



การหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสีย้อม (สีแดงสมนึก เบอร์ 9) ด้วยปฏิกิริยา คล้ายเฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยา ผงเหล็ก โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ

Box-Behnken Design (BBD)

Optimization of Decolorization (Somnauk's Red Dye No. 9) Using Fenton-Like Reaction Over Iron Powder by Box-Behnken Design (BBD)

ณัฐวิวัฒน์ ศรีขาว (Natwat Srikhao)*, ** กฤตินี พิลลาโฮม (Kritin Pilahom)***, ***

วิภารัตน์ นิสากัย (Wiparat Nisapi)***, **** ดร.สุชาตินี เนรมิตตกพงษ์ (Dr.Sutasinee Neramittagapong)***, *****

ดร.อาพิศย์ เนรมิตตกพงษ์ (Dr.Arthit Neramittagapong)¹**, *****

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของการศึกษาการทดลองนี้เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุด ในการสลายสีย้อมผ้าสีแดงสมนึก เบอร์ 9 (SR09) ด้วยปฏิกิริยาคลายเฟนตันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken design (BBD) และการวิเคราะห์แบบพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดต่อการสลายสีย้อม โดยมีตัวแปรอิสระคือ pH เริ่มต้น ปริมาณผงเหล็ก และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีตัวแปรตามคือประสิทธิภาพในการสลายสี ในสภาวะการทดลองได้กำหนดให้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นและเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 100 ppm และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการสลายสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการสลายสีจะลดลงเมื่อเพิ่มทั้งสองปัจจัยนี้จนถึงระดับหนึ่ง เนื่องจากเมื่อปริมาณผงเหล็กและความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากเกินไป จะกลายเป็นตัวดักจับอนุมูลไฮดรอกซิล นอกจากนี้ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าสมการควอดราติกสามารถใช้ในการทำนายได้ ($R^2 = 0.985$) โดยภาวะที่ดีที่สุดสามารถสลายสีย้อมได้ถึง $96 \pm 0.53\%$ (pH 3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.464 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 45.5 mM) โดยที่ประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้ซ้ำถึง 5 รอบ นอกจากนี้ยังพบว่าในแต่ละรอบการทดลองมีการปนเปื้อนของเหล็ก และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (Total organic carbon) น้อยกว่า 2 ppm และ 10 mg/L ตามลำดับ ส่งผลให้น้ำหลังการบำบัดผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งนิคมอุตสาหกรรมของประเทศไทย

¹ Correspondent author: artner@kku.ac.th

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** นักวิจัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่าย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** บัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**** อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

***** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ABSTRACT

The objective of this study was to find the optimal condition for Somnauk's red dye No. 9 (SR09) decolorization using Fenton-like process. The experiments were performed in a batch reactor. A set of experiment was designed using Box–Behnken design (BBD) and the response surface analysis was used to optimize for the maximum decolorization efficiency. An initial pH of solution, an amount of iron-powder, and an initial H_2O_2 dose were selected to be the independent variables while decolorization efficiency was considered as the response of functions. The initial concentration of SR09, and the reaction time were kept constant of 100 ppm and 2 hour, respectively. It was found that decolorization efficiency increased with an increasing of H_2O_2 dose and a catalyst loading however it decreased when the H_2O_2 dose and catalyst loading were up to a certain level. High concentrations of iron-powder and high H_2O_2 dose adversely affected to the decolorization efficiency due to both of them were acting as hydroxyl radical scavenging. The results were agreed well with a quadratic model ($R^2 = 0.985$). The optimal pH, catalyst loading, and H_2O_2 dose were found to be 3, 0.464 g/L, and 45.5 mM, respectively, and the $96 \pm 0.53\%$ removal efficiency was achieved. Decolorization efficiency through iron-powder/ H_2O_2 process was not decreased significantly even after 5 successive cycles, moreover, it was found that leached iron and TOC (Total organic carbon) were less than 2 ppm and 10 mg/L in each batch respectively. The wastewater after treatment is compliance with the Thailand-industrial estate water discharging standard.

