

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

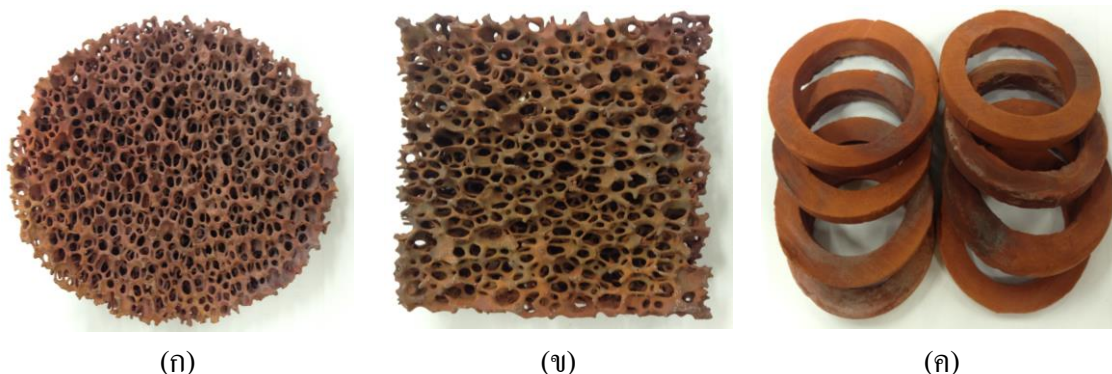
จากการศึกษาทดลองกำจัดสีย้อมในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนที่ผ่านการเคลือบบนวัสดุตัวกลางเซรามิกโฟมวงกลม เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม และเซรามิกวงแหวน โดยสามารถแบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 6 ตอน คือ

- 1) การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน โดยศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณสารตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอล โดยใช้เทคนิคโซลเจล (Sol-gel) ในการเคลือบสารไอออนบนวัสดุตัวกลาง
- 2) การทดลองกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนในชุดการทดลองแบบแบทช์ (Batch reactor)
- 3) การสร้างชุดทดลองสำหรับกำจัดสีย้อมในน้ำเสียแบบต่อเนื่อง (Continuous reactor)

สามารถแสดงผลและวิเคราะห์ผลโดยนำข้อมูลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อม (Color removal efficiency, %)

4.1 การศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

จากการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบบนตัวกลางชนิดเซรามิกโฟมด้วยวิธีโซล-เจล ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมของสารตั้งต้นในตัวทำละลายเอทานอลสำหรับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน คือ อัตราส่วนของสารละลายแมกนีเซียมไนเตรท สารละลายกรดออกซาลิก และสารละลายเฟอริกคลอไรด์ (โมลต่อโมล) เป็น 1.25:1.25:3.75 ได้สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยาลักษณะของเหลว จุ่มเซรามิกในตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เพื่อไล่ตัวทำละลาย ขั้นตอนสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนเคลือบติดบนเซรามิกและให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงสุด โดยเซรามิกโฟมวงกลมและสี่เหลี่ยมจะมีพื้นที่ผิวให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะติดมากกว่าแบบวงแหวน แสดงดังรูปที่ 4-1



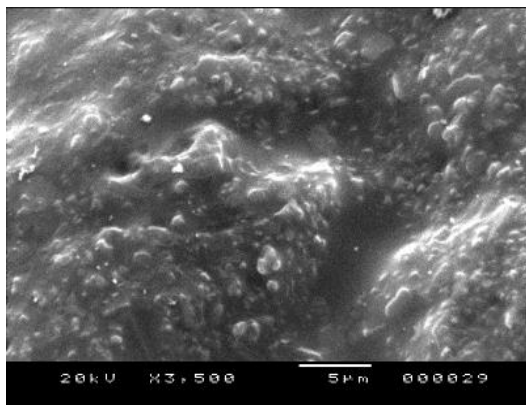
รูปที่ 4-1 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนที่ได้บนตัวกลางเซรามิกโฟมวงกลม (ก) เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม (ข) และเซรามิกวงแหวน (ค) ที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน

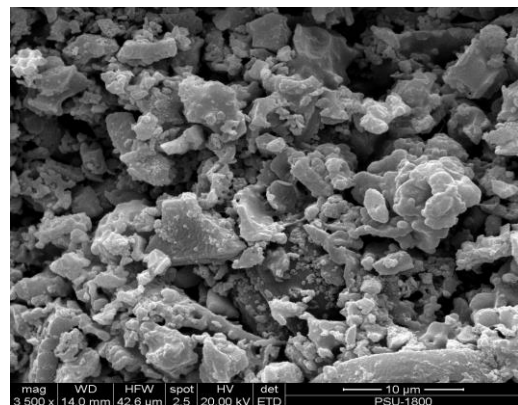
นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบภายในตัวอย่างด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเฟอร์รัส (Fe^{3+}) ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก ด้วยวิธีการของฟิแนนโทรีน (APHA, 1985)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

1. ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่อนำเซรามิกก่อนและหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า พบว่า เซรามิกก่อนเคลือบมีลักษณะผิวขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ก) และเซรามิกหลังเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่สม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวกลางชนิดเซรามิก เนื่องจากพื้นผิวของเซรามิกมีลักษณะขรุขระทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนสามารถยึดเกาะบนเซรามิกโดยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 4-2 (ข)



(ก)

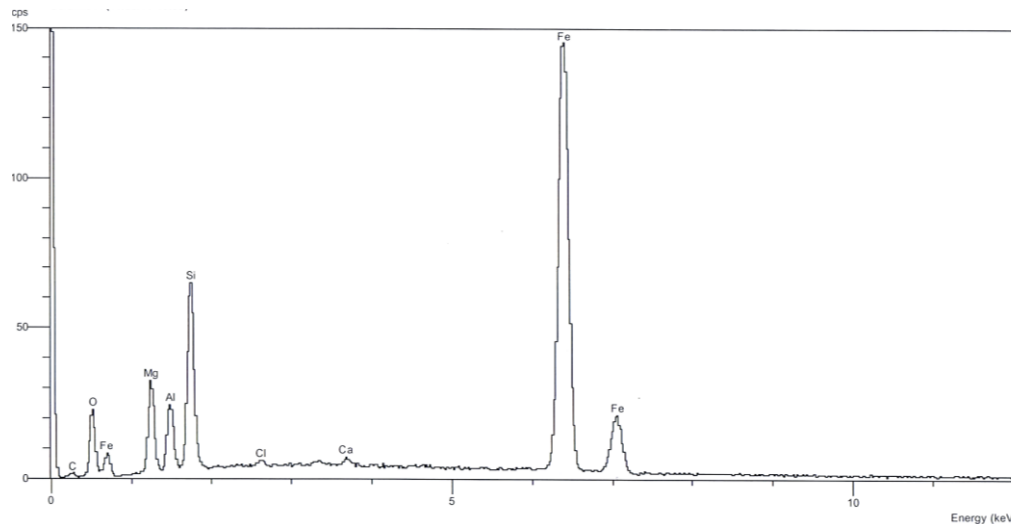


(ข)

