระทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ไอรอนสามารถยึดเกาะบนเซรามิกโดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ข)



(ก)

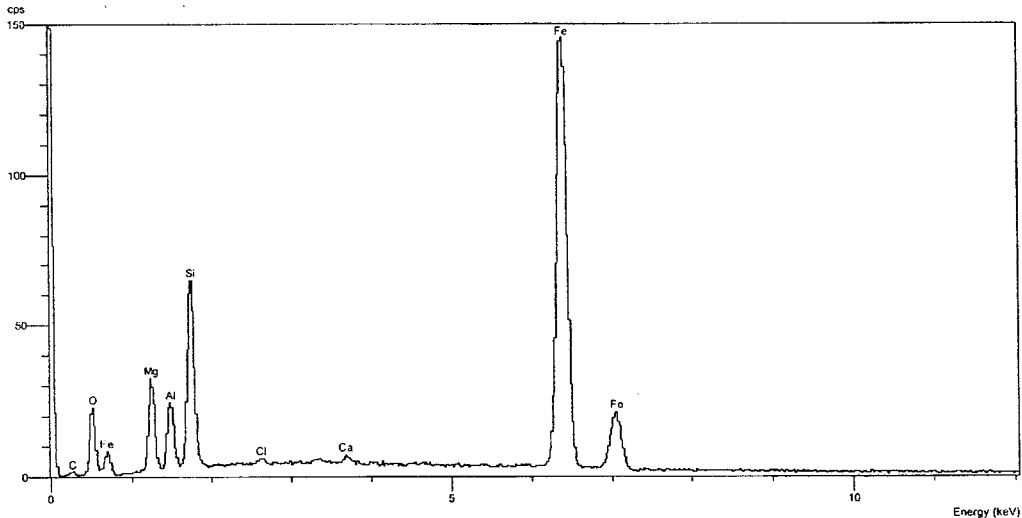


(ข)

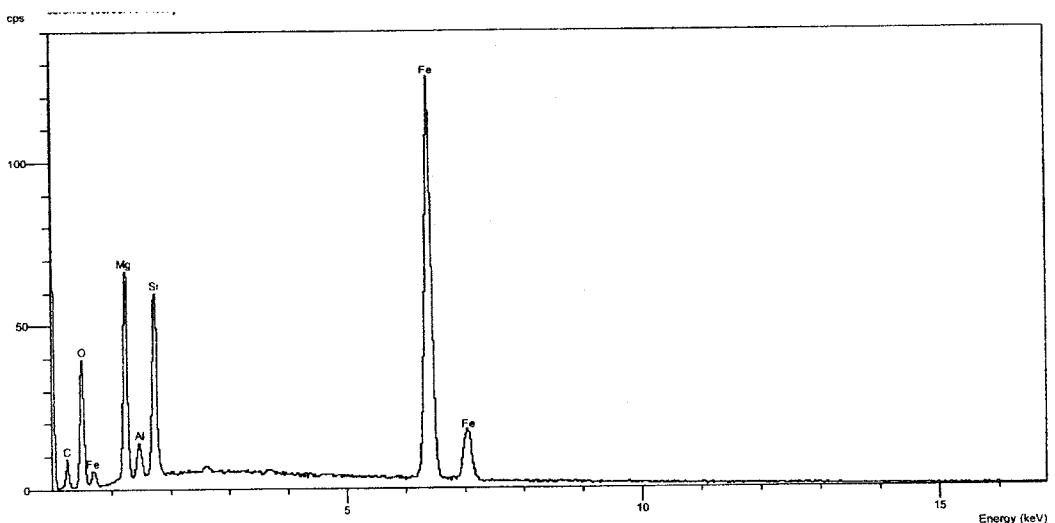
รูปที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวเซรามิกโพรงกลมก่อนเคลือบ (ก) และหลังเคลือบ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

2. การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยเครื่องวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ (EDX)

ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเซรามิกหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ไอรอนด้วยวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของเซรามิกก่อนใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย และหลังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียนาน 6 เดือน พบว่าประกอบไปด้วยธาตุ C, O, Mg, Al, Si, Fe และ Cl ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าหลังใช้งานพบธาตุ Fe มีปริมาณลดลง เนื่องจากเหล็กที่เคลือบบนเซรามิกหลุดคร่อนไปเล็กน้อย หลังจากตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน



รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเซรามิก โฟมแบบวงกลมเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด
ไอรอนก่อน ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยเครื่อง EDX



รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเซรามิก โฟมแบบวงกลมเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด
ไอรอนหลัง ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยเครื่อง EDX

3. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไอรอนที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวเซรามิกทำได้โดยดึงตัวอย่างของสารละลายที่ได้จากการชะ (Leaching) ไอรอนที่เคลือบผิวเซรามิกด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น นำตัวอย่างสารละลายมาทดสอบด้วยวิธีการของพีแชน โทรลีน (APHA, 1985) วัดค่าเหล็กรวม (Total Fe) โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กรวม จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดต่างๆ ก่อนและหลังการใช้งาน มีปริมาณ Total Fe, Fe^{2+} และ Fe^{3+} ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณ Fe, Fe²⁺ และ Fe³⁺ ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดต่างๆ ก่อนและหลังใช้งาน

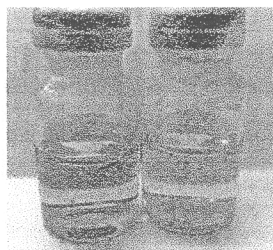
วัสดุตัวกลาง	เหล็กเฟอร์รัส (Fe ²⁺) (mg Fe ²⁺ /ชิ้นเซรามิก)		เหล็กเฟอร์ริก (Fe ³⁺) (mg Fe ³⁺ /ชิ้นเซรามิก)		เหล็กรวม (Total Fe) (mg F/ชิ้นเซรามิก)	
	ก่อนใช้	หลังใช้	ก่อนใช้	หลังใช้	ก่อนใช้	หลังใช้
เซรามิกโฟมวงกลม Ø10×2 cm (10ppi)	13	11	46	39.1	59	50.1
เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม 8×8×2 cm (10ppi)	11	9.3	40.5	36.1	51.5	45.4
เซรามิกวงแหวน Surface area 28.3 cm ²	5.1	5	16.3	16	21.4	21

4.2 การทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบทซ์

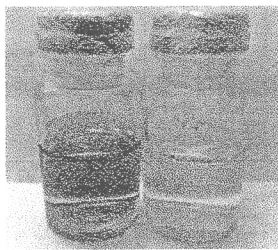
การศึกษาทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม ในระบบชุดการทดลองแบบเบทซ์ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ pH ของน้ำสีสังเคราะห์ ความเข้มข้นสีข้อมในน้ำเสีย จำนวนชิ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติมออกซิเจน และทำการศึกษาการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดแสดงดังรูปที่ 4-5 คำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียจากสมการที่ (4-1) และสามารถแสดงผลการทดลองดังต่อไปนี้

$$\% \text{ Color Removal} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100 \quad (4-1)$$

เมื่อ %Efficiency คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำสีของระบบ กำหนดให้ C₁ คือ ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อยู่ในน้ำสีสังเคราะห์ที่สถานะเริ่มต้น และ C₂ คือ ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) หลังการบำบัด



(ก)

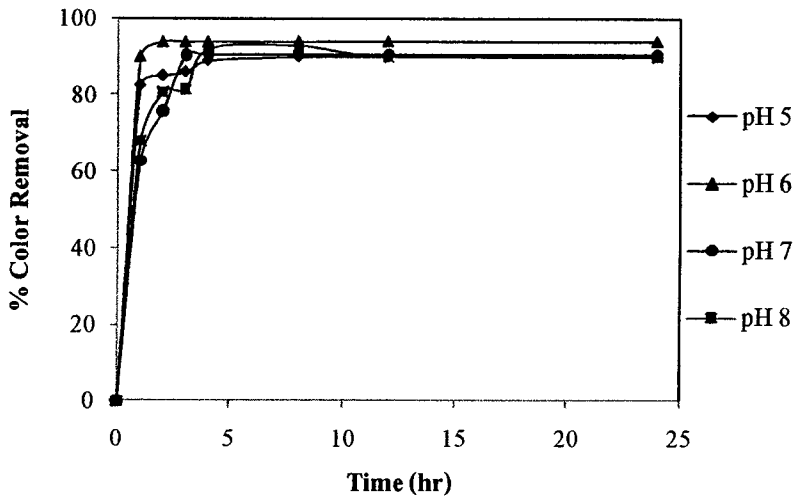


(ข)

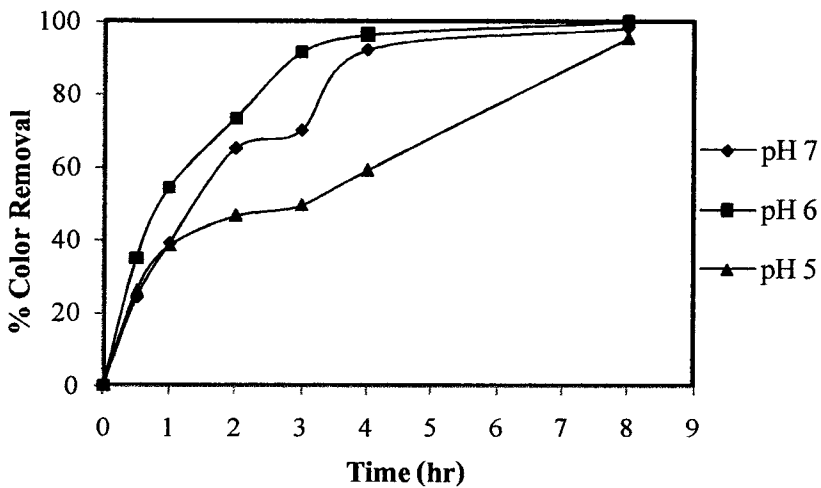
รูปที่ 4-5 แสดงตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนด้วยชุดทดลองแบบเบทซ์ด้วยสีย้อม Reactive red (ก) Malachite green (ข)

1. ผลของ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์

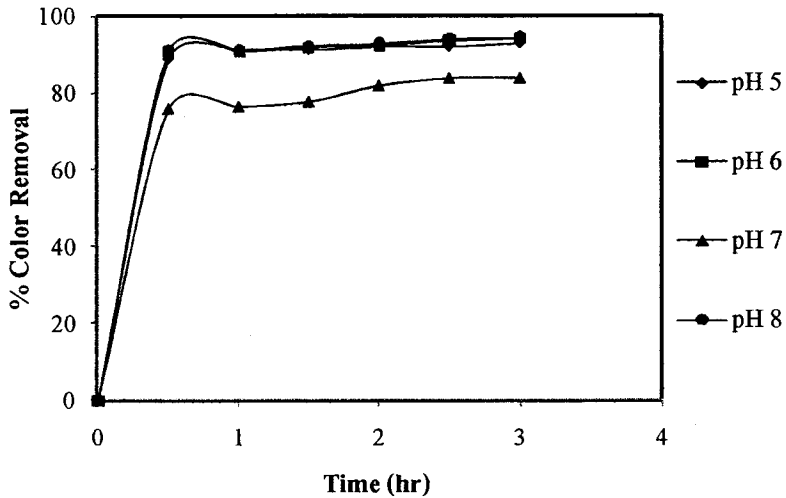
การศึกษาผลของ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนในชุดการทดลองแบบเบทซ์ ทำได้โดยการใช้สีย้อม 3 ชนิด คือ Reactive red, Reactive blue และ Malachite green กำหนดภาวะที่ทำการศึกษา คือ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และความเร็วรอบในการกวน 200 rpm ทำการปรับค่าตัวแปรที่ pH 5, 6, 7 และ 8 พบว่า ที่ค่า pH 6 สีย้อม Reactive red มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุด 96% ที่เวลา 2 ชั่วโมงและมีประสิทธิภาพคงที่ตลอดเวลาทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-6 สำหรับสีย้อม Reactive blue ที่ค่า pH ของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงกว่า pH อื่นๆ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุด 98% เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4-7 และสีย้อม Malachite green ที่ pH ของน้ำเสียเริ่มต้น 5, 6 และ 8 มีประสิทธิภาพสูงสุด 99% แต่จะพบว่าที่ pH 6 มีประสิทธิภาพ 90% ตั้งแต่ 0.5 ชั่วโมงแรกของการดำเนินการ ดังแสดงในรูปที่ 4-8 เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ในระบบการทดลองแบบเบทซ์ พบว่า ที่ pH 6 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับทุกสีย้อม และพบว่าสามารถกำจัดสีย้อม Malachite green ได้เร็วที่สุดใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4-6 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive red 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์



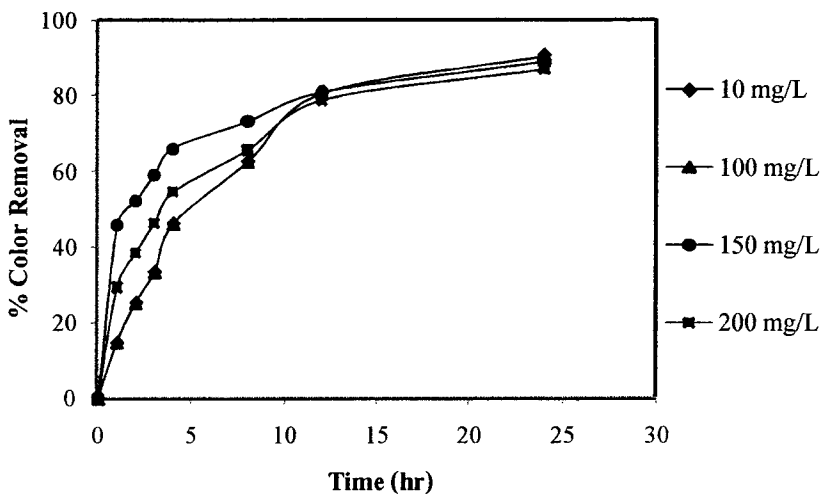
รูปที่ 4-7 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive blue 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์