คำสำคัญ: ปฏิกริยาคัลยเฟนตัน การสลายสีย้อมผ้า ผงเหล็ก

Keywords: Fenton-Like reaction, Degradation of dye, Iron-powder

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอ และเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอุตสาหกรรม และเพื่อให้มีความดึงดูด น่าสนใจจึงต้องมีการย้อมสีกันต่างๆ สีย้อมประเภทอะโซมิกการใช้มากในเชิงพาณิชย์ (60-70%) จากสีย้อม 10,000 ชนิด [1- 2] เนื่องจากประกอบไปด้วยหมู่ของ (-N=N-) ซึ่งมีพันธะที่แข็งแรงทำให้สีย้อมมีความคงทน ปัญหาที่ตามมาคือสี ย้อมถูกปล่อยทิ้งลงในแหล่งน้ำหลังกระบวนการผลิต ทำให้เกิดน้ำเสียตามมา ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและ สิ่งแวดล้อม เนื่องจากโครงสร้างพันธะของสีย้อมประเภทนี้มีความคงทนทำให้ย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้แสงลอดผ่าน แหล่งน้ำไม่ได้จึงทำให้เกิดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังพบว่ามีความเป็นพิษสูงและประกอบไปด้วยสารก่อมะเร็ง [3-4]

จากค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม กำหนดค่าความเข้มข้นในหน่วยของ American Dye Manufacturers Institute (ADMI) ให้มีค่าไม่เกิน 300 AMDI จากเดิมกำหนดไว้เพียงไม่ให้เป็นที่รังเกียจ แนวทางการกำจัดของเสียก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ นั้นเป็นวิธีที่สามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจาก สิ่งปนเปื้อน ต่างๆ เช่น โลหะหนัก และสีของน้ำ ที่อาจส่งผลเสียต่อธรรมชาติ มีหลายวิธี เช่น กระบวนการออกซิเดชัน ต่างๆ อาทิ โฟโตคะตะไลซิส โอโซนชัน ปฏิกริยาเฟนตัน [5-8] ในขณะที่การใช้ตัวดูดซับเช่น บิทุมินัส [9] และถ่านกัมมันต์ แม้จะ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี แต่สีนั้น ไม่ได้ถูกสลายไปเพียงแต่ถูกดูดซับเข้าไปอยู่ภายในตัวดูดซับเท่านั้น เมื่อ ถูกฝนหรือน้ำไหลผ่าน สีสามารถละลายออกมาได้ [5] ทำให้เป็นปัญหาเช่นเดิม มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการสลายสี ย้อมด้วยปฏิกริยาคัลยเฟนตัน ซึ่งมีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกริยาแบบวิวิธพันธ์ โดยใช้ Fe_2O_3 บนตัวรองรับ SiO_2 [10] ทำให้มีการนำเข้าสู่สารเคมีทั้ง $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ และ Tetraethyl Orthosilicate เพื่อที่จะใช้เป็นแหล่งของเหล็กและตัว



รองรับตามลำดับ โดยมีสารช่วยยึดติดโครงสร้างเป็น Cetyltrimethyl Ammonium Bromide ทำให้มีค่าใช้จ่ายทั้งราคา สารเคมีและราคาค่าขนส่ง ภาย ระยะเวลาในการรอ รวมถึงขั้นตอนในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ซับซ้อน ผู้วิจัยได้ มองเห็นการนำผงเหล็กสำเร็จรูปมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย และปฏิกิริยา นี้สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ รวมถึงสารประกอบอะโรมาติก เช่น สีข้อมผ้า สารกันบูด ยากำจัดแมลง เป็นต้น ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) โดยปฏิกิริยาคัลลายเฟนตันที่มีเหล็กบนตัวรองรับที่เป็น ของแข็ง ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วได้เป็นอนุมูลไฮดรอกซิล (OH[•]) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ (1-5) [4, 11-12] โดยที่ X คือตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง



ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สีข้อมสมนึก สีแดงเบอร์ 9 ซึ่งเป็นสีประเภทอะโซที่วิสาหกิจชุมชนนิยมใช้ เนื่องจาก สามารถเข้าถึงได้ง่ายตามวัสดุภัณฑ์ในราคาถูก ซึ่งจากการวิเคราะห์น้ำทิ้งหลังการย้อม พบว่าความเข้มข้นสีข้อมขึ้นต่ำอยู่ที่ 100 ppm จึงได้นำมาศึกษาการสลายสีข้อมโดยใช้ปฏิกิริยาคัลลายเฟนตันที่มีผงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยา เฟนตันมีข้อบกพร่องตรงที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปสารละลายจึงทำให้เหล็กปนไปกับน้ำ หลังการบำบัดจะต้องทำการ แยกออกก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยข้อจำกัดนี้จึงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของแข็งซึ่งง่ายต่อการแยกและการ นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีการควบคุมตัวแปรต่างๆ คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) ที่ใช้ในช่วง 0.1-1 g/L ค่า pH เริ่มต้นที่แตกต่างกัน (ในช่วง 3-7) และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ (20 – 60 mM) โดยทำใน ระบบปฏิกรณ์แบบกะ จากนั้นวัดค่า การดูดกลืนสีจากเครื่อง UV-Vis spectrophotometer รวมถึงค่า TOC (Total Organic Carbon) เพื่อหาประสิทธิภาพในการสลายสีข้อม ว่ามีประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอ และสามารถนำไปใช้ใน งานอื่นๆได้ ในขณะที่การศึกษาผลของแต่ละปัจจัยรวมถึงปัจจัยร่วม สามารถหาได้จาก การออกแบบการทดลองแบบ Box- Behnken Design โดยอ้างอิงจากการหาภาวะที่เหมาะสมในการฉีดล้างตระแกรงเพื่อลดการสูญเสียแป้งมันสำปะหลัง [13] ทางผู้วิจัยจึงได้นำมาปรับใช้ในการสลายสีข้อม เพื่อดูผลของปัจจัยต่างๆและหาสภาวะที่ดีที่สุดจากตัวแปรควบคุม รวมทั้งอธิบายผลการสลายสีข้อมในทางสถิติ

วิธีการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

สีข้อมผ้าสมนึก (Azo dye) สีแดง เบอร์ 9 ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2 แหล่ง ในแหล่งแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิธี- พันธุ์ ผงเหล็ก (99.64% Gammaco, Thailand) ในแหล่งที่ 2 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ Ferrous Sulphate FeSO₄·7H₂O (Ajax Finechem Pty Ltd, Auckland, New Zealand) เอทานอลบริสุทธิ์ (99.8% Analar NORMAPUR ® ACS, Reag.Ph.Eur., France) H₂O₂ 30% (QR&C, New Zealand) HCl (RCI Labscan Limited, Thailand) NaOH (Ajax Finechem Pty Ltd, Auckland, New Zealand) วัสดุสำหรับกรองสาร Nylon Filter Membrane (Syring filter 0.45

Micron CNW, China) และเครื่องมือวิเคราะห์ UV-Vis (SPECORD, Analytik Jena, Germany) ในการทดลองใช้น้ำ RO (Reverse Osmosis) ทั้งหมด

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) นำผงเหล็กช่วงขนาด (100-500 mesh) มาล้างด้วยน้ำ RO (Reverse Osmosis) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผงเหล็กมาล้างต่อด้วยเอทานอล บริสุทธิ์ 99% และทิ้งไว้ให้แห้งในตู้ดูดควัน และนำเข้าตู้อบเพื่ออบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) นำ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ มาละลายในน้ำ RO กวนจนไม่พบตะกอน ความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายจะถูกปรับให้เท่ากับปริมาณของผงเหล็กโดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการสลายสีข้อมในการทดลอง

3. การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเทคนิค N_2 Adsorption-Desorption (ASAP 2010, Micromeritics, USA) โดยใช้สมการของ BET , วิเคราะห์องค์ประกอบของเหล็ก โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (SEA1000A, Seiko Instruments GmbH, Germany) และปริมาณของเหล็กที่ละลายในน้ำหลังการบำบัดโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAAnalyst 100, Perkin Elmer instrument, USA)

4. การสลายสีข้อม (สีแดงสมนิก เบอร์ 9) ด้วยปฏิกิริยาคัลลายเฟนตัน

ในการวัดการสลายสีข้อมสี ทำในสภาวะที่ออกแบบการทดลองโดยเทคนิค BBD ภายใต้อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะปริมาตรสารละลาย 500 mL ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.1-1 g/L ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 20-60 mM และค่า pH เริ่มต้น 2-7 โดยใช้สีข้อมความเข้มข้น 100 ppm โดยมีการเก็บตัวอย่างความเข้มข้นสีก่อนและหลังทำปฏิกิริยา เพื่อนำไปหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยที่ % Decolorization Efficiency (% DE) ที่สภาวะใดๆ หาได้จากสมการที่ 6 [12]

$$(\%DE) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ (% DE) คือร้อยละการย่อยสลายสี โดย C_0 และ C_t คือความเข้มข้นสีในสารละลายที่เวลาเริ่มต้น และเวลาใดๆ ตามลำดับ โดยทำการวัดที่ความยาวคลื่น 513 nm