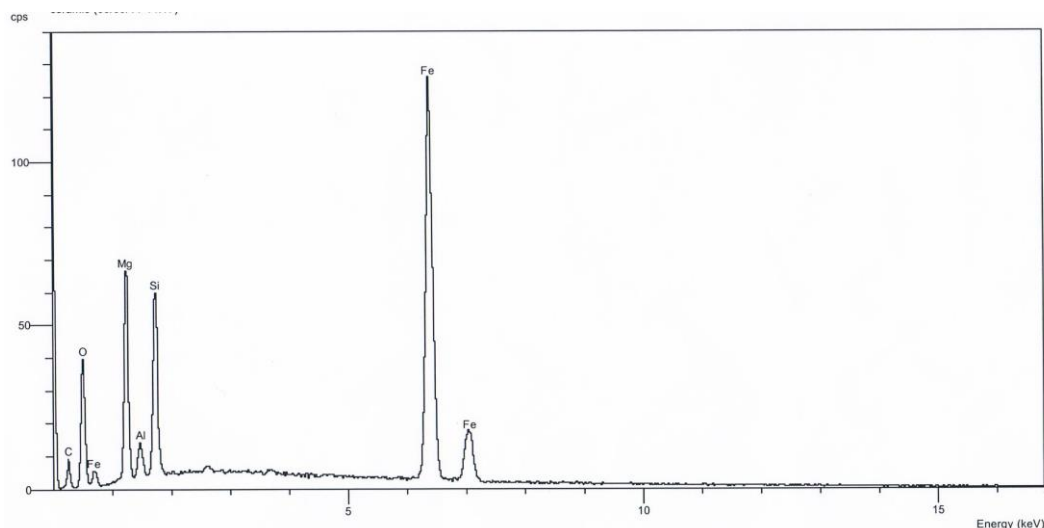
รูปที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวเซรามิกโฟมวงกลมก่อนเคลือบ (ก) และหลังเคลือบ (ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

2. การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยเครื่องวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ (EDX)

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



รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเซรามิกโพลีแบบวงกลมเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนก่อนใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยเครื่อง EDX



รูปที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวเซรามิกโพลีแบบวงกลมเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนหลังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยเครื่อง EDX

3. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Fe^{3+} ที่เคลือบที่ผิวเซรามิก

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไฮดรอนที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวเซรามิกทำได้โดยดึงตัวอย่างของสารละลายที่ได้จากการชะ (Leaching) ไฮดรอนที่เคลือบผิวเซรามิกด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น นำตัวอย่างสารละลายมาทดสอบด้วยวิธีการของฟิแนนโทรีน (APHA, 1985) วัดค่าเหล็กกรรม (Total Fe) โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) และกราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เหล็กกรรม จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดต่างๆ ก่อนและหลังการใช้งาน มีปริมาณ Total Fe, Fe^{2+} และ Fe^{3+} ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณ Fe , Fe^{2+} และ Fe^{3+} ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนที่เคลือบบนวัสดุตัวกลางชนิดต่างๆ ก่อนและหลังใช้งาน

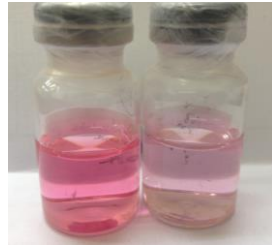
วัสดุตัวกลาง	เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) (mg Fe^{2+} /ชิ้นเซรามิก)		เหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) (mg Fe^{3+} /ชิ้นเซรามิก)		เหล็กรวม (Total Fe) (mg F/ชิ้นเซรามิก)	
	ก่อนใช้	หลังใช้	ก่อนใช้	หลังใช้	ก่อนใช้	หลังใช้
เซรามิกโฟมวงกลม $\text{Ø}10 \times 2 \text{ cm}$ (10ppi)	13	11	46	39.1	59	50.1
เซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม $8 \times 8 \times 2 \text{ cm}$ (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 การทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดการทดลองแบบเบบัทซ์

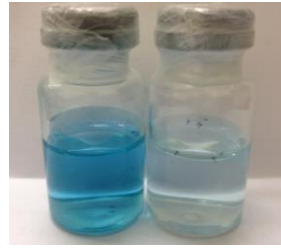
การศึกษาทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม ในระบบชุดการทดลองแบบเบบัทซ์ดังแสดงในรูปที่ 3-3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ pH ของน้ำสีสังเคราะห์ ความเข้มข้นสีข้อมในน้ำเสีย จำนวนชิ้นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติมออกซิเจน 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 C_1 คือ ความเข้มข้นของสี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่อยู่ในน้ำสีสังเคราะห์ที่สถานะเริ่มต้น และ C_2 คือ ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) หลังการบำบัด



(ก)