รูปที่ 4-8 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Malachite green 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

2. ผลของความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

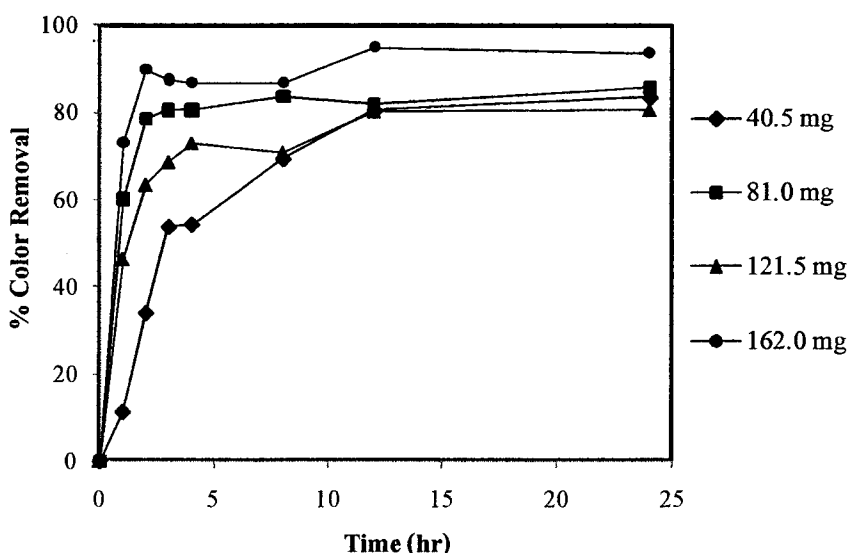
ผลของความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive red ในชุดการทดลองแบบแบทช์ที่ pH 6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ความเข้มข้นสีย้อม 10, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นสีย้อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีโมเลกุลของสีย้อมมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของสีย้อมจะเคลื่อนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปได้ง่าย ซึ่งจากการทดลอง พบว่า น้ำสีย้อมที่มีความเข้มข้น 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูง 95% ดังแสดงในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ผลของความเข้มข้นของสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive red ที่ pH 6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตรดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

3. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Reactive red ของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบแบทช์ ที่ pH 6 ความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 40.5, 81, 121.5 และ 162 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนชิ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีมากขึ้นและมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสีในน้ำกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างสีที่อยู่ในน้ำถูกทำลายได้มากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 162 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด 94% ดังแสดงในรูปที่ 4-10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรณวิภา, 2547

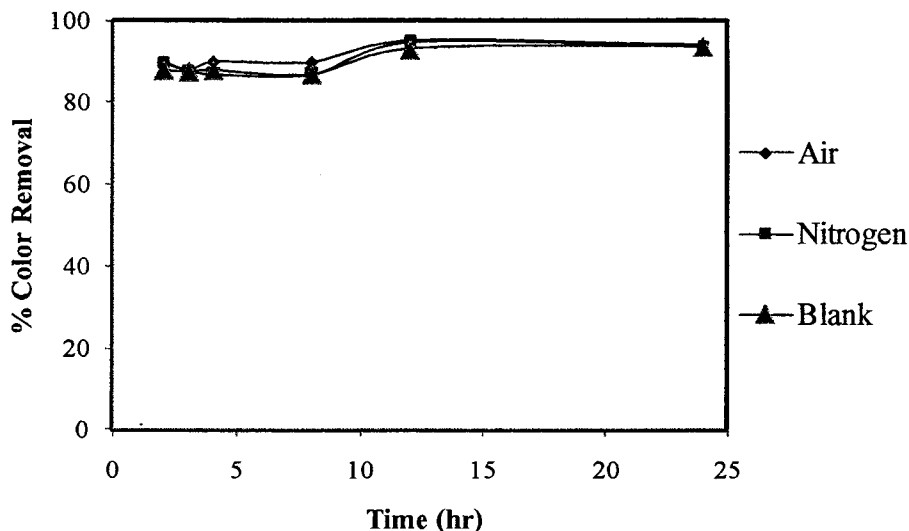


รูปที่ 4-10 ผลของจำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 6 ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

4. ผลของการเติมอากาศต่อการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของการเติมออกซิเจน (O_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบแบทช์ ดำเนินการที่ pH 6 ความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ทำการศึกษาผลของออกซิเจนต่อการฟื้นฟูสภาพและใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเติมแก๊สออกซิเจน (O_2) อย่างต่อเนื่องให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมแก๊สไนโตรเจน (N_2) เพื่อไม่ให้ออกซิเจนเข้าสู่ระบบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัด O_2 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า การเติมอากาศเข้าระบบและการเติมแก๊สไนโตรเจน ไม่ส่งผลที่แตกต่างกันของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียเนื่องจากปริมาณ O_2 ที่อยู่ในน้ำเสียมีปริมาณเพียงพอสำหรับการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เนื่องจากตัวเร่งชนิดไอออนที่เคลือบ

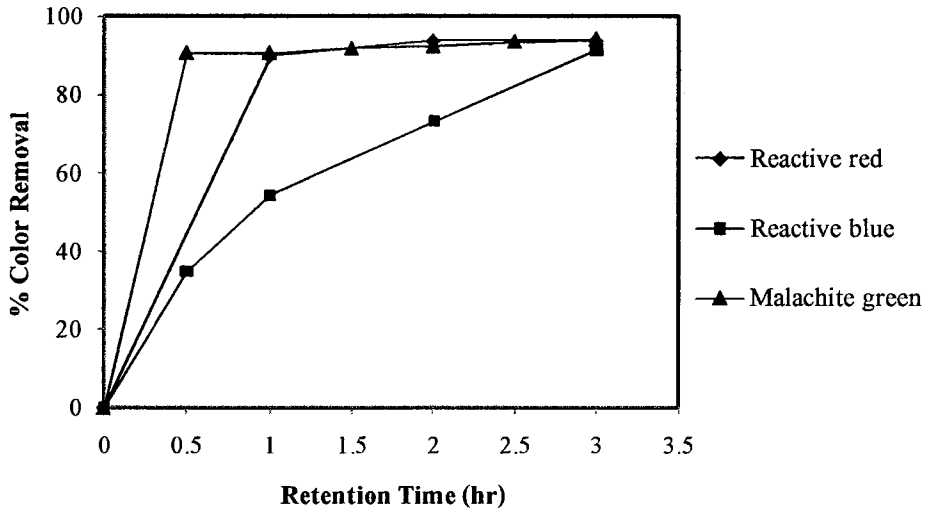
บนเซรามิกจะรีดิวซ์เฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ด้วย O_2 ในน้ำ สลับไปมาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ผลการเติมอากาศและไนโตรเจนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ผลของการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

5. ผลของเวลาการทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย (Reaction time)

การศึกษาผลของเวลาการทำปฏิกิริยากำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการดำเนินการในชุดการทดลองแบบแบทช์ ที่ pH 6 ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 162 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร จากการทดลอง พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรณวิภา, 2547 และงานวิจัยของ Deng *et al*, 2000 นอกจากนั้นเวลาของการทำปฏิกิริยาการทำลายโครงสร้างของสีย้อมในน้ำเสียที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 94% ของน้ำสีย้อมสังเคราะห์ชนิด Malachite green, Reactive red และ Reactive blue ใช้เวลา 0.5, 1, และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าสีย้อมชนิด Malachite green ใช้เวลาในการกำจัดน้อยที่สุด เนื่องจากโครงสร้างสีย้อมของ Malachite green มีความซับซ้อนน้อยกว่าสีย้อมอีก 2 ชนิด คือ Reactive red และ Reactive blue ดังแสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยา (Reaction time) การกำจัดสีข้อมในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ ที่ความเข้มข้นสีข้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา 162 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

6. ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียต่อค่า COD ของน้ำ

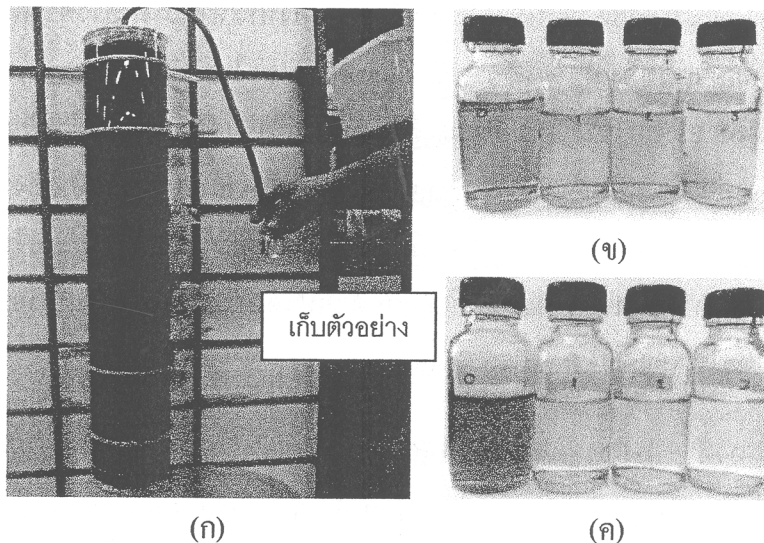
ผลของการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนต่อค่าความต้องการออกซิเจนของน้ำทิ้งที่หาได้โดยวิธีการทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ของน้ำในการกำจัดสีข้อมของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบแบทช์ ที่ pH 6 สีข้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ความเข้มข้นสีข้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร พบว่า ค่า COD ของน้ำหลังการบำบัดลดลงดังแสดงในตารางที่ 4-2 แสดงว่า ค่าความสกปรกของน้ำลดลงหรือน้ำเสียหลังการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น น้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งกำหนดว่าน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมต้องมีค่าต่ำกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีเพียงน้ำกลั่นและสีข้อมไม่มีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกอื่นๆ

ตารางที่ 4-2 COD ของน้ำเสียชนิดต่างๆ ก่อนและหลังบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน

ชนิดสี	ค่า COD ของน้ำเสีย		% COD Removal
	ก่อนการบำบัด (mg/L)	หลังการบำบัด (mg/L)	
Reactive red	52	37	28.84
Reactive blue	68	40	41.17
Malachite green	61	49	19.67

4.3 ผลการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous reactor) ชนิดคอลัมน์บรรจุสำหรับใช้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย โดยคอลัมน์สร้างขึ้นจากท่ออะคริลิกทรงกระบอกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร สูง 90 เซนติเมตร เจาะรูด้านข้างของคอลัมน์ที่มีความสูง 30, 42, 60, 78 และ 90 เซนติเมตร สำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ภายในคอลัมน์บรรจุตัวเร่งเฮอร์มาทิกที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอนซินิกเฮอร์มาทิกโพรพิลวงกลมและสี่เหลี่ยมเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เนื่องจากเฮอร์มาทิกโพรพิลวงกลมมีพื้นที่สูงกว่าแบบสี่เหลี่ยม ใช้ปั๊มป้อนน้ำเสียจากถังเก็บ 1 (Storage tank 1) เข้าสู่ระบบทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ เพื่อให้น้ำเสียค่อยๆ ไหลแบบบังคับผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เกิดการสัมผัสพื้นผิวดังกล่าวอย่างทั่วถึง และไหลออกบริเวณท่อเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4-13 การทดลองกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียสังเคราะห์มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 ชิ้น ความเข้มข้นของน้ำเสีย Reactive red 10-80 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ Malachite green 4-20 มิลลิกรัมต่อลิตรและอัตราการไหลของน้ำเสีย 0.01-0.1 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4-13 แสดงวิธีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียชนิดสีย้อม (ก) ตัวอย่างน้ำเสีย Reactive red (ข) และตัวอย่างน้ำเสีย Malachite green (ค) ที่เวลา 0, 1, 2, 3 นาที

เทคนิค Response Surface Methodology (RSM) เป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติ และเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบการทดลองและการหาภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่งเทคนิค RSM ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองและตัวแปรอิสระ แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) เป็นการออกแบบการทดลองทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจาก Center ของการออกแบบเท่ากันและทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, 1, α) งานวิจัยนี้จึงนำ

เทคนิค RSM แบบ CCD มาใช้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

ผลการทดลองการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องของสีย้อม 2 ชนิด คือ Reactive red และ Malachite green ตามการออกแบบการทดลองและสถานะที่ศึกษาแสดงได้ดังนี้

1. ผลการบำบัดสีย้อมชนิด Reactive red

จากการศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ในการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-3 และทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-24 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทำให้ได้ผลของค่าประสิทธิภาพ (Response) การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$\% \text{ Color Removal Efficiency} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \quad (4-2)$$

เมื่อ % Color Removal Efficiency คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียของระบบ กำหนดให้ C_0 คือ ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนไหลเข้าสู่ชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง และ C_1 คือ ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ประกอบไปด้วยความเข้มข้นสีย้อมในน้ำเสีย จำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสีย ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้ Multiple Regression Analysis