สมการ Quadratic ทางสถิติที่ใช้เป็นสมการช่วยในการทำนายการทดลองโดยหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยเทคนิค least square of error

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \pm \varepsilon \quad (7)$$

เมื่อ Y คือ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสี (%DE) β_0 ถึง β_9 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย X คือ ตัวแปรอิสระ ในที่นี้มี 3 ปัจจัยคือ X_1 X_2 และ X_3 (pH เริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามลำดับ) และ ε คือค่าความผิดพลาดในการทดลอง

5. การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design

เพื่อให้แต่ละปัจจัยและตัวแปรอิสระมีผลเท่ากันไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาของสาร จึงกำหนดให้แต่ละปัจจัยเป็น -1 0 1 ซึ่งในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design นั้นใช้ 3 ปัจจัยในการออกแบบ คือ pH เริ่มต้นของ



สารละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของ H_2O_2 ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 จากการออกแบบมีทั้งหมด 15 สภาวะ แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธีทางสถิติ

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลจากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก) โดยใช้เทคนิคของ BET พบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ $3.932 \text{ m}^2/\text{g}$ และผลจากเครื่อง XRF พบว่ามีเหล็กเป็นส่วนประกอบร้อยละ 99.64 โดยน้ำหนัก และมีรายงานการใช้ผงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีการระบุสถานะของผงเหล็กว่าเป็น Fe^0 [11] เนื่องจากสามารถใช้แม่เหล็กดูดได้ และสามารถทำปฏิกิริยาคัลยเฟนตันได้ ดังสมการที่ (1-5)

2. ผลการย่อยสลายสีย้อม (สีแดงสมนึก เบอร์ 9) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design

จากการศึกษาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ที่ออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design โดยคำนวณค่า (%DE) สีแดงสมนึก เบอร์ 9 ตามสมการที่ 6 และได้แสดงผลในตารางที่ 2 เมื่อนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic ดังสมการที่ 7 โดยใช้เทคนิค Least Square of Error เพื่อสร้างสมการในการทำนายผลการทดลองดังตารางที่ 3 จากตารางที่ 3 สามารถนำข้อมูลสัมประสิทธิ์มาคำนวณในสมการ (7) และพิจารณาร่วมกับภาพที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยภาพที่ 1 (ก) Normal Probability Plot ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบการแจกแจงของความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโดยบ่งบอกได้ว่าการกระจายตัวของค่าบนเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ ภาพที่ 1 (ข) Versus Fits เป็นกราฟที่ใช้บอกถึงความเสถียรของความแปรปรวนซึ่งไม่ว่าค่า fitted value จะมากหรือน้อย แต่ค่า residual ยังกระจายตัวอยู่รอบๆ ศูนย์จึงบ่งบอกได้ว่ามีความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดนั้นคงที่และมีความน่าเชื่อถือ ภาพที่ 1 (ค) Histogram เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นถึงความเบี่ยงเบนของข้อมูลว่ามีลักษณะการกระจายตัวที่ดีหรือไม่ จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายกับ รูปประฆังคว่ำเบ้ขวาเพียงเล็กน้อยโดยรวมมีแนวโน้มเข้าหาจุดศูนย์กลาง เป็นการกระจายตัวที่เป็นไปตามปกติ และภาพที่ 1 (ง) Versus Order เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเมื่อเทียบกับลำดับการทดลองซึ่งไม่พบว่ามีลักษณะเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและมีการกระจายตัวที่ดี ตามลำดับ จากข้อมูลสถิตินี้บ่งบอกถึงความถูกต้องของข้อมูลซึ่งมีความอิสระต่อกันรวมถึงมีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และไม่มีข้อมูลใดที่แสดงถึงความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ จากตารางที่ 3 และภาพที่ 1 สามารถเขียนสมการทำนายผลได้ดังสมการที่ 8 ซึ่งเป็นสมการแบบ Coded units

$$Y = 49.41 - 39.34X_1 - 4.13X_2 + 5.16X_3 + 10.75X_1^2 - 14.35X_2^2 - 5.91X_3^2 + 1.51X_1X_2 + 1.41X_1X_3 + 1.24X_2X_3 \quad (8)$$