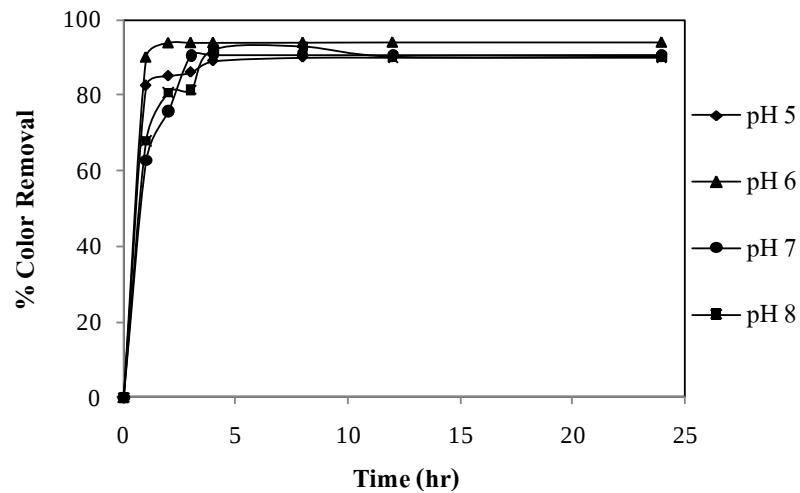


(ข)

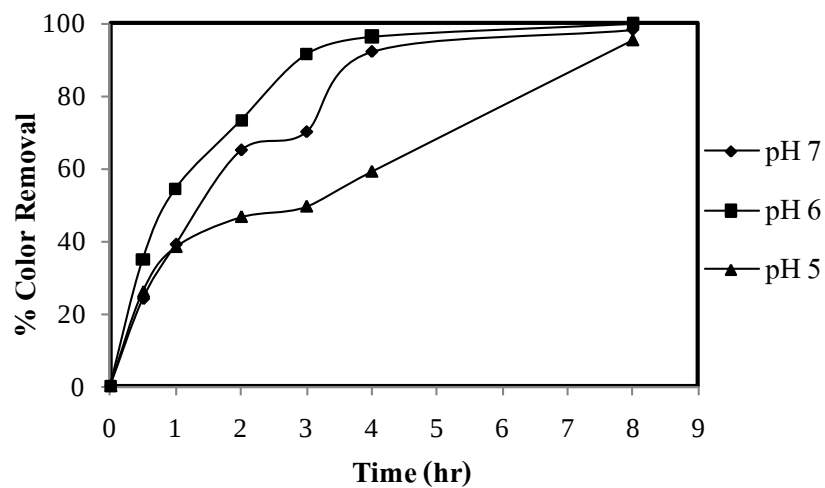
รูปที่ 4-5 แสดงตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนด้วยชุดทดลองแบบเบทซ์ ด้วยสีย้อม Reactive red (ก) Malachite green (ข)

1. ผลของ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์

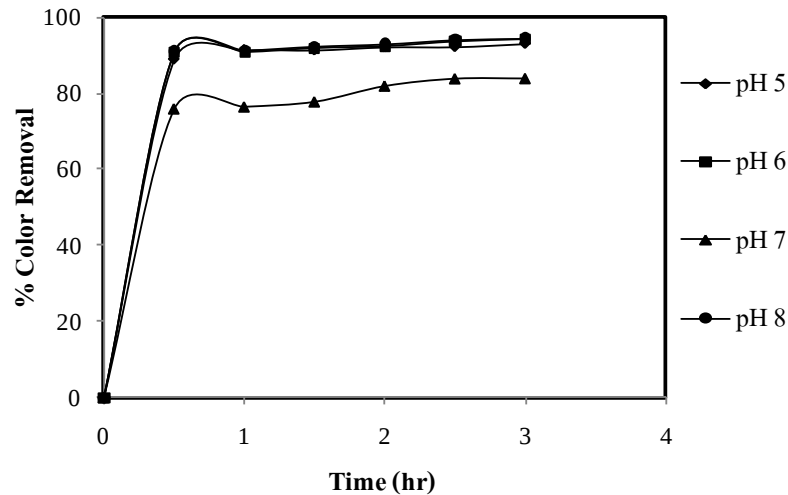
การศึกษาผลของ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนในชุดการทดลองแบบเบทซ์ ทำได้โดยการใช้สีย้อม 3 ชนิด คือ Reactive red, Reactive blue และ Malachite green กำหนดภาวะที่ทำการศึกษา คือ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe^{3+} 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 ในน้ำเสียสังเคราะห์ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบตช์



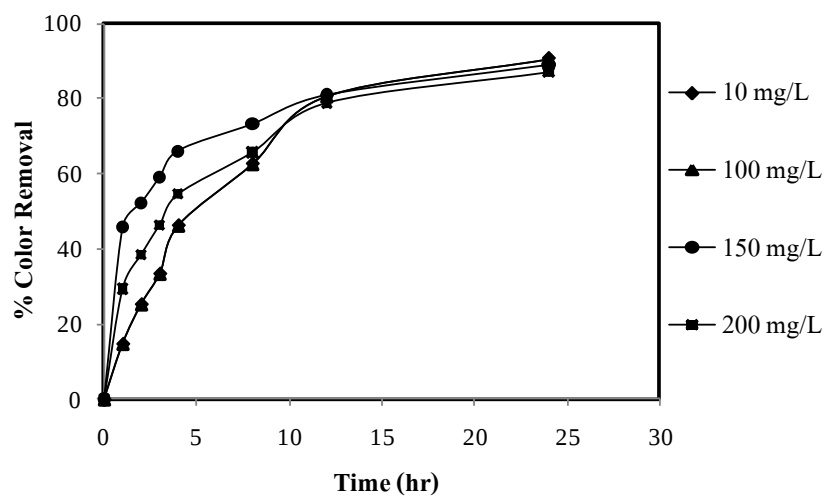
รูปที่ 4-7 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive blue 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบตช์



รูปที่ 4-8 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Malachite green 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

2. ผลของความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์

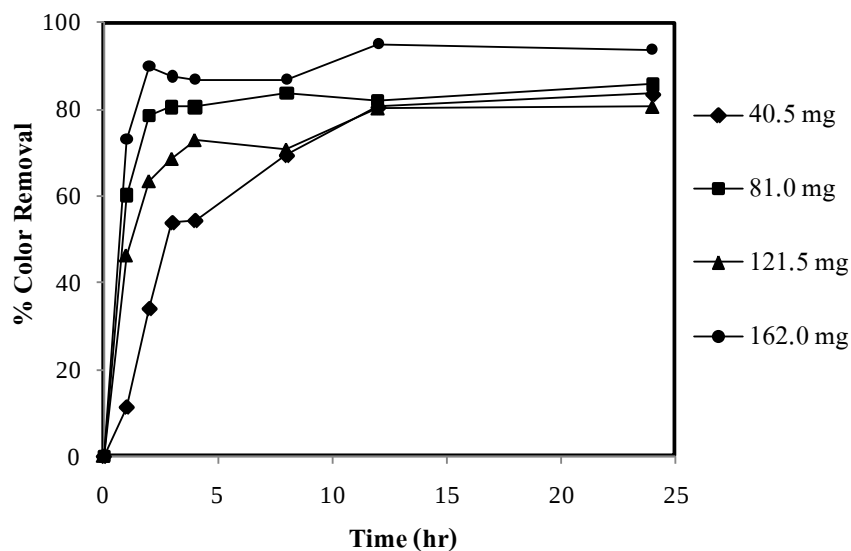
ผลของความเข้มข้นของสีในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Reactive red ในชุดการทดลองแบบแบทช์ที่ pH 6 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน Fe^{3+} 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ความเข้มข้นสี 10, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นสีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีโมเลกุลของสีมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลของสีจะเคลื่อนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปได้ง่าย ซึ่งจากการทดลอง พบว่า น้ำสีที่มีความเข้มข้น 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพสูง 95% ดังแสดงในรูปที่ 4-9



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

3. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของ Reactive red ของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบเบทช์ 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

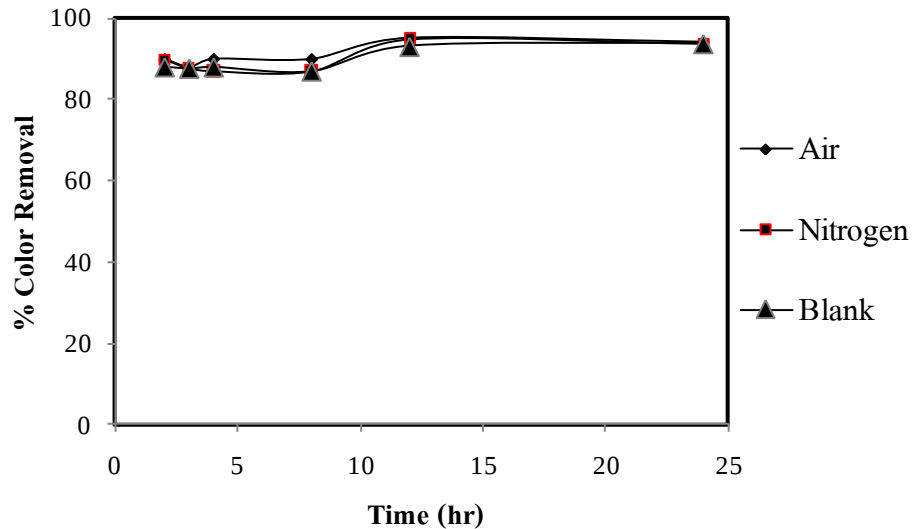


รูปที่ 4-10 ผลของจำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของ Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH 6 ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบเบทช์

4. ผลของการเติมอากาศต่อการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของการเติมออกซิเจน (O_2) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองแบบเบทช์ 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 การเติมอากาศเข้าระบบและการเติมแก๊สไนโตรเจนไม่ส่งผลที่แตกต่างกันของประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียเนื่องจากปริมาณ O_2 ที่อยู่ในน้ำเสียมีปริมาณเพียงพอสำหรับการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) เนื่องจากตัวเร่งชนิดไอออนที่เคลือบ

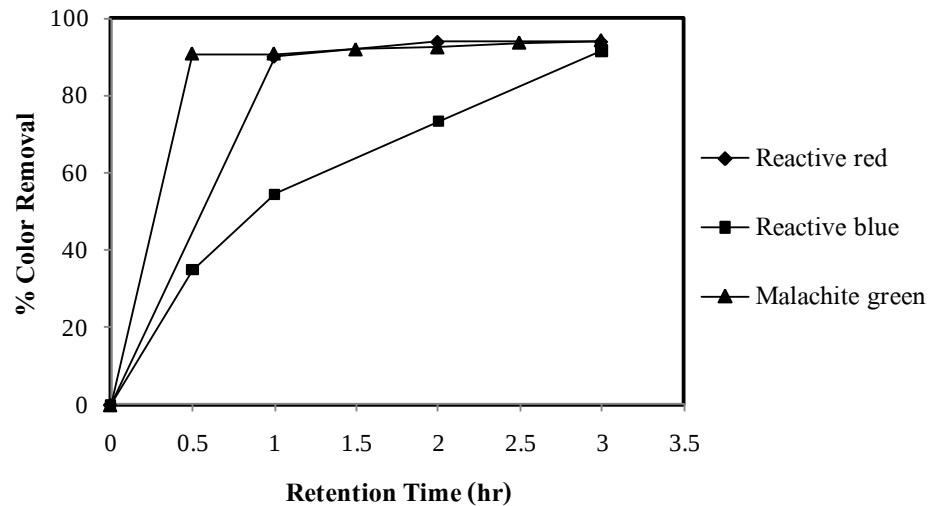
บนเซรามิกจะรีดิวซ์เฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ด้วย O_2 ในน้ำ กลับไปมาทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ผลการเติมอากาศและไนโตรเจนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมดังแสดงในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ผลของการเติมอากาศต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอน 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) การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ ที่ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและ pH 6 จำนวนตัวเร่งปฏิกิริยา 162 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ดำเนินการด้วยชุดการทดลองแบบแบทช์

6. ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียต่อค่า COD ของน้ำ

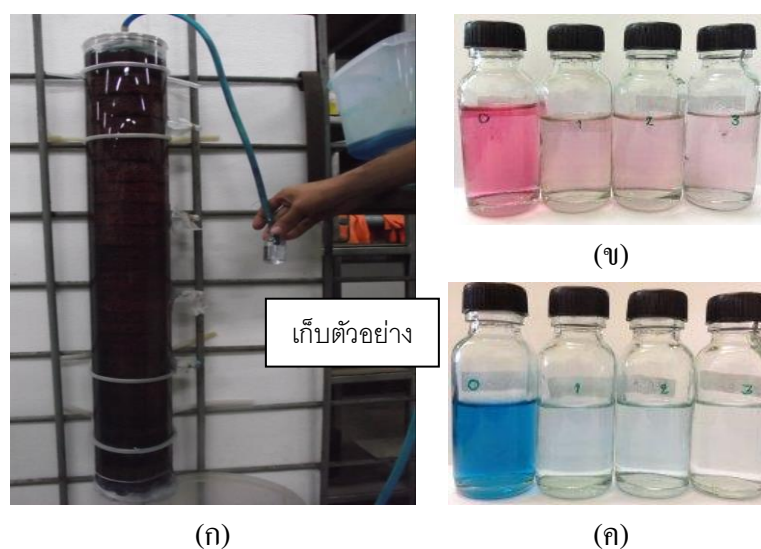
ผลของการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนต่อค่าความต้องการออกซิเจนของน้ำ ที่ทำได้โดยวิธีการทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ของน้ำในการกำจัดสีย้อมของน้ำเสีย สังกะสีในชุดการทดลองแบบแบทช์ ที่ pH 6 สีย้อมชนิด Reactive red, Reactive blue และ Malachite green ความเข้มข้นสีย้อม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 81 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร พบว่า ค่า COD ของน้ำหลังการบำบัดลดลงดังแสดงในตารางที่ 4-2 แสดงว่า ค่าความสกปรกของน้ำลดลงหรือน้ำเสีย หลังการบำบัดมีคุณภาพดีขึ้น น้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งกำหนด ว่าน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมต้องมีค่าต่ำกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีเพียงน้ำกลั่นและสีย้อมไม่มีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกอื่นๆ

ตารางที่ 4-2 COD ของน้ำเสียชนิดต่างๆ ก่อนและหลังบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน

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 ภายในคอลัมน์บรรจุตัวกลางเซรามิกที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนชนิดเซรามิกโฟมรูปร่างกลมและสีเหลืองเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เนื่องจากเซรามิกโฟมรูปร่างกลมมีพื้นที่สูงกว่าแบบสีเหลือง ใช้ปั๊มป้อนน้ำเสียจากถังเก็บ 1 (Storage tank 1) เข้าสู่ระบบทางด้านล่างของคอลัมน์บรรจุ เพื่อให้ให้น้ำเสียค่อยๆ ไหลแบบบังคับผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เกิดการสัมผัสพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง และไหลออกบริเวณท่อเก็บตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4-13 การทดลองกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา คือ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 ช้อน 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 มาใช้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน

ผลการทดลองการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องของสีข้อม 2 ชนิด คือ Reactive red และ Malachite green ตามการออกแบบการทดลองและสภาวะที่ศึกษาแสดงได้ดังนี้

1. ผลการบำบัดสีข้อมชนิด Reactive red

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

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

เมื่อ % Color Removal Efficiency คือ ร้อยละของประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียของระบบ กำหนดให้ C_0 คือ ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนไหลเข้าสู่ชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง และ C_1 คือ ความเข้มข้นของสีข้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร) ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่อง เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ประกอบไปด้วยความเข้มข้นสีข้อมในน้ำเสีย จำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสีย ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียโดยใช้ Multiple Regression Analysis

ตารางที่ 4-3 แสดงตัวแปรอิสระและผลตอบสนองของการกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red 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	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

จากข้อมูลประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอนด้วยชุดทดลองแบบไหลต่อเนื่องที่แสดงในตารางที่ 4-3 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียกับตัวแปรที่ทำการศึกษด้วยเทคนิค 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 (มิลลิลิตรต่อนาที)

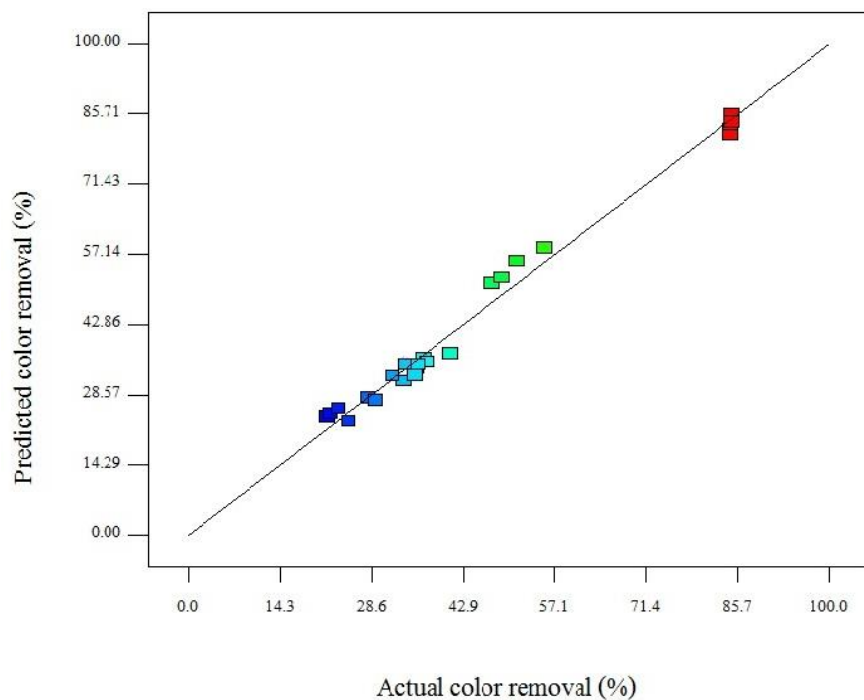
จากสมการ 4-3 แสดงผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร ความเข้มข้นของสีข้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำเสีย และผลการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการด้วยวิธี ANOVA โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่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

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองสำหรับกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย ตั้งเคราะห์ด้วยวิธี 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		