ตารางที่ 4-3 แสดงตัวแปรอิสระและผลตอบสนองของการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

Run no.	Independence variable			% Efficiency Color Removal
	Concentration (x_1) (mg/L)	Amount of Catalyst (x_2) (piece)	Wastewater Flow rate (x_3) (ml/min)	
1	68	16.08	56.49	33.60
2	20	25.00	110.00	40.90
3	80	25.00	110.00	31.84
4	50	25.00	200.00	22.09
5	68	33.92	56.49	51.23

Run no.	Independence variable			% Efficiency Color Removal
	Concentration (x_1) (mg/L)	Amount of Catalyst (x_2) (piece)	Wastewater Flow rate (x_3) (ml/min)	
6	50	1,730	11	48.98
7	50	1,084	110	35.86
8	50	1,084	110	35.86
9	50	432.5	110	21.60
10	32	1470.5	164	37.18
11	50	1,084	110	34.00
12	68	1470.5	164	35.41
13	68	692	164	24.92
14	50	1,084	20	47.40
15	32	1470.5	56	55.58
16	32	692	56	35.58
17	32	692	164	23.40
18	32	1,084	110	36.66
19	50	1,084	164	28.04
20	50	692	110	29.14
21	10	1,730	10	84.85
22	32	1,730	10	84.81
23	50	1,730	10	84.62
24	67	1,730	10	84.69

จากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องที่แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียดกับตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค RSM ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แบบสมการ Quadratic model ดังแสดงในสมการที่ (4-3)

$$y = 24.71 - 0.07X_1 + 0.02X_2 - 0.04X_3 - 0.000008X_2^2 + 0.0004X_3^2 \quad (4-3)$$

เมื่อ y = ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย (ร้อยละ)

X_1 = ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

X_2 = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิกรัม)

X_3 = อัตราการไหลของน้ำเสีย (มิลลิเมตรต่อนาที)

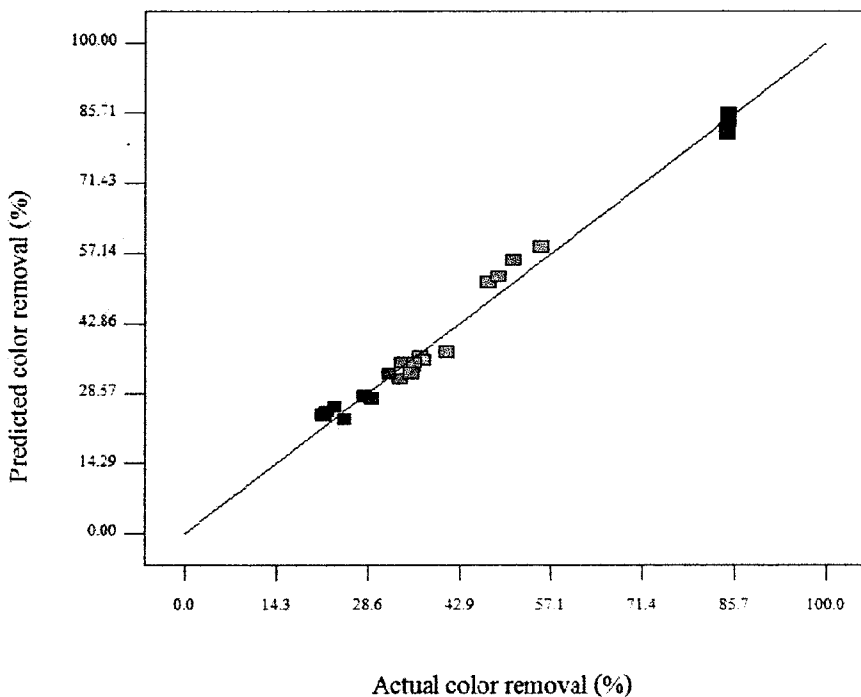
จากสมการ 4-3 แสดงผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร ความเข้มข้นของสีข้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำเสีย และผลการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการด้วยวิธี ANOVA โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย สังกเคราะห์ด้วยวิธี ANOVA

Source of Variation	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Model	9713.75	1618.96	203.43	< 0.0001	significant
X_1	35.93	35.93	4.51	0.0486	significant
X_2	1237.66	1237.66	155.52	< 0.0001	significant
X_3	1055.59	1055.59	132.64	< 0.0001	significant
X_2X_3	186.13	186.13	23.39	0.0002	significant
X_2^2	26.36	26.36	3.31	0.0864	
X_3^3	24.94	24.94	3.13	0.0946	significant
Residual	135.2913	7.96			
Lack of Fit	132.9849	8.87	7.69	0.1210	Not significant
Pure Error	2.3064	1.15			
Correlation Total	9849.043				
R^2	0.9862	Adjusted R^2	0.9814		
Predicted R^2	0.9655	Adeq. Precision	40.997		

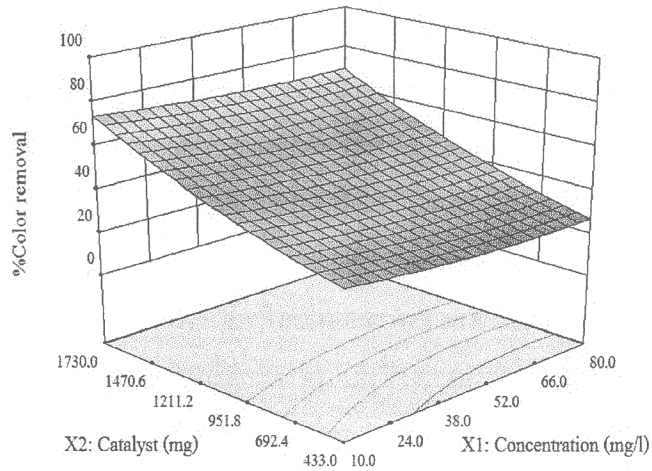
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตาราง จะเห็นว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป (Korbahiti *et al.*, 2008) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) มีค่า $R^2 = 0.9862$ ซึ่งเป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการ

การประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวคือ ค่า R^2 ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh *et al.*, 2007) โดยค่า R^2 ที่สมควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า R^2_{adj} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้มีส่วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่า R^2_{adj} เท่ากับ 0.9814 ค่า R^2_{adj} มีค่าต่ำกว่า R^2 เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากผลการทดลองซึ่งแตกต่างกันเพียงร้อยละ 0.486 โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4-14

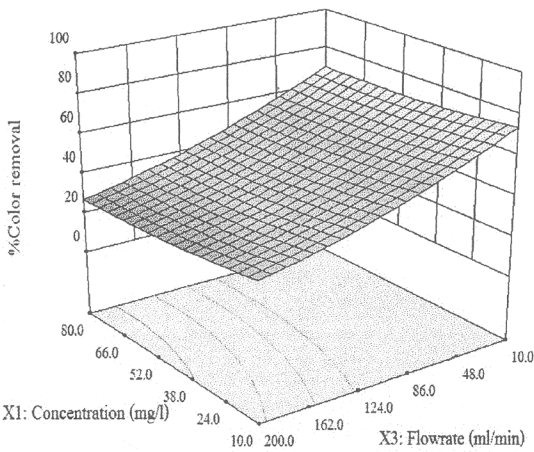


รูปที่ 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive ในน้ำเสียด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ที่ได้จากการคำนวณและจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (4-3)

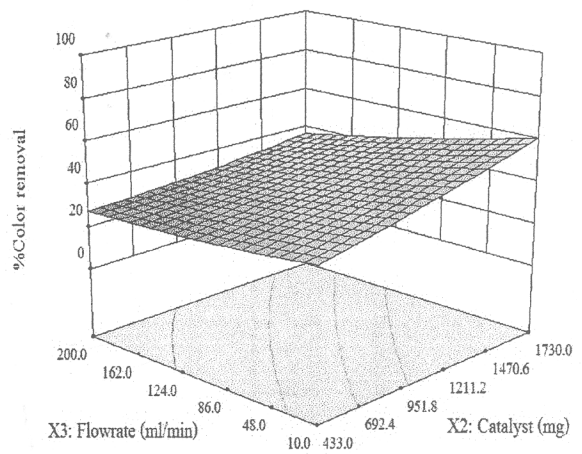
จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย สามารถนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียในรูปกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟ 3 มิติ (3D plot) แสดงดังรูปที่ 4-15 โดยกราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาใช้ในการอธิบายและระบุผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวในด้านปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างตัวแปร ซึ่งสามารถแสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของน้ำสีย้อม (x_1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (x_2) และอัตราการไหลของน้ำ (x_3) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4-15 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของ x_1 และ x_2 (ก) ระหว่างผลของ x_1 และ x_3 (ข) และ ระหว่างผลของ x_2, x_3 (ค) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

1) ผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปรทำให้ได้กราฟ 3 มิติจำนวน 3 รูป ดังแสดงในรูปที่ 4-15 (ก) ที่แสดงผลของความเข้มข้นสีย้อมและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย ที่อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 56.49 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า x_1 ในสมการ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นลบ เนื่องจากความเข้มข้นสีย้อมที่เพิ่มขึ้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่าเดิมทำให้

ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสีย้อมคงที่ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-15 (ข) พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าเทอม x_2 ในสมการที่ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นบวกประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนชิ้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลสีย้อมทำปฏิกิริยากับสีย้อมก็มีมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้น

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเข้มข้นของสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญแสดงได้ในเทอมของ x_2x_3 ดังแสดงในรูปของกราฟพื้นผิวด้านบน 3 มิติ ในรูปที่ 4-15 (ค) อิทธิพลซึ่งมีสัมประสิทธิ์หน้าเทอม x_2x_3 ในสมการ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นลบ ส่งผลให้เมื่ออัตราการไหลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของระบบจะลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และ Dang *et al*, 2000

2) ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อม Reactive red ในน้ำเสีย

จากสมการแบบจำลองจากสมการที่ 4-4 สามารถนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายค่าและหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software อันจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัดได้สูงสุดและสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของสีย้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่า สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม (Optimum condition) ที่ได้จากการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ที่ความเข้มข้นสีย้อม 20-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม อัตราการไหลของน้ำเสีย 20-200 มิลลิตรต่อนาที ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุด 84.85% โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5 พบว่า ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำที่ได้จากการทดลองสูงกว่าค่าที่คาดการณ์ 4.6% ไว้ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 4-5 แสดงภาวะที่เหมาะสมและการทำนายผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียด้วยคอลัมน์บรรจุแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน

Concentration (X_1) (mg/L)	Amount of Catalyst (X_2) (mg)	Wastewater Flow rate (X_3)(ml/min)	% Color Removal Efficiency	
X_1	X_2	X_3	Predict	Experiment
68	1,730	10	81.15	84.85

2. สีย้อมชนิด Malachite green

จากการศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ในการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-6 และทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทำให้ได้ผลของค่าประสิทธิภาพ (Response) การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-4 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ประกอบไปด้วยความเข้มข้นสีย้อมในน้ำเสีย จำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสีย ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้ Multiple Regression Analysis

ตารางที่ 4-6 แสดงตัวแปรอิสระและผลตอบสนองของการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

Run no.	Independence variable			% Efficiency Color Removal
	Concentration (x_1) (mg/L)	Amount of Catalyst (x_2) (piece)	Wastewater Flow rate (x_3) (ml/min)	
1	17	692	161	42.02
2	12	1,084	105	70.45
3	7	1,084	49	89.10
4	7	1,084	161	33.95
5	17	1,084	49	77.35
6	12	1,084	200	60.05
7	12	432.5	105	46.96
8	12	1,084	105	70.45
9	7	1470.5	49	90.27
10	20	1,084	105	62.08
11	4	1,084	105	82.00
12	12	1,730	105	82.98
13	12	1,084	105	70.45
14	17	1470.5	49	84.96
15	17	1470.5	161	68.00
16	12	1,084	10	96.85
17	7	1470.5	161	61.47
18	12	1,084	48	79.02
19	7	1,084	105	79
20	12	1,084	105	60.48

จากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ที่แสดงในตารางที่ 4-6 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียกับตัวแปรที่ทำการศึกษาดูด้วยเทคนิค RSM ทำให้ได้แบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์แบบสมการ Quadratic model ดังแสดงในสมการที่ (4-4)

$$y = 100.47 - 0.003X_2 - 0.52X_3 + 0.000X_2X_3 \quad (4-4)$$

เมื่อ y = ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย (ร้อยละ)

X_1 = ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

X_2 = จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา (ชิ้น)

X_3 = อัตราการไหลของน้ำเสีย (มิลลิลิตรต่อนาที)

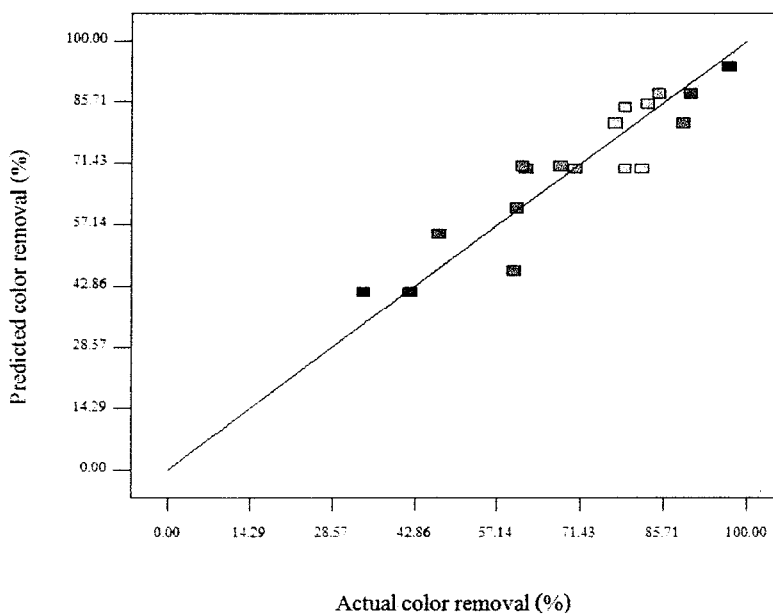
จากสมการ 4-4 แสดงผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร ความเข้มข้นของสีข้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำเสีย และผลการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการด้วยวิธี ANOVA โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