จากผลการทดลองและสมการที่ใช้ในการทำนายผลการทดลอง (8) นั้นสามารถพิสูจน์ค่าความเชื่อถือได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการทำนายและค่าของการสลายสีย้อมจากการทดลอง (ภาพที่ 2) ผลที่ได้พบว่าค่าจากการทดลองอยู่บนเส้นตรงการทำนาย และเมื่อเทียบพิจารณาการสลายสีตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปจนร้อยละ 100 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 ในขณะที่ค่าร้อยละการสลายสีที่ต่ำกว่าร้อยละ 20 มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 5 เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสมการทำนาย แต่อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าประมาณ 5 ppm เมื่อเทียบกับความเข้มข้นจริง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สมการที่ (8) ใช้ในการทำนายผลการทดลองนี้ได้ เพื่อความแม่นยำของข้อมูลจึงต้องไปวิเคราะห์จากค่า F และ P_{value} จากตารางที่ 4 เพื่อหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการสลายสีย้อม

นอกจากนี้ข้อมูลทางสถิติยังบ่งบอกถึงปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อการสลายสีข้อม (สีแดงสมนึก เบอร์ 9) ดังภาพที่ 3 โดยที่ ภาพที่ 3 (ก) แสดงให้เห็นเห็นว่า pH มีผลมากที่สุดต่อการสลายสีข้อม ในขณะที่ ภาพที่ 3 (ข) และภาพที่ 3 (ค) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีผลเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ pH ซึ่งสามารถยืนยันได้จากค่า F ใน ตารางที่ 4 จะพบว่าค่า F ของ pH มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีค่าเท่ากับ 285.66 4.91 และ 3.15 ตามลำดับ ใน ส่วนของปัจจัยที่มีผลแบบร่วม (Interaction) แสดงในภาพ 4-6

ภาพที่ 4 แสดงผลของ pH และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าช่วง pH ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 3-3.25 หาก pH เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละการสลายสีลดลง เนื่องจากความไม่เสถียรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และศักยภาพในการออกซิไดซ์ของอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง [2, 4, 14-15] รวมถึง Fe^{2+} ตกตะกอนและเสื่อมสภาพ [12] ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีช่วงที่เหมาะสม 0.2-0.6 g/L เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นเป็นผลให้ร้อยละการสลายสีลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่มีการเพิ่มปริมาณผงเหล็กมากขึ้นไปในการสลายสีข้อมโดยใช้ปฏิกิริยาคัลลิกแทนต์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีข้อมลดลงเนื่องจาก $X-Fe^{2+}$ ที่มากเกินไปจะประพุดตัวเป็นตัวดักจับอนุมูลอิสระ [11, 16-17] ดังสมการที่ (3) จากผลทางสถิติในตารางที่ 3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ pH ในเทอม x_1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเทอม x_2 ให้ผลในเชิงลบ ในขณะที่ปัจจัยร่วม (x_1x_2) ให้ผลในเชิงบวก และจากตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยร่วม (x_1x_2) มีค่า F_{value} น้อยกว่า $F_{critical}$ และ $P_{value} > 0.05$ แสดงให้เห็นว่าผลของปัจจัยร่วมนี้มีผลต่อการสลายสีข้อมเพียงเล็กน้อย

ภาพที่ 5 ผลของ pH เริ่มต้นและความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าการสลายสีข้อมด้วยปฏิกิริยาคัลลิกแทนต์สามารถเกิดได้ดีในช่วง pH 3-3.25 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ [2, 14] และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 45.5-55 mM จากผลทางสถิติในตารางที่ 3 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของ pH ในเทอม x_1 ให้ผลในเชิงลบ และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเทอม x_3 ให้ผลในเชิงบวก แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม x_1x_3 ให้ผลในเชิงบวกต่อสมการการทำนาย และจากตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยร่วมนี้มีค่า F_{value} น้อยกว่า $F_{critical}$ และ $P_{value} > 0.05$ แสดงให้เห็นว่าในการสลายสีข้อมมีผลของปัจจัยร่วมเพียงเล็กน้อย