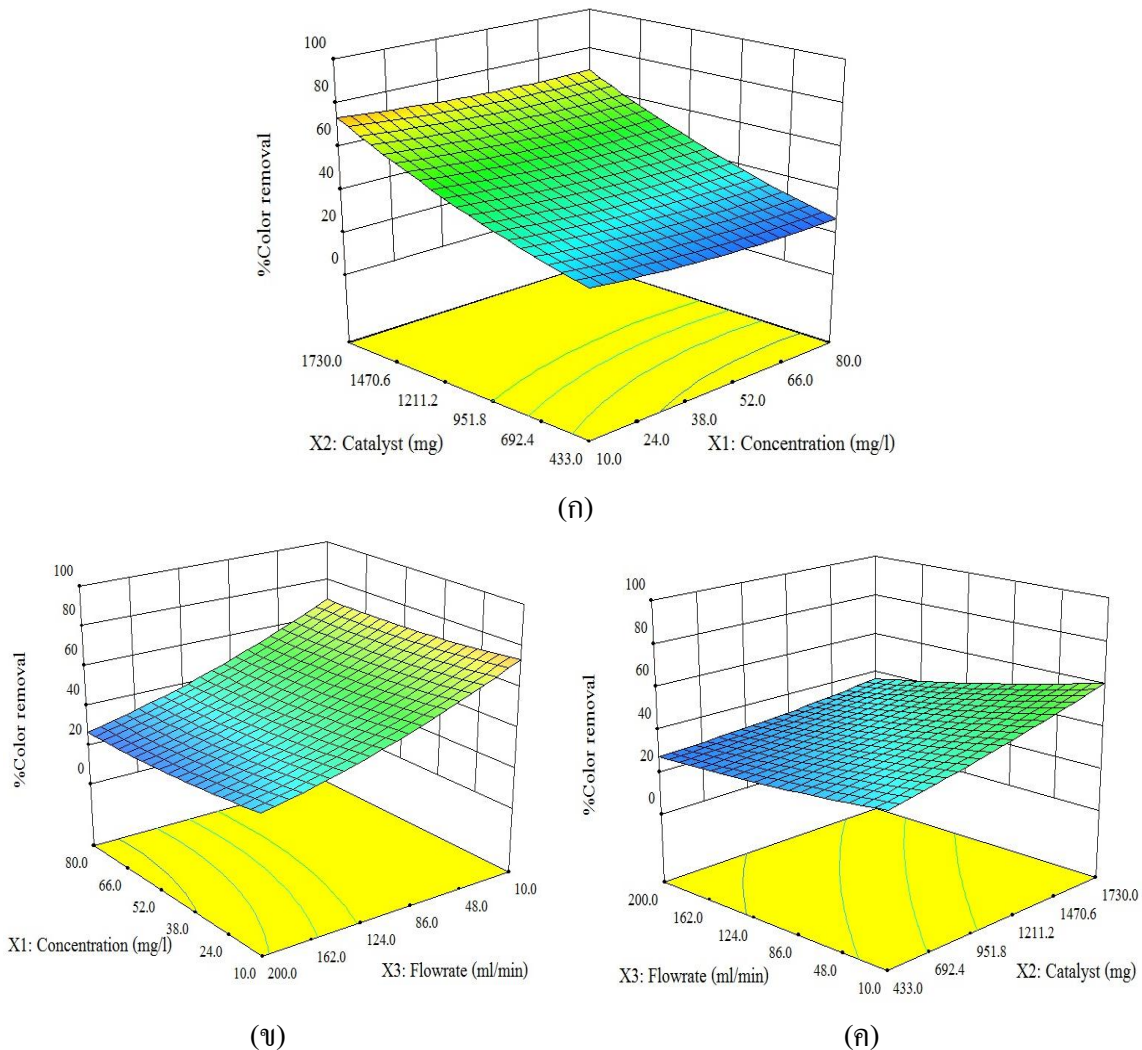
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองดังตารางที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียภายใต้ช่วงของเงื่อนไขการดำเนินงานดังข้อมูลที่ให้ไว้ในตาราง จะเห็นว่าตัวแปรที่ศึกษาทุกตัวที่ปรากฏในสมการมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรแต่ละตัวนั้น ถ้าตัวแปรใดมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่า P-value สูงกว่า 0.10 ถือว่าไม่มีนัยสำคัญจึงต้องตัดทิ้งไป (Korbahti *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 ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 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 ที่ได้จากการค่าทดลองและจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (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



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

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

1) ผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย

จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เมื่อพิจารณาผลของตัวแปรอิสระครั้งละ 2 ตัวแปรทำให้ได้กราฟ 3 มิติจำนวน 3 รูป ดังแสดงในรูปที่ 4-15 (ก) ที่แสดงผลของความเข้มข้นสีข้อมและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสีย ที่อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 56.49 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีข้อมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์หน้า x_1 ในสมการ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นลบ เนื่องจากความเข้มข้นสีข้อมที่เพิ่มขึ้นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่าเดิมทำให้

ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสีข้อมงที่ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-15 (ข) พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าเทอม x_2 ในสมการที่ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นบวกประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนชิ้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลสีข้อมทำปฏิกิริยากับสีข้อมก็มีมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้น

ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรความเข้มข้นของสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญแสดงได้ในเทอมของ x_2x_3 ดังแสดงในรูปของกราฟพื้นผิวดตอบสนอง 3 มิติ ในรูปที่ 4-15 (ค) อิทธิพลซึ่งมีสัมประสิทธิ์หน้าเทอม x_2x_3 ในสมการ 4-3 ซึ่งมีค่าเป็นลบ ส่งผลให้เมื่ออัตราการไหลและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมของระบบจะลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และ Dang *et al*, 2000

2) ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีข้อม Reactive red ในน้ำเสีย

จากสมการแบบจำลองจากสมการที่ 4-4 สามารถนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายค่าและหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design Expert Software อันจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัดได้สูงสุดและสามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะการดำเนินการของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของสีข้อม สัมประสิทธิ์ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสีย จากการวิเคราะห์ด้วยแนวทางข้างต้น พบว่า สภาวะการดำเนินการที่เหมาะสม (Optimum condition) ที่ได้จากการกำจัดสีข้อมชนิด Reactive red ในน้ำเสียสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอน ที่ความเข้มข้นสีข้อม 20-80 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 432.5-1,730 มิลลิกรัม อัตราการไหลของน้ำเสีย 20-200 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมสูงสุด 84.85% โดยแสดงไว้ดังตารางที่ 4-5 พบว่า ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำที่ได้จากการทดลองสูงกว่าค่าที่คาดการณ์ 4.6% ไว้ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 5 เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ตารางที่ 4-5 แสดงภาวะที่เหมาะสมและการทำนายผลด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในการกำจัดสีของชนิด Reactive red ในน้ำเสียด้วยคอลัมน์บรรจุแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน

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. สีของชนิด Malachite green

จากการศึกษาการกำจัดสีของชนิด Malachite green ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออน โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยเทคนิค RSM แบบ CCD ในการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4-6 และทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมในการทดลองที่ 18-20 เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวแปรอิสระให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทำให้ได้ผลของค่าประสิทธิภาพ (Response) การกำจัดสีของในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอออนของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-4 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (x) ที่ประกอบไปด้วยความเข้มข้นสีของในน้ำเสีย จำนวนชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลของน้ำเสีย ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (y) ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของในน้ำเสียโดยใช้ 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 สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียกับตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยเทคนิค 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)

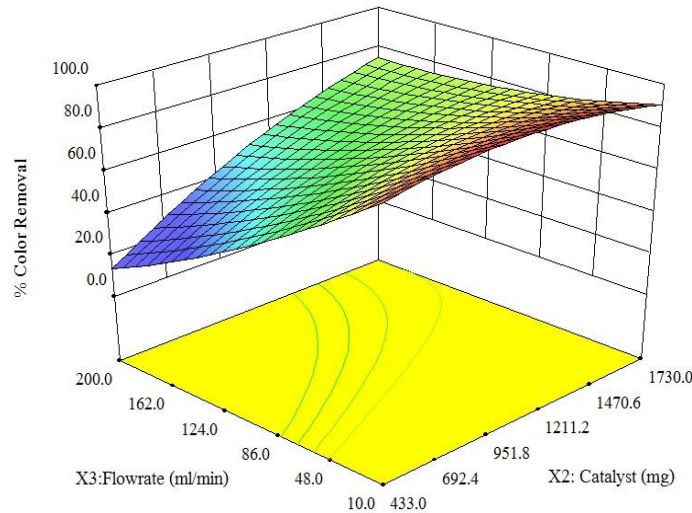
จากสมการ 4-4 แสดงผลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร ความเข้มข้นของสีข้อม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลของน้ำเสีย และผลการปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของสมการด้วยวิธี ANOVA โดยแสดงผลของรายละเอียดไว้ดังตารางที่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

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



รูปที่ 4-17 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของ X_2 และ X_3 ต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

1) ผลของตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย

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

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำเสียที่ความเข้มข้นของสีย้อมคงที่ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4-17 (ก) พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าเทอม X_2 ในสมการที่ 4-4 ซึ่งมีค่าเป็นลบประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนชั้นของเซรามิกเพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลสีย้อมทำปฏิกิริยากับสีย้อมก็มีมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียเพิ่มขึ้น

จากกราฟ 3 มิติ ในรูปที่ 4-17 เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราการไหลของน้ำดังแสดงในรูปที่ 4-18 (ก) พบว่าการเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามสัมประสิทธิ์หน้าเทอม X_2X_3 ในสมการ 4-4 ซึ่งมีค่าเป็นบวกเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนชั้นของเซรามิกโฟมที่เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และเมื่อพิจารณาอิทธิพลในเทอมของอัตราการไหลของน้ำเสียจากรูปที่ 4-17 (ข) จะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร X_2X_3 ที่มีค่าเป็นบวก เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของระบบจะลดลงเนื่องจากเวลาที่โมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในระบบน้อยลง โอกาสที่สีย้อมสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงสอดคล้องกับงานวิจัยของวรรณวิภา, 2547 และ Dang *et al*, 2000

2) ภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อม Malachite green ในน้ำเสีย

จากสมการแบบจำลองจากสมการที่ 4-4 สามารถนำมาใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมชนิด Malachite green ในน้ำเสียในช่วงของตัวแปรที่ทำการศึกษา โดยสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายค่าและหาภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design Expert Software อันจะทำให้ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ทำให้ผลการตอบสนองพื้นผิวหรือประสิทธิภาพการบำบัดได้สูงสุด 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 มิลลิกรัมต่ออนาที 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	
X_1	X_2	X_3	Predict	Experiment
7	692	161	93.87	93.62

4.4 การบำบัดน้ำทิ้งจริงของกลุ่มผลิตผ้าบาติกด้วยระบบแบบต่อเนื่อง

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



(ก)

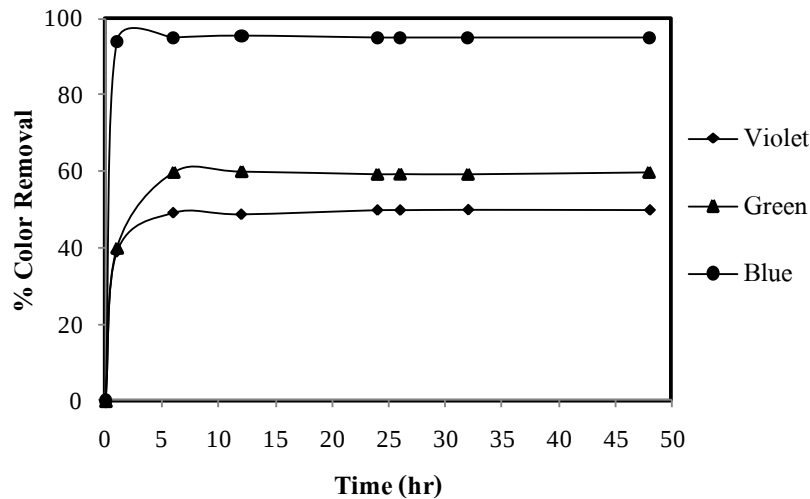


(ข)



(ค)