Source of Variation	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Model	4366.97	1455.66	28.33	Prob > F	significant
X_2	1195.52	1195.52	23.26	< 0.0001	significant
X_3	2911.53	2911.53	56.66	0.0002	significant
X_2X_3	251.87	251.87	4.90	< 0.0001	significant
Residual	822.24	51.39			
Lack of Fit	822.24	58.73	9.03	0.1042	
Pure Error	0	0			

Source of Variation	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value Prob > F	Remarks
Correlation Total	5189.20				
R^2	0.8415	Adjusted R^2	0.8118		
Predicted R^2	0.7414	Adequate Precision	16.40		

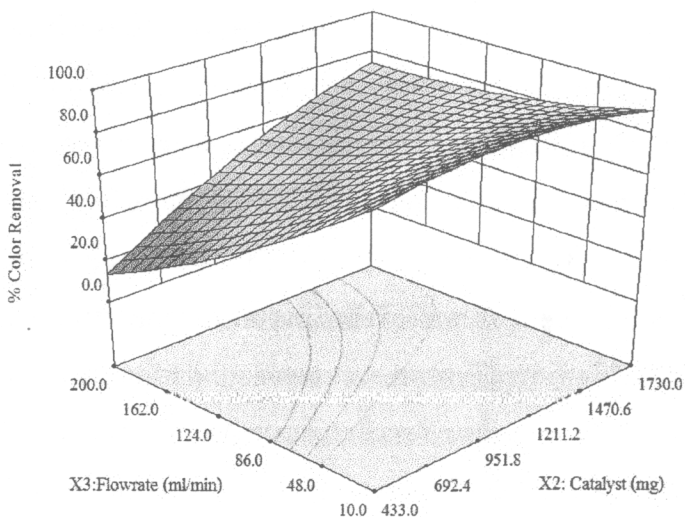
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังตารางที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย ภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตารางดังกล่าว จะเห็นว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป (Korbahiti *et al.*, 2008) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) $R^2 = 0.8415$ ค่า R^2 ซึ่งเป็นค่าสถิติที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาดที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการการประมาณและเป็นค่าที่มีความสำคัญในการพิจารณาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ กล่าวคือ ค่า R^2 ควรมากกว่า 0.75 จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Seyedeh *et al.*, 2007) โดยค่า R^2 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ส่วนค่า R^2_{adj} หากมีค่าใกล้เคียงกับค่า R^2 แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมด โดยจากการทดลองพบว่า R^2 เท่ากับ 0.8418 R^2_{adj} มีค่าต่ำกว่า R^2 เนื่องจากได้จากการปรับค่าผลการทดลองและค่าจากแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กันมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อเปรียบเทียบค่าการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย ของแบบจำลองสมการเส้นโค้งกับค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งแตกต่างกันเพียงร้อยละ 3.5 เท่านั้น โดยแสดงได้ดังรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Basic ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 4-4

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย สามารถนำผลมาแสดงความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียในรูปแบบกราฟพื้นผิวดอบนอง

(Response surface) ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟ 3 มิติ (3D plot) แสดงดังรูปที่ 4-17 โดยกราฟพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาใช้ในการอธิบายและระบุผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัวในด้านปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างตัวแปร ซึ่งสามารถแสดงผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของน้ำเสีย (X_1) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (X_2) และอัตราการไหลของน้ำ (X_3) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย



รูปที่ 4-17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของ X_2 และ X_3 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

1) ผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปรทำให้ได้กราฟ 3 มิติจำนวน 3 รูป ดังแสดงในรูปที่ 4-17 ที่แสดงผลของความเข้มข้นสีข้อมและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสีย

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสีข้อมคงที่ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-17 (ก) พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าเทอม X_2 ในสมการที่ 4-4 ซึ่งมีค่าเป็นลบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนชิ้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลสีข้อมทำปฏิกิริยากับสีข้อมก็มีมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้น

จากกราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 4-17 เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำคั่งแสดงในรูปที่ 4-18 (ก) พบว่าการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าทอม X_2X_3 ในสมการ 4-4 ซึ่งมีค่าเป็นบวกเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนชิ้นของเซรามิกโพลีที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และเมื่อพิจารณาอิทธิพลในทอมของอัตราการไหลของน้ำเสีย จากรูปที่ 4-17 (ข) จะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร X_2X_3 ที่มีค่าเป็นบวก เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของระบบจะลดลงเนื่องจากเวลาที่โมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในระบบน้อยลง โอกาสที่สีย้อมสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และ Dang *et al*, 2000

2) ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อม Malachite green ในน้ำเสีย

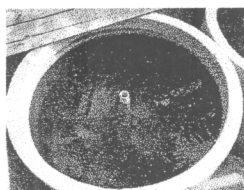
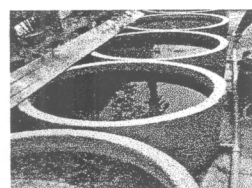
จากสมการแบบจำลองจากสมการที่ 4-4 สามารถนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสียในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายค่าและหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ โดยใช้โปรแกรม Design Expert Software อันจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัด ได้สูงสุด และสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของสีย้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่า สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม (Optimum condition) ที่ได้จากการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสีย สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ที่ความเข้มข้นสีย้อม 20-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม อัตราการไหลของน้ำเสีย 4-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม อัตราการไหลของน้ำเสีย 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงสุด 93.87% โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-8 พบว่า ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำที่ได้จากการทดลองต่ำกว่าค่าที่คาดการณ์ 0.27% ไว้ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 4-8 แสดงภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยคอลัมน์บรรจุโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับผลการทดลอง

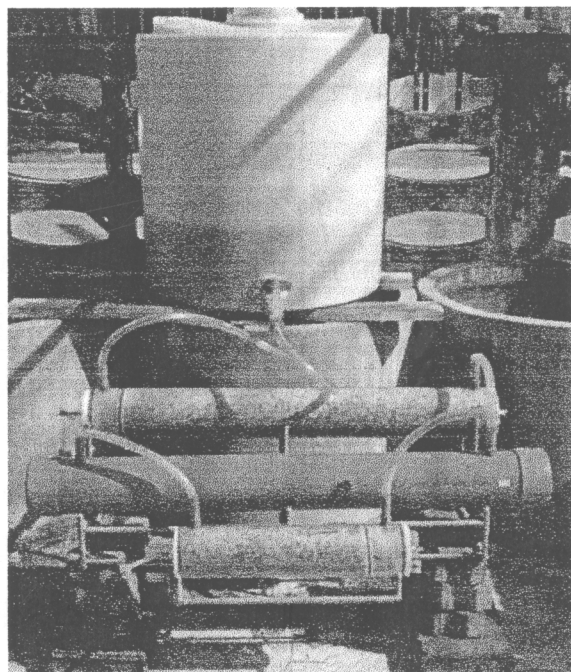
Concentration (X_1) (mg/L)	Amount of Catalyst (X_2) (mg)	Wastewater Flow rate (X_3)(ml/min)	% Color Removal Efficiency	
			Predict	Experiment
X_1	X_2	X_3	Predict	Experiment
7	692	161	93.87	93.62

4.4 การบำบัดน้ำทิ้งจริงของกลุ่มผลิตผ้าบาติกด้วยระบบแบบต่อเนื่อง

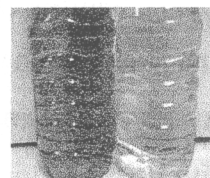
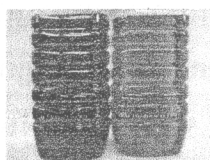
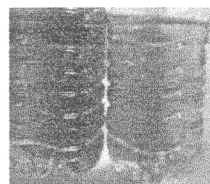
การทดสอบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากชุมชนที่มีการผลิตผ้าบาติกด้วยชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมขนาดชุมชนดังแสดงในรูปที่ 3-5 น้ำเสียไหลเข้าระบบด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก โดยออกแบบระบบให้มีการไหลของน้ำแบบขั้นบันได ภายในคอลัมน์บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดเซรามิกวงแหวนซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกาะติดได้ดีที่พื้นผิวแต่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเซรามิกโฟม และราคาถูก ทดสอบกำจัดสีย้อมด้วยน้ำเสียโทนสีฟ้า สีเขียว และสีม่วง ที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 20 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังการบำบัดบริเวณท่อทางออกของคอลัมน์ที่เวลา 1, 6, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่า ชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมขนาดชุมชนมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโทนสีฟ้า 95% สีเขียว 60% และสีม่วง 50% น้ำเสียโทนสีฟ้าสามารถกำจัดได้ดีเนื่องจากสีย้อมโทนสีฟ้ามักจะมีลักษณะโมเลกุลไม่ซับซ้อน แต่น้ำเสียโทนสีม่วงมีลักษณะ โมเลกุลที่ซับซ้อน สามารถแสดงลักษณะของแหล่งน้ำเสีย ชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมแบบต่อเนื่องขนาดชุมชน และผลของตัวอย่างน้ำเสียในการทดลองบำบัดแสดงดังรูปที่ 4-18 และ 4-19



(ก)

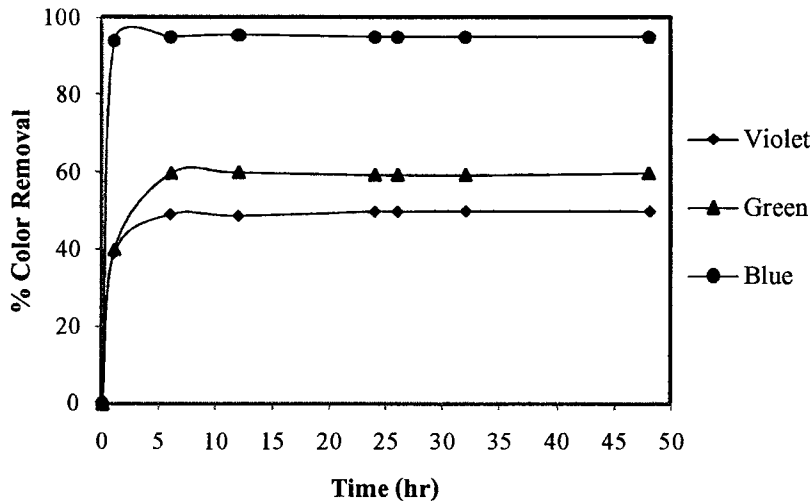


(ข)



(ค)

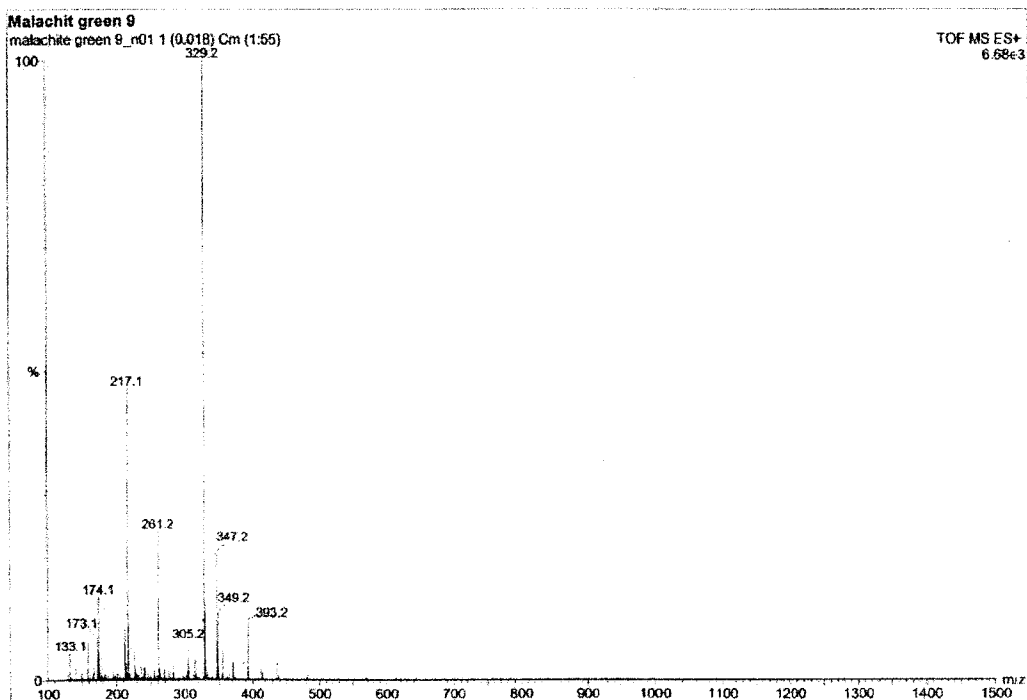
รูปที่ 4-18 แสดงลักษณะน้ำเสียจริงจากชุมชนที่มีการผลิตผ้าบาติก (ก) ชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมแบบต่อเนื่องขนาดชุมชน (ข) น้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัด (ค)