ภาพที่ 6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าปัจจัยทั้ง 2 นี้มีผลร่วมกันในช่วงค่าใดค่าหนึ่งจึงทำให้มีค่าที่เหมาะสมกระจุกอยู่ตรงกลาง โดยที่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยากับความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ออกจากค่าที่เหมาะสม ส่งผลให้ร้อยละการสลายตัวของสีข้อมลดลง โดยตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 3 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในเทอม x_3 ให้ผลในเชิงบวกแต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเทอม x_2 ให้ผลในเชิงลบ แต่เมื่อพิจารณาในเทอมกำลังสอง x_2^2 , x_3^2 กลับส่งผลในเชิงลบต่อการสลายสีข้อมทั้งคู่ ในขณะที่ผลแบบร่วมกันในเทอม x_2x_3 ให้ผลในเชิงบวก แสดงให้เห็นว่ามีช่วงที่เกิดผลร่วมกัน แต่เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 3 แล้ว ถือว่ายังมีค่าน้อย ($1.24 < 49.41$) แสดงให้เห็นว่ามีผลในการสลายสีข้อมร่วมกันเล็กน้อย แต่มีบางช่วงที่ส่งผลร่วมกันอย่างชัดเจน (ช่วง x_2 0.4-0.7 g/L และ x_3 35-49 mM) จากตารางที่ 4 แต่เมื่อพิจารณาค่าความแม่นยำของค่า $F_{Lack-of-Fit}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.17 และค่า P_{value} เท่ากับ 0.2 และค่า $F_{critical}$ เท่ากับ 19.164 แสดงว่าค่าความผิดพลาดไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญกับผลการทดลอง และเนื่องจากค่า R^2 และค่า R^2_{adj} มีค่าเท่ากับ 98.49% และ 95.78% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสมการ (8) สามารถนำมาใช้ทำนายภาวะที่ดีที่สุดต่อปฏิกิริยาการสลายสีข้อมได้ โดยภาวะดังกล่าวคือ ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.464 g/L และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 45.85 mM



จากสภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทำนายข้างต้น ทางผู้วิจัยได้นำมาทำการทดลองซ้ำ 5 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ยพบว่า ได้ค่าเฉลี่ยในการสลายสีเท่ากับร้อยละ $96.27 \pm 0.53\%$ ซึ่งเมื่อเทียบจากค่าในการทำนายซึ่งทำนายไว้ว่าควรสลายสีได้ ร้อยละ 100 ถือว่ายอมรับได้เพราะมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$

ภาพที่ 7 เป็นการยืนยันว่าปฏิกริยาล้ำเฟนตัน นอกจากจะมีข้อดีในเรื่องของการนำมาใช้ซ้ำ และยังให้ผลการสลายสีข้อมที่สูงกว่าปฏิกริยาเฟนตันแบบสารละลาย (ร้อยละ 96 และ 91 ตามลำดับ) ที่สภาวะเดียวกันและมีปริมาณเหล็กเท่ากัน โดยน้ำหนัก ในขณะที่การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และผงเหล็กเพียงอย่างเดียว ให้ผลการสลายสีเพียงร้อยละ 3 และร้อยละ 20 ตามลำดับ โดยมีความเป็นไปได้ว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และผงเหล็กเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพไม่สูงพอที่จะกำจัดสีข้อมได้ อย่างไรก็ตามปฏิกริยาล้ำเฟนตันนี้สามารถสลายสีข้อมกว่าร้อยละ 90 ในเวลา 10 นาที

3. การนำตัวเร่งปฏิกริยามาใช้ซ้ำ

จากการทำปฏิกริยาล้ำเฟนตันในแต่ละครั้งนั้นพบว่าตัวเร่งปฏิกริยา (ผงเหล็ก) เหลืออยู่มาก จึงได้ทำการใช้ซ้ำเพื่อทดสอบว่าตัวเร่งปฏิกริยา (ผงเหล็ก) นั้นยังมีประสิทธิภาพในการสลายสีข้อมหรือไม่ ซึ่งจากการใช้ซ้ำ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการนำตัวเร่งปฏิกริยามาใช้ซ้ำ (โดยแต่ละสภาวะการทดลอง จะนำมาทดลองซ้ำ 3 รอบ) แสดงในภาพที่ 8 พบว่าผลการทดลองตั้งแต่ Run 1 ถึง Run 5 สามารถสลายสีข้อมใน 2 ชั่วโมง อยู่ในช่วงร้อยละ 95-97 โดยเฉลี่ย