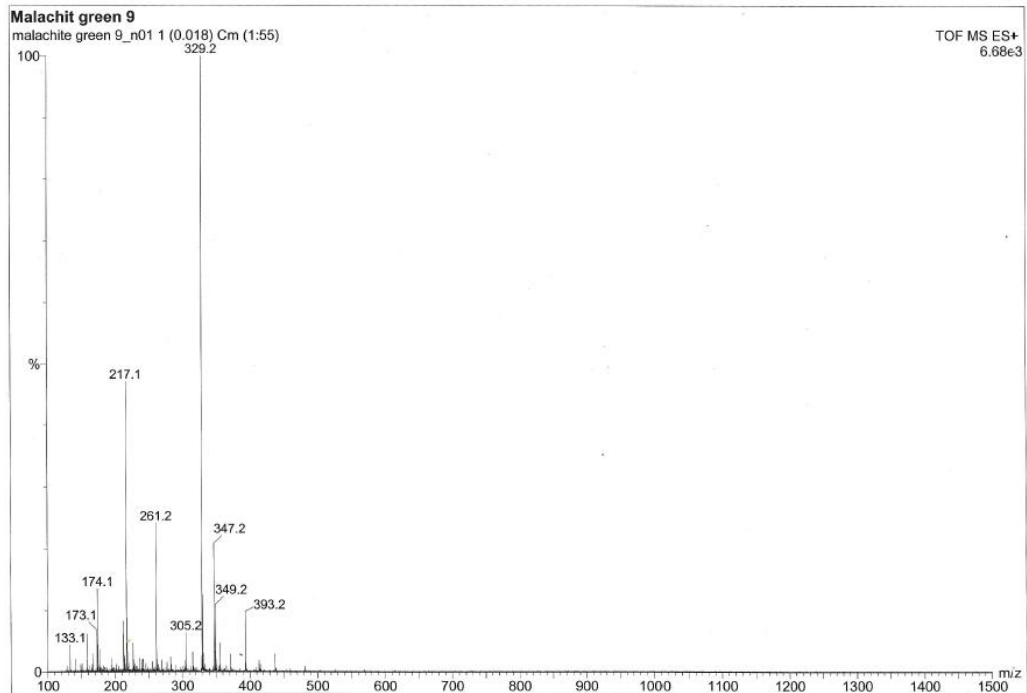
รูปที่ 4-18 แสดงลักษณะน้ำเสียจริงจากชุมชนที่มีการผลิตผ้าบาติก (ก) ชุดเครื่องมือกำจัดสีย้อมแบบต่อเนื่องขนาดชุมชน (ข) น้ำเสียก่อนบำบัดและหลังบำบัด (ค)



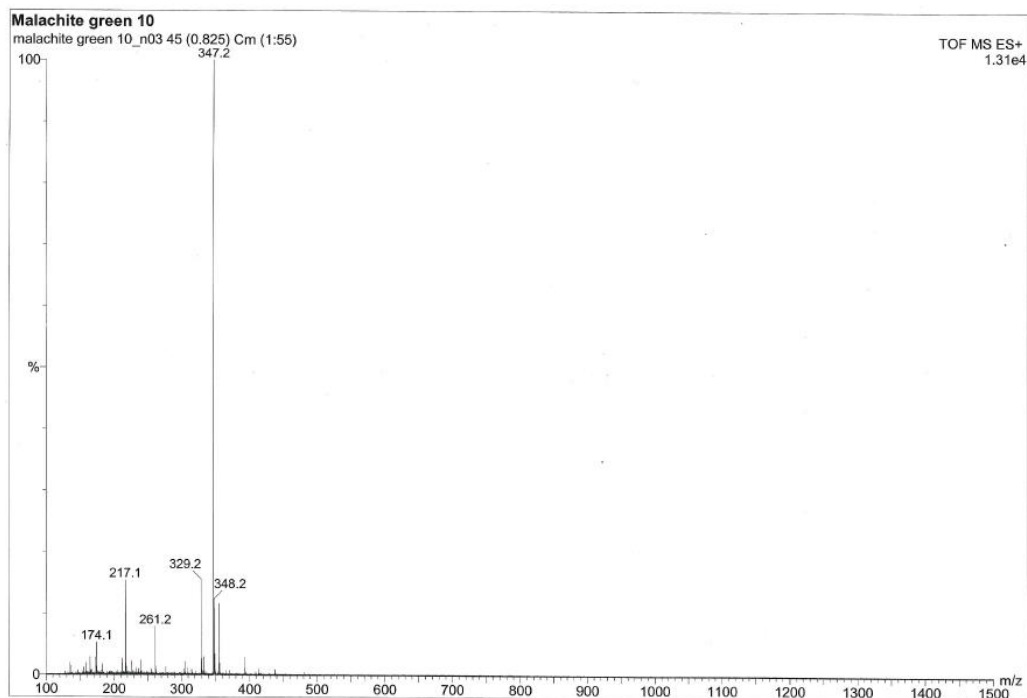
รูปที่ 4-19 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไฮดรอกซิลแบบวงแหวนในชุดการทดลองกำจัดสีในน้ำเสียจริงระดับชุมชนที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที

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

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



รูปที่ 4-20 แสดง Peak โครงสร้างโมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในสีย้อมชนิด Malachite green ก่อนการบำบัดด้วย
เทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)



รูปที่ 4-21 แสดง Peak โครงสร้างโมเลกุลต่างๆ ที่อยู่ในสีย้อมชนิด Malachite green หลังการบำบัดด้วย
เทคนิค Liquid Chromatography-Mass Spectrometer (LC-MS)

4.6 การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์

4.6.1 การวิเคราะห์ต้นทุน

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนตัวกลางเซรามิกมีค่าใช้จ่ายในการผลิต ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายจากสารเคมี ค่าใช้จ่ายจากวัสดุตัวกลาง ค่าใช้จ่ายจากพลังงานไฟฟ้า และเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนผ่านการใช้งานจนเสื่อมสภาพก็สามารถนำวัสดุตัวกลางมาเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ได้ และสามารถคำนวณจำนวนหน่วยการใช้งานพลังงานไฟฟ้าจากสมการที่ 4-5 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4-9

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

ตารางที่ 4-9 ค่าใช้จ่ายจากไฟฟ้าในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกโพรเซสเซอร์ 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 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกวงแหวนโดยใช้ชุดอุปกรณ์กำจัดสีย้อมในน้ำเสียขนาดชุมชนดังรูปที่ 4-20 (ข) ปริมาณของคอลัมน์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยใช้คอลัมน์ทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกวงแหวน 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

การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนกับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยการใช้โพไลอะลูมิเนียมคลอไรด์และปฏิกิริยาเฟนตัน ที่ปริมาณน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม 500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยวิธีการต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 1 ปี โดยออกแบบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนโดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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 ลูกบาศก์เมตรด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดไอรอนเคลือบบนเซรามิกโฟมสี่เหลี่ยม

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 การเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ

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