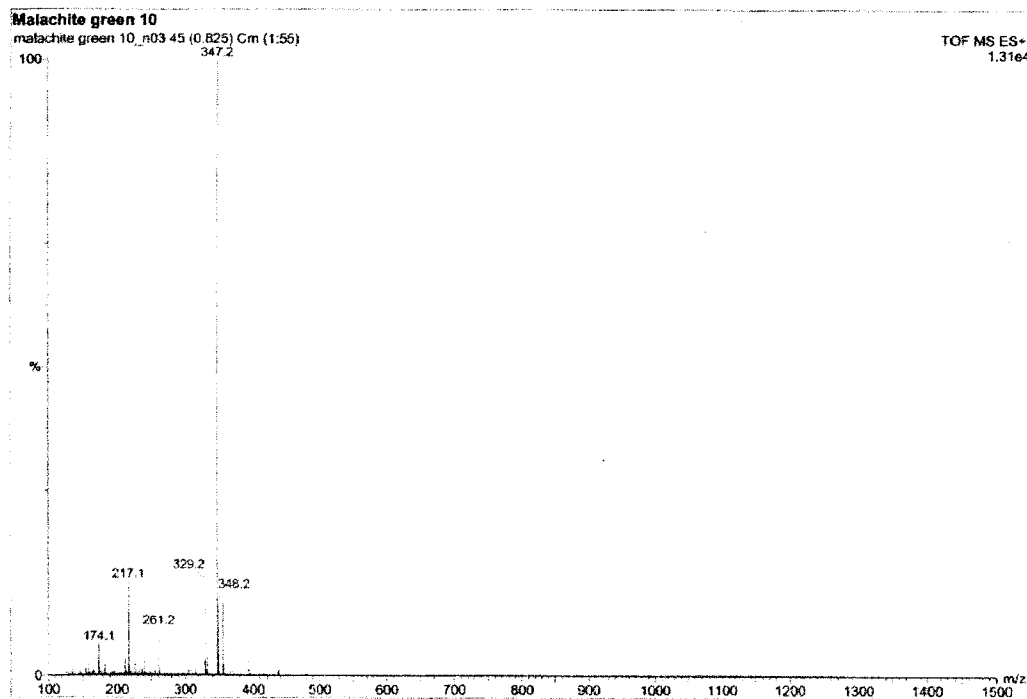
รูปที่ 4-19 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนแบบวงแหวนในชุดการทดลองกำจัดสีในน้ำเสียจริงระดับชุมชนที่อัตราการไหล 20 มิลลิตรต่อนาที

4.5 การวิเคราะห์น้ำเสียด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)

LC-MS เป็นเทคนิคที่ควบคุมกันระหว่างการแยกสารด้วย Liquid Chromatography (LC) โดยใช้หลักการแยกตามคุณสมบัติทางเคมีของสารแต่ละชนิด จากนั้นจะแสดงผลของโครงสร้างของสารที่อยู่ในตัวอย่างในรูปของพีค (Peak) ของมวลสารนั้นๆ ผลการทดสอบน้ำเสียชนิด Malachite green ก่อนการบำบัดแสดงได้ดังรูปที่ 4-20 และหลังการบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4-21 พบว่า Peak no. 329 และ Peak no. 271 ซึ่งเป็น Peak หลักของสีย้อมลดลงแสดงว่าโครงสร้างสีย้อมในน้ำเสียหลังการบำบัดถูกทำลาย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนเข้าไปทำปฏิกิริยาและเกิดการตัด Chain ของโมเลกุลสีย้อมที่อยู่ในน้ำจากโมเลกุลใหญ่ให้สั้นลงทำให้สีย้อมที่อยู่ในน้ำหายไป



รูปที่ 4-20 แสดง Peak โครงสร้าง โมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในสีย้อมชนิด Malachite green ก่อนการบำบัดด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)



รูปที่ 4-21 แสดง Peak โครงสร้าง โมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในสีย้อมชนิด Malachite green หลังการบำบัดด้วยเทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)

4.6 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

4.6.1 การวิเคราะห์ต้นทุน

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบบนตัวกลางเซรามิกมีค่าใช้จ่ายในการผลิต ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายจากสารเคมี ค่าใช้จ่ายจากวัสดุตัวกลาง ค่าใช้จ่ายจากพลังงานไฟฟ้า และเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนผ่านการใช้งานจนเสื่อมสภาพก็สามารถนำวัสดุตัวกลางมาเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ได้ และสามารถคำนวณจำนวนยูนิตการใช้งานพลังงานไฟฟ้าจากสมการที่ 4-5 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4-9

$$\text{Electricity Unit} = \frac{\text{Power (watt)} \times \text{Time (hr)}}{1000} \quad (4-5)$$

ตารางที่ 4-9 ค่าใช้จ่ายจากไฟฟ้าในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบบนเซรามิก โฟมสี่เหลี่ยม 100 ชิ้น และเซรามิกวงแหวน 1,051 ชิ้น (ชั่วโมงใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ เท่ากัน)

อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า(วัตต์)	เวลาที่ใช้งาน (ชั่วโมง)	จำนวน (ยูนิต)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
เตาเผา	2,600	4	10.4	31.2
ตู้อบ	1.41	4	0.00564	0.01692
เครื่องกวน	825	0.5	0.4125	1.2375
รวมค่าใช้จ่ายจากไฟฟ้า				32.45

4.6.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียในระดับชุมชน

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากชุมชนผลิตผ้าบาติกที่มีปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตรต่อสัปดาห์ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบบนเซรามิกวงแหวนโดยใช้ชุดอุปกรณ์กำจัดสีย้อมในน้ำเสียขนาดชุมชนดังรูปที่ 4-20 (ข) ปรับขนาดของคอลัมน์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้คอลัมน์ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบบนเซรามิกวงแหวน คอลัมน์ละ 628 ชิ้น จำนวน 1 คอลัมน์ สำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตรต่อสัปดาห์ ที่อัตราการไหล 0.1 ลิตรต่อนาที มีค่าใช้จ่ายจากชุดอุปกรณ์กำจัดสีย้อมในน้ำเสียขนาดชุมชน 803.36 บาท คิดเป็นต้นทุนในการการบำบัด 11.87 บาทต่อปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร โดยเป็นค่าตัวเร่งปฏิกิริยา 13.52 บาทต่อปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระดับชุมชน 1 ปี ปริมาณน้ำเสีย 52 ลูกบาศก์เมตรด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกวงแหวน

ต้นทุนค่าใช้จ่าย	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย	ค่าใช้จ่าย (บาท)
วัสดุ (เซรามิกวงแหวน)	2,064 ชิ้น	0.8 (บาท/ชิ้น)	1,651.2
ท่อพีวีซี 8 นิ้ว	2.5 เมตร	338.75 (บาท/เมตร)	846.87
สารละลายไอรอน	11.76 ลิตร	49.87 (บาท/ลิตร)	586.47
กำลังไฟฟ้า	10.29 วัตต์	3 (บาท/วัตต์)	30.87
รวมค่าใช้จ่ายจากวัสดุ สารเคมี และกำลังไฟฟ้า			3,115.41
ต้นทุนการบำบัดน้ำเสียระดับชุมชน 1 ลูกบาศก์เมตร			11.87

4.6.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนกับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยการใช้โพธิ์อะลูมิเนียมคลอไรด์และปฏิกิริยาเฟนตัน ที่ปริมาณน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยวิธีการต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 1 ปี โดยออกแบบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร สูง 3 เมตร ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน คอลัมน์ละ 9,000 ชิ้น จำนวน 3 คอลัมน์ สำหรับใช้ในการบำบัดน้ำเสีย 1 ปี ปริมาตร 182,500 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4-11 และแสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-11 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียระดับอุตสาหกรรม 1 ปี ปริมาตร 182,500 ลูกบาศก์เมตรด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกโพลีเอทิลีน

วัสดุ/สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (ชิ้น)	ราคาต่อหน่วย (บาท/ชิ้น)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน	27,000	23.1	623,700
ค่าเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา (หลังใช้งาน 6 เดือน)	27,000	3.1	83,700
รวมค่าใช้จ่าย			707,400
ต้นทุนการบำบัดน้ำเสียระดับอุตสาหกรรม 1 ลูกบาศก์เมตร			3.88

ตารางที่ 4-12 การเปรียบเทียบการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ

ระบบบำบัด	ค่าใช้จ่าย (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัด 1 ปี (บาท)
ปฏิกิริยาเฟนตัน (สุเทพ, 2553)	125.32	22,870,900
โพติอะลูมิเนียมคลอไรด์ (สุเทพ, 2553)	83.15	15,174,875
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน	3.88	707,400

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาทดลองกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม สามารถดำเนินการ โดยมีขั้นตอนหลัก คือ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนที่เคลือบบนตัวกลางชนิดเซรามิก การศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ในกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์ การศึกษาทดลองการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนในระบบแบบต่อเนื่องด้วยการออกแบบและติดตั้งระบบคอลัมน์บรรจุ (Packed column) การทดสอบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากชุมชน และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย โดยการดำเนินการแต่ละขั้นตอนสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนเคลือบบนตัวกลางเซรามิก สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการเตรียมสารละลายไอรอนแบบโซลเจล โดยใช้อัตราส่วนของสารเคมีที่เหมาะสม คือ แมกนีเซียมไนเตรท : ออกซาลิก : เฟอร์ริกคลอไรด์ เป็น 1.25:1.25:3.75 (โมลต่อโมล) ใช้ตัวกลางเซรามิก 3 ชนิด คือ เซรามิก โฟมวงกลม สีเหลือง และเซรามิกวงแหวน เคลือบสารละลายไอรอนบนตัวกลางเซรามิกด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating) ได้ผลการทดสอบพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเกาะติดแน่นบนพื้นผิวเซรามิก และจากการทดสอบด้วย EDX พบว่ามี Fe อยู่บนเซรามิก ทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่พร้อมสำหรับการใช้งานในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

2. การศึกษากำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่สังเคราะห์ได้ในชุดทดลองแบบแบทช์ โดยทำการศึกษาจากสีย้อม 3 ชนิด คือ Reactive red, Reactive blue และ Malachite green พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถบำบัดสีย้อม Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ในน้ำเสียได้ มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 95, 98 และ 99% ตามลำดับ โดยมีพีเอชที่เหมาะสม คือ พีเอช 6 ซึ่งประสิทธิภาพของระบบจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและ Retention time เพิ่มขึ้น การเติมอากาศไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม ตัวเร่งปฏิกิริยาฟื้นฟูสภาพได้ด้วยออกซิเจนในน้ำ และระบบสามารถทำให้น้ำเสียมีค่า COD ลดลง

3. การศึกษาการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยระบบแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์บรรจุ ที่มีการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมชนิด Reactive red และ Malachite green ผ่านพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการออกแบบการทดลองใช้เทคนิค RSM มีตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นสีย้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสีย ได้สภาวะที่เหมาะสมและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมที่สภาวะต่างๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Reactive red และ Malachite green 84.45 และ 93.62 % สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

4. การทดสอบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากชุมชนผลิตผ้าบาติก โดยใช้ชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมขนาดชุมชน พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโทนสีฟ้า 95% สีเขียว 60% และสีม่วง 50%

5. ต้นทุนการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียระดับอุตสาหกรรม 3.88 บาทต่อปริมาตรน้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งถูกกว่าการกำจัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน 32 เท่า

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนในชุดการทดลองแบบแบทช์และแบบไหลต่อเนื่องมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูง โครงสร้างสีในน้ำเสียถูกทำลายส่งผลให้ให้น้ำเสียหลังการบำบัดไม่มีความเป็นพิษ ดำเนินการได้โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำ กำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากภาคชุมชนได้จริงและมีความเป็นไปได้ในการใช้งานระดับอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายแทนเอทานอลเนื่องจากเอทานอลมีราคาแพงและก่อให้เกิดมลพิษ

2. เลือกใช้วัสดุตัวกลางชนิดหรือรูปแบบอื่นๆ ที่เหมาะสมเพื่อให้การผลิตตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพสูง

3. ทำการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่สังเคราะห์ได้กับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงอย่างมีประสิทธิภาพและช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
- กรมส่งเสริมการส่งออก. 2553. กระทรวงพาณิชย์. Available Online: www2.moc.go.th (สืบค้นเมื่อ 30 พฤษภาคม 2554)
- บุษรา ประชุมญาติ. 2545. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟหมู่อะโซด้วยโซเดียมโบโนไฮไดรด์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรานศิริ ศรีศุภพชร. 2551. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยถ่านกัมมันต์และสลักซ์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลักซ์ที่ย่อยสลายแล้ว สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปวีณา ธนะสังข์. 2539. การกำจัดสีจากน้ำทิ้งฟอกย้อมสิ่งทอ โดยวิธีการออกซิเดชัน-รีดักชัน. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- พรนิภา เอี่ยมคำรง และ ไสรดา ชะโน. 2554. การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์ สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ระบบเครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย. 2553. Available Online <http://teenet.tei.or.th> (สืบค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2554)
- รัชนิย์ รุกขชาติ. 2544. การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ควอเตอร์ไนซ์โครอสต์ลิงก์เซลลูโลสจากต้นมันสำปะหลังใบสับประรด และกาบมะพร้าว สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก. สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภารัตน์ ถินจะนะ. 2554. การลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการกักเก็บด้วยซีตะกรันจากกระบวนการผลิตเหล็กกล้า สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุพรรณิ ฉายะบุตร. 2550. การศึกษาความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่ใช้ในอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อิสรินทร์ มะหมัด. 2554. การบำบัดกลิ่นจากก๊าซเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบยางแท่ง โดยใช้สารละลายไฮดรอน(III)คลอไรด์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- Garcia, S., Gil, M.V., Martin, C.F., Pis, J.J., Rubiera, F. and Pevida, C. 2011. Breakthrough adsorption study of a commercial activated carbon for pre-combustion CO₂ capture. *Journal of Chemical Engineering*. 171: 541-556.
- Huang, Y. L., Xue, D. S., Zhou, P. H., Ma Y. and Li, F. S. 2003. ∞ -Fe-Al₂O₃ nanocomposites prepared by sol-gel method. *Journal of Materials Science and Engineering*. 359: 332-337.
- Ikeda, M., Tago, T., Kishida, M. and Wakabayashi, K. 2001. Thermal stability of Pt particles of Pt/Al₂O₃ catalysts prepared using microemulsion and catalytic activity in NO-CO reaction. *Journal of Catalysis Communications*. 2: 261-267
- Jiasheng, C., Liping, W., Qingguo, H., Liansheng, W. and Han, S. 1999. Reduction degradation of azo dye by zero-valent iron in aqueous solution. *Journal of Chemosphere*. 38(3): 565-571.
- Kumar, A. and Kumar, J. 2008. On the synthesis and optical absorption studies of nano-size magnesium oxide powder. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 69: 2764-2772.
- Muruganandham, M. and Swaminathan, M. 2004. Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H₂O₂ process. *Journal of Dye and Pigments*. 62: 271-277.
- Ozdemira, O., Turana, O., Turan, O.Z., Faki, A. and Engin, A.B. 2009. Feasibility analysis of color removal from textile dyeing wastewater in a fixed-bed column system by surfactant-modified zeolite (SMZ). *Journal of Hazardous Materials*. 166: 647-654.
- Rakmak, N., Wiayath, W., Bunyakan, C. and Changsiriporn, J. 2010. Removal of H₂S from of biogas by iron (Fe³⁺) doped MgO on ceramic honeycomb catalyst using double packed column system. *Journal of Engineering*. 14: 15-24.
- Robinson, T., Chandran, B., Naidu, G.S. and Nigam, P. 2002. Studies on the removal of dyes from a synthetic textile effluent using barley husk in static-batch mode and in a continuous flow, packed-bed, reactor. *Journal of Bioresource Technology*. 85: 43-49.
- Shahsavani, D., and Grimvall, A. 2009. An adaptive design and interpolation technique for extracting highly nonlinear response surfaces from deterministic models. *Reliability Engineering and System Safety*. 94, 1173-1182.
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L. and Hameed, B.H. 2008. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. *Journal of Chemical Engineering*. 137: 462-470.
- Wang, J., You, J., Li, Z., Yang, P., Jing, X. And Zhang, M. 2000. Preparation and characteraction of new magnetic Co-Al HTLc/Fe₃O₄ solid base. *Journal of a SpringerOpen*. 85: 43-49.

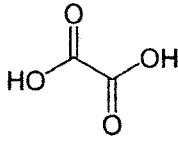
West, J., Willams, B.P., Young, N., Rhodes, C. and Hutchings, G.J. 2001. Ni- and Zn-promotion of γ - Al_2O_3 for the hydrolysis of COS under mild conditions. *Journal of Catalysis Communications*. 2: 135–138.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลสารเคมีเบื้องต้น

ก-1 กรดออกซาลิก



กรดออกซาลิก ($C_2H_2O_4$) เป็น ของแข็ง ผลึกใส ไม่มีสี หรือผงสีขาว ไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุล 126.07 จุดหลอมเหลว 101.5 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 1.65 ละลายน้ำได้ดี เป็นสารไวไฟ ติดไฟได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 101 องศาเซลเซียส แหล่งกำเนิดได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิสูง และใช้กรดซัลฟิวริกทำปฏิกิริยาเป็นกรดออกซาลิก ในธรรมชาติพบได้ต้นส้มกบ ซึ่งเป็น วัชพืช ชอบขึ้นในที่ชื้นแฉะ ลักษณะใบคล้ายผักแว่น กรดออกซาลิก ใช้ในอุตสาหกรรมทำความสะอาด โลหะ และฟอกสี เป็นสารอะโนไดซิง (Anodizing) ใช้หล่อโลหะผสมทองแดง

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

กรดออกซาลิก เป็นกรดที่มีฤทธิ์กัดกร่อนต่อผิวหนังสัมผัสเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมได้ แคลเซียมออกซาลेटซึ่งเป็นผลึกไม่ละลายน้ำ ทำให้ร่างกายสูญเสียแคลเซียม เกิดอาการชัก สลบ และตายได้ พิษจากการกิน ทำให้ระคายเคือง เป็นแผลในปาก คอ และกระเพาะอาหาร อาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ชัก หัวใจเต้นอ่อน สลบและอาจตาย เพราะ ไตวาย เนื่องจากมีผลึกแคลเซียมออกซาลेट พิษเรื้อรังเกิดจากสัมผัสและสูดดมนานๆ ทำให้ผิวหนังเปลี่ยนสี เป็นแผลบริเวณที่สัมผัส และอาจมีอาการไตวายได้ กรดออกซาลิกทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดเซอร์อย่างรุนแรง เป็นสารที่ไวไฟสูงทำให้เกิดระเบิดได้ ต้องหลีกเลี่ยง เบส ไฮโปคลอไรต์ ความร้อน แหล่งจุดติดไฟ นอกจากนี้ยังเกิดการสลายตัวเมื่อถูกความร้อนให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ จึงต้องเก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง มีการระบายอากาศเพียงพอ

ก-2 กรดไฮโดรคลอริก

กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี หรือสีเหลืองอ่อน กลิ่นฉุน กัดจมูกและระคายเคือง เป็นกรดแก่ น้ำหนักโมเลกุล 36.46 จุดเดือด 53 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 1.18 ความดันไอ 190 มิลลิเมตรปรอทที่ 25 องศาเซลเซียส ระเหยได้ในอุณหภูมิห้อง ไม่ไวไฟ และไม่ติดไฟ ละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ และอีเทอร์ มีความเสถียรต่อความร้อนสูง แต่ทำปฏิกิริยากับโลหะได้ก๊าซไฮโดรเจนที่ติดไฟง่าย ทำให้เกิดอัคคีภัยและระเบิดได้ การเจือจางกรดด้วยน้ำทำให้เกิดความร้อนสูงจึงต้องระวังโดยการเทกรดลงในน้ำ กรดไฮโดรคลอริกได้จากปฏิกิริยาของเกลือแกงหรือ โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) กับกรดซัลฟิวริก หรือโดยปฏิกิริยาของคลอรีนและไฮโดรเจน ซึ่งอาจเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ทางอุตสาหกรรม หรือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) จากเกลือแกงด้วยกระแสไฟฟ้า กรดเข้มข้นที่จำหน่ายในท้องตลาดมีก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ประมาณร้อยละ 37 ก๊าซไฮโดรคลอริกใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด การซุบและทำ

ความสะอาด โลหะ ปีโตรเลียม ยาง สี ใช้บำบัดขยะที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูงเพื่อให้เป็นกลาง เป็นสารเคมีในห้องปฏิบัติการและนิยมใช้เป็นส่วนผสมสำคัญในน้ำยาล้างห้องน้ำ

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การเกิดพิษต่อร่างกายโดยการหายใจไอระเหยหรือละอองกรด ทำให้ระคายเคืองเนื่องจากมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรง ทำลายเนื้อเยื่อโดยทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโปรตีนทำให้ละลายในกรดเข้มข้นได้ ฮีโมโกลบินในเลือดเปลี่ยนเป็นแอซิดฮีมาติน (Acid hematin) ซึ่งมีสีคล้ำและตกตะกอน ส่วนที่สัมผัสเปลี่ยนเป็นสีดำหรือสีน้ำตาล หายใจติดขัด จมูก ลำคอ และทางเดินหายใจส่วนบนอักเสบ กรณีที่รุนแรงทำให้น้ำท่วมปอด ระบบหายใจล้มเหลวและถึงตายได้ ถ้าสัมผัสถูกตาทำให้ตาแดง และระคายเคืองตา ถ้าความเข้มข้นสูงอาจเกิดแผลไหม้และตาบอดได้ การสัมผัสทางผิวหนังทำให้ระคายเคืองเกิดผื่นแดง เป็นแผลพุพอง ผิวหนังเปลี่ยนสี การกลืนกินจะเกิดอาการปวดกร่อนรุนแรง มีแผลไหม้ในปาก คอ ทางเดินอาหาร อาจคลื่นไส้ และตายได้ กรดไฮโดรคลอริก กัดกร่อนโลหะเช่นเดียวกับกรดซัลฟูริกจึงต้องหลีกเลี่ยงหรือระมัดระวังการทำงานกับโลหะรวมทั้งด่างหรือเบส สารออกซิไดเซอร์และสารเคมีอีกหลายชนิด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดก๊าซที่ติดไฟ และก๊าซอันตรายได้

ก-3 โซเดียมไฮดรอกไซด์

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โซดาไฟ เป็นของแข็งลักษณะผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ระเหย ไม่ติดไฟ น้ำหนักโมเลกุล 40.01 เป็นด่างแก่ จุดหลอมเหลว 318 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 2.13 ละลายน้ำได้ดี และเกิดความร้อนสูง และมีควันหรือละอองสาร เมื่อถูกความชื้นจะเย็นได้ง่าย สารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมักอยู่ในรูปของแข็งเป็นเม็ด (pellets) ทางอุตสาหกรรมอาจอยู่ในรูปของเหลวละลายน้ำ ชนิดเข้มข้น เป็นแผ่นหรือเป็นแท่ง ทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือของสาร และทำปฏิกิริยากับกรดไขมันได้สบู่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ไดออกไซด์ในอากาศได้ง่ายเกิดโซเดียม คาร์บอเนตสารนี้ได้จากการผ่านกระแสไฟฟ้าในน้ำเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งโซเดียมไอออนจะไปที่ขั้วบวก (Cathode) ซึ่งมีแผ่นแอตเตปตคอยป้องกันคลอรีน แล้วทำปฏิกิริยากับน้ำปลดปล่อยก๊าซไฮโดรเจนได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ในอุตสาหกรรมผ้า พลาสติก ลีเยียม ฟอกย้อม แร่ โลหะ ทำแม่พิมพ์ เป็นสารเคมีสำคัญ สำหรับผลิตสบู่ กระจก ยาสีฟัน และใช้ในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนใช้บำบัดน้ำเสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดเพื่อให้เป็นกลาง และการล้างพื้นผิวต่างๆให้สะอาด โดยเฉพาะการล้างไขมันออก

อันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อรุนแรง โดยทำปฏิกิริยากับโปรตีนและไขมัน ทำให้บริเวณนั้นอ่อนนุ่มกลายเป็นวุ้นหรือเจลาตินและสบู่ เนื้อเยื่อถูกทำลายหรือถูกกัดลึกลงไป ซึ่งการทำลายอาจต่อเนื่องหลายวัน ล้างน้ำออกได้ยาก การหายใจเอาไอหรือละอองสารทำให้ระคายเคืองต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้จาม ปวดคอ น้ำมูกไหล ปวดอักเสบรุนแรง หายใจขัด การสัมผัสถูกผิวหนังจะระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้และพุพองได้ การกลืนกินทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระเพาะอาหาร เกิดแผลและ

เลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง เสียชีวิตได้ หากสัมผัสถูกตาจะมีฤทธิ์กัดกร่อน ระคายเคือง รุนแรง เป็นแผลไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นจนถึงขั้นตาบอดได้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับโลหะเกิด ก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ และต้องหลีกเลี่ยงความชื้น ผุ่น น้ำ กรด ของเหลวไวไฟ ไตรคลอโรเอทิลีน ซึ่งอาจ เกิดไฟไหม้หรือระเบิดได้

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์

ข-1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็ก

ข-1.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของเหล็กรวม (Total Fe) ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์ชันสเปกโทรโฟโตเมตรี หรือวิธีเอเอเอส (Atomic absorption spectrophotometry : AAS)

หลักการทั่วไป

วิธีการวิเคราะห์ด้วยอะตอมมิกแอบซอร์ชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์(AAS) วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นหรือปริมาณของ โลหะที่มีอยู่ในตัวอย่าง ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์จึงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1.1 การเก็บและการรักษาคุณภาพตัวอย่างน้ำ (Sample collection and preservation)

ในการหาปริมาณของธาตุโลหะจำนวนน้อยๆนั้นข้อที่ต้องระมัดระวังมากๆ คือ การปนเปื้อนและการสูญหายของเนื้อโลหะ ซึ่งต้นเหตุที่สำคัญในการทำให้เกิดการปนเปื้อนของตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ฝุ่นในห้องทดลอง สิ่งเจือปนที่อยู่ในรีเอเจนต์ที่ใช้และที่อยู่ในเครื่องใช้ในห้องทดลอง โดยทั่วไปการทดลองที่เกี่ยวข้องกับสารที่เป็นของเหลว ภาชนะที่ใส่สารตัวอย่างนั้นมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงบวก (Positive error) หรือความคลาดเคลื่อนเชิงลบ (Negative error) โดย