4. คุณภาพน้ำหลังการบำบัด

จากการหาปริมาณไอออนเหล็กด้วยเครื่อง AAS พบว่ามีไอออนเหล็กปนเพียง 1.85 ppm ในน้ำหลังการบำบัด ซึ่งถือว่ามีความต่ำมากและผ่านข้อกำหนดขององค์การอนามัยโลกซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 5 ppm อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของเหล็กไม่ได้มีข้อกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานของประเทศไทย ในขณะที่มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานได้กำหนดค่าความเข้มข้นไว้ไม่เกิน 300 ADMI จากผลตรวจสอบค่า ADMI ที่ภาวะมาตรฐานคือ pH 7.6 ก่อนและหลังทำปฏิกริยาในสภาวะที่ดีที่สุด พบว่ามีค่าเท่ากับ 1,740 ADMI และ Run 1 ถึง Run 5 มีค่าไม่เกิน 10 ADMI ตามลำดับ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาซ้ำ 5 ครั้ง ยังคงให้ประสิทธิภาพในการสลายสีข้อมที่สูง ในขณะที่ค่า TOC ของน้ำก่อนและหลังการบำบัดมีค่าต่างกันไม่ถึง 10% แต่พบว่ามีค่าดังกล่าวมีค่าน้อยเพียง 3.55 mg/L แสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาสามารถสลายพันธะที่ทำให้เกิดสีได้ แต่ยังไม่สามารถสลายจนได้ CO_2 และ H_2O แต่อย่างไรก็ตามค่า TOC ที่พบมีค่าต่ำมาก จึงผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงาน

สรุป

จากผลทางสถิติแสดงให้เห็นว่า pH เริ่มต้นมีผลอย่างมากต่อการสลายของสีข้อม โดยที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสลายของสีข้อม เมื่อเทียบกับ pH นอกจากนี้ pH ยังแสดงผลในเชิงลบต่อการสลายสีข้อมเนื่องจากเมื่อ pH สูงขึ้นส่งผลให้ ศักยภาพในการออกซิไดซ์ของอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง รวมถึง Fe^{2+} ตกตะกอนและเสื่อมสภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีข้อมลดลง ในทำนองเดียวกัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาเริ่มต้นเมื่อมีปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิด Fe^{2+} ในระบบมากเกินไป จนประพืดตัวเป็นตัวค้ำับอนุมูลอิสระ ในขณะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ผลในเชิงบวก เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่งผลให้ร้อยละการสลายสีข้อมสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากเพิ่มมากเกินไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายสีลดลงเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถรวมกับอนุมูลไฮดรอกซิลเกิดเป็นน้ำ จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการสลายสีแดงสมนึก เบอร์ 9 ที่ความเข้มข้น

100 ppm โดยใช้ปฏิกิริยาคัลยเฟนตันคือ pH 3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเริ่มต้นเท่ากับ 0.464 g/L และความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 45.85 mM สามารถสลายสีสูงสุดร้อยละ 96 ในเวลา 2 ชั่วโมง โดยสมการทำนายการสลายสี $Y = 49.41 - 39.34X_1 - 4.13X_2 + 5.16X_3 + 10.75X_1^2 - 14.35X_2^2 - 5.91X_3^2 + 1.51X_1X_2 + 1.41X_1X_3 + 1.24X_2X_3$ สามารถนำมาใช้ทำนายได้ และตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 ครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพการสลายสีมากกว่าร้อยละ 96 รวมถึงค่า TOC ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกรมโรงงาน นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการใช้ผงเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลการสลายสีข้อมที่ต่ำกว่าปฏิกิริยาเฟนตันที่เป็นสารละลาย รวมถึงความง่ายต่อการนำมาใช้ซ้ำ และตะกอนหลังการบำบัดที่น้อยกว่ามาก จึงสรุปได้ว่าการนำผงเหล็กมาใช้ในการสลายสีข้อม ภายใต้ภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการทำนายด้วยวิธีทางสถิตินี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีต่อการสลายสีข้อม และผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Elmorsi TM, Riyad YM, Mohamed ZH, Abd El Bary HMH. Decolorization of Mordant red 73 azo dye in water using H₂O₂/UV and photo-Fenton treatment. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;174(1-3):352-328.
2. Lucas MS, Peres JA. Decolorization of the azo dye Reactive Black 5 by Fenton and photo-Fenton oxidation. *Dyes and Pigments*. 2006;71(3):236-244.
3. Kasiri MB, Khataee AR. Photooxidative decolorization of two organic dyes with different chemical structures by UV/H₂O₂ process: Experimental design. *Desalination*. 2011;270(1-3):151-159.
4. Idel-aouad R, Valiente M, Yaacoubi A, Tanouti B, López-Mesas M. Rapid decolourization and mineralization of the azo dye C.I. Acid Red 14 by heterogeneous Fenton reaction. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;186(1):745-750.
5. Duygu Ozsoy H, van Leeuwen J. Removal of color from fruit candy waste by activated carbon adsorption. *Journal of Food Engineering*. 2010;101(1):106-112.
6. Constapel M, Schellenträger M, Marzinkowski JM, Gäb S. Degradation of reactive dyes in wastewater from the textile industry by ozone: Analysis of the products by accurate masses. *Water Research*. 2009;43(3):733-743.
7. Khan SB, Hou M, Shuang S, Zhang Z. Morphological influence of TiO₂ nanostructures (nanozigzag, nanohelics and nanorod) on photocatalytic degradation of organic dyes. *Applied Surface Science*. 2017;400:184-193.
8. Thonglim K, Chiarakorn SPP. Photocatalytic Reaction of Light Filter Film Coated by Silver Doped Titania. *KKU Res J*. 2015;15(2):48-55. Thai.
9. Srimuang KKK. Efficiency of Dye Adsorption From Silk Dyeing Wastewater by Ferricchloride Coated With Bituminous Bottom Ash. *KKU Res J*. 2017;17(3):53-63. Thai.
10. Panda N, Sahoo H, Mohapatra S. Decolourization of Methyl Orange using Fenton-like mesoporous Fe₂O₃-SiO₂ composite. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;185(1):359-365.