1) ภาชนะเป็นตัวให้สิ่งปนเปื้อนออกมาในขณะที่ทำการชะล้าง (Leaching) หรือเมื่อภาชนะเกิดกระบวนการคายสารออกจากผิว (Desorption) และ

2) ภาชนะดูดซับโลหะบางส่วนไว้ที่ผิว ทำให้ความเข้มข้นของธาตุโลหะน้อยลง ดังนั้นขอเก็บตัวอย่างควรล้างขวดเก็บตัวอย่างให้สะอาด โดยทำตามลำดับต่อไปนี้ คือ (ก) ล้างด้วยน้ำยาล้างจานและน้ำ (ข) ล้างด้วยกรดไนตริก 1+1 และน้ำ (ค) ต่อด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1+1 ตามด้วยน้ำ และ (ง) สุดท้ายล้างด้วยน้ำ DI

หมายเหตุ : กรดโครมิกใช้ได้ดีในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่บนผิวของเครื่องแก้ว อย่างไรก็ตามก็ควรต้องทำการล้างกรดโครมิกออกให้หมดด้วย มิฉะนั้นจะมีโลหะโครเมียมหลงเหลืออยู่ซึ่งจะเป็นสิ่งแทรกสอดในกระบวนการวิเคราะห์

1.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โลหะทั้งหมด (Total Fe)

ในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่าง ให้ทำตัวอย่างน้ำให้เป็นกรด (พีเอช 2) โดยใช้กรดไนตริก 1+1 แล้วทำการเติมตัวอย่างให้เต็มขวดแล้วปิดฝาเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์ผลในทันที

1.3 สิ่งแทรกสอดในการวิเคราะห์

สิ่งแทรกสอดในการวิเคราะห์มีมากมายหลายชนิด แต่ชนิดที่ทำความยุ่งยากมากที่สุด ก็คือ สิ่งแทรกสอดทางเคมี อันเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในเปลวไฟ ทำให้การวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมของธาตุที่

ต้องการวิเคราะห์ตลาดเคลื่อนไป จำเป็นต้องหาวิธีการแก้ไขโดยการเติมเกลือพวกแคลเซียมลงไป เพื่อจัดการรบกวนของซิลิกาในการวิเคราะห์เหล็กและแมงกานีส

1.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

-เครื่องมือและอุปกรณ์

1) อะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

-รีเอเจนต์

1) อากาศ อากาศที่ใช้ต้องสะอาดและแห้ง ซึ่งจะใช้อากาศที่มาจากเครื่องอัดอากาศ

2) แก๊สอะเซทิลีน ใช้ชนิดมาตรฐานการค้าที่บรรจุอยู่ในท่อ

3) สารละลายแคลเซียม

ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตหนัก 630 กรัม ละลายในกรดไฮโดรคลอริก (1+5) 50 ลบ.ซม.บางครั้งจำเป็นต้องต้มสารละลายให้เดือดอย่างช้าๆ เพื่อที่จะให้ได้สารละลายใสทำให้เย็นและเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

4) สารละลายโลหะมาตรฐาน ใช้สารละลายมาตรฐาน Ferric chloride ซึ่งมีความเข้มข้น 1 mg/mL ของบริษัท Farmitalia Carlo Erba ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน โดยทำการเจือจางด้วย 2% กรดไนตริก

1.5 วิธีวิเคราะห์

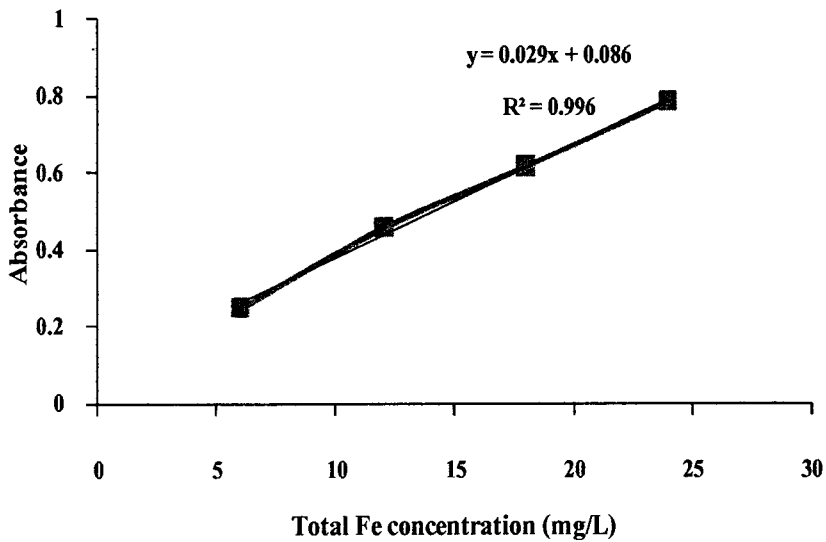
เนื่องจากอะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับบริษัทที่ทำจำหน่าย ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์โดยทำการเลือก Fe เป็นฮอลโลวแคโทดแลมป์โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 248.3 นาโนเมตร โดยใช้ความกว้างของ slit width 0.7 nm และปล่อยอากาศให้ผ่านเข้าไปในเครื่องมือและพร้อมกับการปล่อยแก๊สอะเซทิลีนเข้าไปแล้วเริ่มจุดเปลวไฟด้วยความระมัดระวัง และทำการจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ลงไปในน้ำกลั่นมากกว่า 1 นาที พร้อมกันนั้นก็ให้เครื่องมือให้อ่านสารละลาย (blank) และหลังจากนั้นจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กของเครื่องอะตอมไมเซอร์ลงในสารละลาย มาตรฐานที่ทราบความเข้มข้น เมื่อทำการเตรียมข้อมูลสารละลายมาตรฐานก็สามารถทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์เสร็จแล้วให้ดับเปลวไฟโดยปิดท่ออะเซทิลีนก่อนแล้วจึงปิดทางเดินอากาศ

1.6 การสร้างกราฟมาตรฐาน

เพื่อให้ได้สิ่งแวดล้อมเดียวกัน จึงจำเป็นต้องสร้างกราฟมาตรฐานทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์แต่ละครั้ง โดยเลือกสารละลายโลหะเหล็กมาตรฐานใช้สารละลายมาตรฐาน Ferric chloride ซึ่งมีความเข้มข้น 1 mg/mL มาทำการเจือจางด้วย 2% กรดไนตริก จนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอยู่ในช่วง 6 – 24 mg/L ซึ่งจะใช้สารมาตรฐานอย่างน้อย 4 ความเข้มข้น แล้วทำการจุ่มหลอดพลาสติกกรูเล็กลงในสารละลายแต่ละความเข้มข้นแล้ววัดค่าแอบซอร์พแบนซ์ ดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐาน โดยวิธีการใช้วิธี AAS

Fe concentration (mg/L)	Absorbance			
	STD 1	STD2	STD3	average
6	0.2490	0.249	0.248	0.249
12	0.456	0.456	0.457	0.456
18	0.615	0.614	0.614	0.614
24	0.785	0.780	0.780	0.782



ภาพประกอบที่ ข-1 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กกรรม (Total Fe) โดยใช้ AAS

1.7 การวิเคราะห์สารตัวอย่าง

- 1) ทำการล้างอะตอมไมเซอร์ จนกระทั่งค่ามาตรฐานของระบบอ่านให้คงที่แล้วจัดเครื่องมือให้อ่านศูนย์ (set zero)
- 2) จุ่มหลอดพลาสติกกรุเล็กลงในสารละลายตัวอย่างแล้ววัดค่าแอบซอร์บแนนซ์ (Absorbance) หรือค่าการดูดกลืนแสง

1.8 การคำนวณ

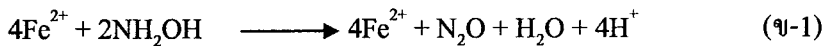
การคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างโดยคิดเป็น mg/L โดยอ่านจากกราฟมาตรฐานที่ถูกต้อง ซึ่งจะต้องมีนัยสำคัญของ R^2 มีค่ามากกว่า 0.995 เป็นต้นไป

ข-1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณของเหล็กเฟอร์รัส (Fe(II)) ด้วยเทคนิคิวีโรลิบิลสเปกโตรมิเตอร์

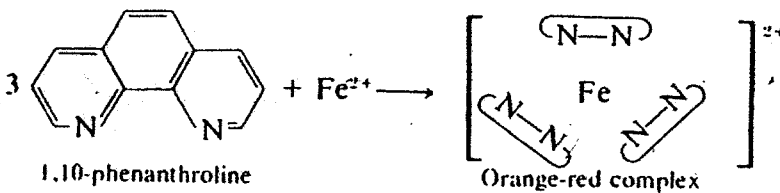
จะใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะกล่าวถึงแต่วิธีหลังเพราะสะดวก ประหยัดและง่าย นำประปามีปริมาณของเหล็กต่ำและมักไม่มีตัวขัดขวาง โดยใช้วิธีการ Phenanthroline method (APHA, 1985)

2.1 หลักการ

เหล็กถูกทำให้ละลาย หลังจากนั้นรีดิวซ์ให้ไปอยู่ในรูป Fe^{2+} โดยการต้มด้วยกรดและไฮดรอกซิลลา มีน และทำปฏิกิริยากับ 1,10 phenanthroline ที่ pH 3.2-3.3 พบว่า 3 โมเลกุลของฟีแนนโทรีนจะจับกับ 1 อะตอมของ Fe^{2+} เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีส้มแดง สีของสารละลายที่เกิดขึ้นเป็นไปตามกฎของเบียร์ ความเข้มของสีที่เกิดไม่ขึ้นกับ pH ในช่วง 3-9 ถ้า pH อยู่ระหว่าง 2.9-3.5 ก็จะทำให้สีเกิดเร็ว เมื่อมีฟีแนนโทรีนในปริมาณเกินพอสีมาตรฐานอยู่ตัวได้ถึง 6 เดือนเป็นอย่างน้อย วัดได้ด้วยการเปรียบเทียบกับตาหรือด้วยเครื่องมือ เนื่องจาก 1,10 phenanthroline ใช้วัดได้เฉพาะ Fe^{2+} ดังนั้นเหล็กในรูป Fe^{2+} จะถูกเปลี่ยนมาอยู่ในรูป Fe^{2+} ให้หมดโดยใช้ hydroxylamine ซึ่งเป็นตัวลดออกซิเจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ (ข-1)



หลังจากนี้ pH ของสารละลายจะถูกทำให้อยู่ในช่วง 3.2-3.3 โดยการเติมสารละลาย Amoniumacetate buffer ลงไปแล้วจึงตามด้วย 1,10 Phenanthroline พบว่า 3 โมเลกุลของ Phenanthroline จะจับกับ Fe^{2+} 1 ตัว เกิดเป็น complex ดังสมการในภาพประกอบที่ (ข-2)



ภาพประกอบที่ ข-2 แสดง โมเลกุลของสาร 1,10 phenanthroline ทำการรีดิวซ์เหล็กเฟอร์รัส เพื่อให้สารละลายเกิดเป็นสีส้ม

วิธีนี้ใช้หาเหล็กในรูป Fe^{2+} อย่างไรก็ตามต้องใช้ความระมัดระวังในการเก็บตัวอย่าง การนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงต่างๆ อันอาจเกิดขึ้นด้วย ในการหา Fe^{2+} โดยวิธีนี้นั้นจะเห็นว่า Phenanthroline ที่ใช้จะมากผิดปกติทั้งนี้เพื่อให้มากเกินพอ (นั่นคือให้ mole ratio ของ Phenanthroline ต่อ $Fe^{2+} + Fe^{3+}$ มากกว่า 30)

ตัวขัดขวางสำหรับวิธีนี้ คือ ตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง ไซยาไนท์ ไนไตรท์ และฟอสเฟต นอกจากนี้พวกโลหะหนัก เช่น โครเมียม สังกะสี (ถ้ามีมากกว่า 10 เท่าของเหล็ก) โคบอลท์และทองแดง (ถ้ามากกว่า 5

มิลลิกรัมต่อลิตร) นิกเกิล (ถ้ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร) บิสมัท แคลเซียม โปรทเงิน และ โมลิบดีนัม จะตกตะกอน การต้มกับกรดจะเปลี่ยน polyphosphate ให้เป็น orthophosphate และกำจัดไซยาไนด์กับไนไตรท์ การเติม hydroxylamine จะจำกัดค่าผิดพลาดเนื่องจากพวกตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงที่มีอยู่เป็นจำนวนมากๆ ในกรณีที่มีโลหะหนักซึ่งเป็นตัวขัดขวางมากต้องเติม phenanthroline ให้เกินพอ เพื่อให้ไปแทนที่พวกที่ไปจับเป็น complex กับโลหะเหล่านั้น ส่วนใหญ่มักใช้สกัดเหล็กด้วย isopropyl ether ก่อนที่จะเติม phenanthroline ถ้าตัวอย่างมีสีหรือสารอินทรีย์อยู่มาก ให้ระเหยตัวอย่างให้แห้งแล้วละลายตะกอนซึ่งเผาให้เป็นแก้วอ่อนด้วยกรดใน porcelain crucible วิธีใช้หาเหล็กได้ในความเข้มข้นต่ำถึง 10 $\mu\text{g/l}$ โดยใช้เซลล์ขนาด 5 เซนติเมตร หรือยาวกว่านี้ ให้ทำแบบลงค์โดยผ่านกระบวนการทุกอย่างเหมือนกับตัวอย่าง ในกรณีที่ใช้เซลล์ขนาด 1 เซนติเมตร วิธีนี้ใช้หาตัวอย่างซึ่งมีเหล็กในช่วง 0.02-4.0 mg/l ได้โดยตรง ถ้าเข้มข้นมากกว่านี้ให้ลดปริมาตรตัวอย่าง

2.2 เครื่องมือ

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ 510 nm พร้อมเซลล์ขนาด 1 ซม. (HP 8453 UV-VIS Spectrophotometer)

2.3 สารเคมี

ให้ใช้น้ำกลั่นและสารเคมีที่มีเหล็กต่ำ เก็บน้ำยาเคมีในขวดพร้อมจุกแก้ว กรดเกลือและแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์จะอยู่ตัวตลอดไปถ้าปิดจุกให้แน่น ไฮดรอกซิลลามีนิ ฟิแนนโทโรลีน และสต็อกเหล็ก อยู่ตัวได้หลายเดือน สารละลายมาตรฐานเหล็กไม่อยู่ตัวให้เตรียมใช้แต่ละวัน โดยการเจือจางจากสต็อกเหล็ก

- 1) conc.HCl
- 2) สารละลายไฮดรอกซิลลามีนิ : ละลาย $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 10 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
- 3) สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ : ละลาย $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ 250 กรัมในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร เติม glacial acetic ลงไป 700 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
- 4) สารละลายฟิแนนโทโรลีน : ละลาย 1,10-phenanthroline monohydrate ($\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) 100 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ซึ่งได้เติม conc.HCl ลงไปแล้ว 2 หยด ถ้าสารละลายมีสีเข้มจะต้องเตรียมใหม่ (สารละลายนี้ 1 มิลลิลิตรเพียงพอสำหรับเหล็กไม่เกิน 1 ไมโครกรัม)
- 5) สารละลายสต็อกเหล็ก : ค่อยๆ เติม 20 มิลลิลิตร conc. H_2SO_4 ลงในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วใช้สารละลาย 1.404 กรัม $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ค่อยๆ เติม 0.1 นอร์มัล KMnO_4 ทีละหยด จนกระทั่งได้สีชมพูอ่อนๆ เติมน้ำกลั่นจนได้ 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน สารละลายนี้ 1.00 มิลลิลิตร = 200 ไมโครกรัมเหล็ก
- 6) สารละลายมาตรฐานเหล็ก : ให้เตรียมในวันที่จะใช้โดยเลือกข้อใดข้อหนึ่ง
 - ก. ปิเปต 50.00 มิลลิลิตรสารละลายสต็อกเหล็ก ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.0 มิลลิลิตร = 10.00 ไมโครกรัมเหล็ก

ข. ปิเปต 25.00 มิลลิลิตรสารละลายสต็อกเหล็ก ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

1.0 มิลลิลิตร = 5.00 ไมโครกรัมเหล็ก

7) โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.1 M : ละลาย 0.316 กรัม KMnO_4 ในน้ำกลั่นเจือจางจนเป็น 100 มิลลิลิตร

2.4 วิธีการหา

2.4.1 Ferrous Fe (Fe^{2+})

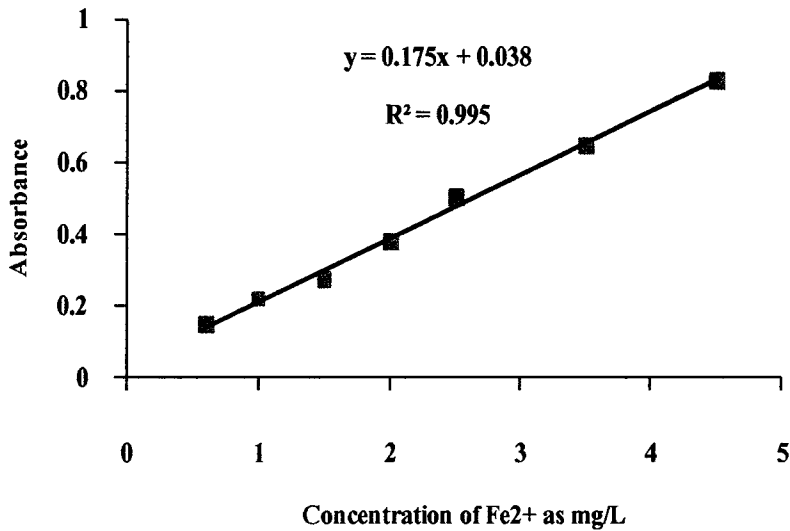
หาค่า Ferrous Fe ที่จุดเก็บเพราะเป็นไปได้ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน Fe^{2+} - Fe^{3+} กับเวลาในสารละลายกรด ในการหาเฉพาะ ferrous Fe ให้ acidify ตัวอย่างที่แยกมาต่างหากด้วย 2 มิลลิลิตร conc.HCl ต่อตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร ณ จุดเก็บ เติมตัวอย่างให้เต็มและปิดจุก เขย่า ดูตัวอย่างนี้มา 50 มิลลิลิตรเติมฟิแนนโทรลีน 20 มิลลิลิตร และสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันอย่างแรง เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้โดยไม่ให้ถูกแสง วัสดุที่เกิดขึ้นภายในเวลา 5-10 นาที (สีจะเกิดขึ้นเร็วมากเพราะเติมฟิแนนโทรลีนในปริมาณที่เกินพอ) ฟิแนนโทรลีนที่เติมลงไปเหมาะสมสำหรับ total Fe ที่น้อยกว่า $50 \mu\text{g}$ ถ้ามี Fe มากกว่านี้ให้เพิ่มปริมาตรของฟิแนนโทรลีน หรือใช้สารเคมีที่เข้มข้นขึ้น) คำนวณ Fe^{3+} โดยลบ Fe^{2+} (3) จาก total Fe (1)

2.4.2 Color measurement

เตรียมอนุกรมของมาตรฐานโดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กในช่วง 0.6 – 4.5 mg/L ทำทุกอย่างเหมือนในวิธีการหาโดยเริ่มต้นจาก 50 หรือ 100 มิลลิลิตรซึ่งที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ซึ่งทุกๆจุดวัดโดยใช้สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ดังตาราง และจะใช้สำหรับการอ้างอิง (Reference) ให้ใช้น้ำหรือ Sample blank ที่เตรียมทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น เปลี่ยนค่า Absorbance ที่อ่านได้ไปเป็นความเข้มข้นของเหล็กโดยใช้ Calibration curve ดังภาพประกอบที่ ข-3

ตารางที่ ข-2 แสดงผลจากการทำกราฟมาตรฐานโดยวิธีการ Phenanthroline (APHA, 1985)

Fe concentration	Absorbance			
(mg/L)	STD 1	STD2	STD3	average
0.6	0.1510	0.151	0.151	0.151
1	0.222	0.222	0.223	0.222
1.5	0.275	0.275	0.275	0.275
2	0.383	0.383	0.383	0.383
2.5	0.505	0.504	0.502	0.504
3.5	0.648	0.648	0.648	0.648
4.5	0.829	0.830	0.829	0.829



ภาพประกอบที่ ข-3 แสดงกราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัส (Fe²⁺) โดยวิธีการ Phenanthroline

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ก-1 ผลของ pH

ก-1.1 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive red ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน 2 ขึ้นต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบบท์

Time (hr)	%Color Removal (Reactive red)			
	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	82.48	90.05	62.60	67.91
2	85.00	93.83	75.80	80.58
3	86.00	93.87	90.51	81.38
4	89.00	93.89	90.60	91.92
8	89.97	93.93	90.61	92.76
12	89.99	94.00	90.61	90.05
24	90.00	94.00	90.64	90.04

ก-1.2 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive blue ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน 2 ขึ้นต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบบท์

Time (hr)	%Color Removal (Reactive blue)		
	pH 5	pH 6	pH 8
0	0.00	0.00	0.00
0.5	26.05	34.84	23.98
1	38.45	54.47	38.97
2	46.74	73.29	64.95
3	49.61	91.49	64.99
4	59.25	96.41	92.07
8	95.55	100.00	98.16

ค-1.3 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Malachite green ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน 2 ชั้นต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบบท์

Time (hr)	%Color Removal (Reactive red)			
	pH 5	pH 6	pH 7	pH 8
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	88.95	90.74	75.97	90.94
1.00	91.31	90.74	76.49	91.29
1.50	91.36	91.80	77.82	92.32
2.00	92.17	92.32	81.98	92.93
2.50	92.22	93.55	83.90	94.04
3.00	93.06	94.17	83.95	94.41

ค-1.4 ผลของความเข้มข้นของสีของในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive red ที่ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน 2 ชั้นต่อลิตรน้ำเสีย ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบเบบท์

Time (hr)	%Color Removal (Reactive red)			
	10 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	82.48	14.78	45.79	29.46
2	85.00	25.29	52.10	38.41
3	86.00	33.42	59.09	46.40
4	89.00	46.24	66.06	54.53
8	89.97	62.62	73.13	65.66
12	89.99	80.65	80.86	78.79
24	90.00	90.58	88.87	86.98

ค-1.5 ผลของจำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 6 ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบตช์

Time (hr)	%Color Removal (Reactive red)			
	1 piece	2 pieces	3 pieces	4 pieces
0	11.36	60.10	46.34	73.10
1	34.08	78.43	63.50	89.80
2	53.88	80.51	68.65	87.51
3	54.39	80.47	73.00	86.87
4	79.70	83.69	70.81	86.84
8	80.51	81.93	80.33	94.98
12	83.50	85.68	80.68	93.79
24	11.36	60.10	46.34	73.10

ค-1.6 ผลของการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอน 2 ชิ้นต่อลิตร ด้วยชุดการทดลองแบบแบตช์

Time (hr)	%Color Removal		
	feed N ₂	feed O ₂	Blank
2	89.83	89.80	88.01
3	87.67	87.91	86.99
4	87.01	89.87	93.08
8	86.99	89.84	93.79
12	94.88	94.98	88.03
24	93.79	94.00	87.67

ค-1.7 ผลของเวลาการทำปฏิกิริยา (Retention time) การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา 4 ชิ้นต่อลิตร ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบเบบัทซ์

Time (hr)	%Color Removal		
	Reactive red	Reactive blue	Malachite green
0	0.00	0.00	0.00
0.5		34.84	90.74
1	90.05	54.47	90.74
1.5			91.80
2	93.83	73.29	92.32
2.5			93.55
3	93.87	91.49	94.17

ค-1.8 แสดงตัวแปรอิสระและผลตอบสนองของการกำจัดสีย้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮรอนในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลองที่	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม			ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเฉลี่ย (ร้อยละ)
	ที่เวลา 1 นาที	ที่เวลา 3 นาที	ที่เวลา 5 นาที	
1	34	31.60	35.2	33.60
2	40.18	40	40.9	40.90
3	34.52	30	31	31.84
4	22.09	22	22	22.09
5	50	52.69	51	51.23
6	49.02	49.02	48.9	48.98
7	37	35.58	35	35.86
8	37	35.58	35	35.86
9	21	23	20.8	21.60

การทดลองที่	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม			ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเฉลี่ย (ร้อยละ)
	ที่เวลา 1 นาที	ที่เวลา 3 นาที	ที่เวลา 5 นาที	
10	37.18	37.18	37.18	37.18
11	34	34	34	34.00
12	35	36.2	35.03	35.41
13	25.06	25.7	24	24.92
14	49.4	45.40	47.40	47.40
15	55.4	55.85	55.49	55.58
16	34	35	37.74	35.58
17	24	23.2	23	23.40
18	36.66	36.66	36.66	36.66
19	29.12	27	28	28.04
20	29.3	29	29.12	29.14
21	85	84.5	85.05	84.85
22	80	87	87.43	84.81
23	80	86.9	86.03	84.62
24	85	84.3	84.77	84.69

ก-1.9 แสดงตัวแปรอิสระและผลตอบสนองของการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนในชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD

การทดลองที่	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม		ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเฉลี่ย (ร้อยละ)
	ที่เวลา 1 นาที	ที่เวลา 3 นาที	
1	42.04	42.0	42.02
2	70	70.9	70.45
3	89	89.2	89.10
4	31	36.9	33.95
5	77.7	77	77.35
6	60	60.1	60.05
7	46.96	46.96	46.96
8	71.9	69	70.45
9	90.34	90.2	90.27
10	63	61.16	62.08
11	82	82	82.00
12	83.96	82	82.98
13	72.9	68	70.45
14	85.92	84	84.96
15	68	68	68.00
16	96.9	96.8	96.85
17	62.84	60.1	61.47
18	80.04	78	79.02
19	79	79	79
20	59.96	61	60.48

ค-1.10 ผลของเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับน้ำเสียสังเคราะห์ (Retention time).ของสีย้อม Reactive red ที่ pH 6 ความเข้มข้นสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา 25 ชิ้น อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ 20, 110, 163.5, และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที ในชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง

Retention time (min)	%Color Removal	
	Malachite green	Reactive red
441	96.85	47
92	79.02	34
42	70.45	28
22	60.05	22

ค-1.11 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนแบบวงแหวนในชุดการทดลองกำจัดสีในน้ำเสียระดับชุมชนที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที

Time (hr)	%Color Removal		
	Violet	Green	Blue
0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	39.00	40.00	94.00
6.00	49.30	59.80	95.00
12.00	48.90	60.00	95.50
24.00	50.01	59.30	95.00
26.00	50.00	59.35	95.00
32.00	50.10	59.30	95.00