11. Devi LG, Raju KSA, Kumar SG, Rajashekhar KE. Photo-degradation of di azo dye Bismarck Brown by advanced photo-Fenton process: Influence of inorganic anions and evaluation of recycling efficiency of iron powder. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011;42(2):341-349.
12. Khataee A, Salahpour F, Fathinia M, Seyyedi B, Vahid B. Iron rich laterite soil with mesoporous structure for heterogeneous Fenton-like degradation of an azo dye under visible light. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2015;26:129-135.
13. Srerungruang N, Neramittagapong A, Sriprom P, Kumsaen T, Sangnak SSN. Optimization of Back-Washing Condition for Centrifugal Extractor to Minimize Cassava Starch Loss. *KKU Res J*. 2017;17(2): 61-70. Thai.
14. Nasuha N, Ismail S, Hameed BH. Activated electric arc furnace slag as an efficient and reusable heterogeneous Fenton-like catalyst for the degradation of Reactive Black 5. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2016;67:235-243.
15. Fida H, Zhang G, Guo S, Naeem A. Heterogeneous Fenton degradation of organic dyes in batch and fixed bed using La-Fe montmorillonite as catalyst. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017;490:859-868.
16. Suthep S, Veeranuch B. Organic Compounds and Color Removal by Fenton and Coagulation Processes in Textile Wastewater. *Kasetsart Engineering Journal*. 2010;72:10-16.
17. Song H, Chen C, Zhang H, Huang J. Rapid decolorization of dyes in heterogeneous Fenton-like oxidation catalyzed by Fe-incorporated Ti-HMS molecular sieves. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016;4(1):460-467.

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองโดยใช้ Box-Behnken design

ปัจจัย	ตัวแปร	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
pH เริ่มต้น	(X ₁)	3	5	7
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L)	(X ₂)	0.1	0.55	1
ความเข้มข้นเริ่มต้นของ H ₂ O ₂ (mM)	(X ₃)	20	40	60

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการย่อยสลายสีข้อม (สีแดงสมนึก เบอร์ 9) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken design

Run	pH	Cat. Loading (g/L)	H ₂ O ₂ (mM)	%DE 2 hr
1	3	0.1	40	86.50
2	7	0.1	40	7.88
3	3	1	40	80.71
4	7	1	40	8.15
5	3	0.55	20	95.04
6	7	0.55	20	10.46
7	3	0.55	60	95.22
8	7	0.55	60	16.28
9	5	0.1	20	28.45
10	5	1	20	12.20
11	5	0.1	60	43.61
12	5	1	60	32.32
13	5	0.55	40	49.93
14	5	0.55	40	45.31
15	5	0.55	40	52.99



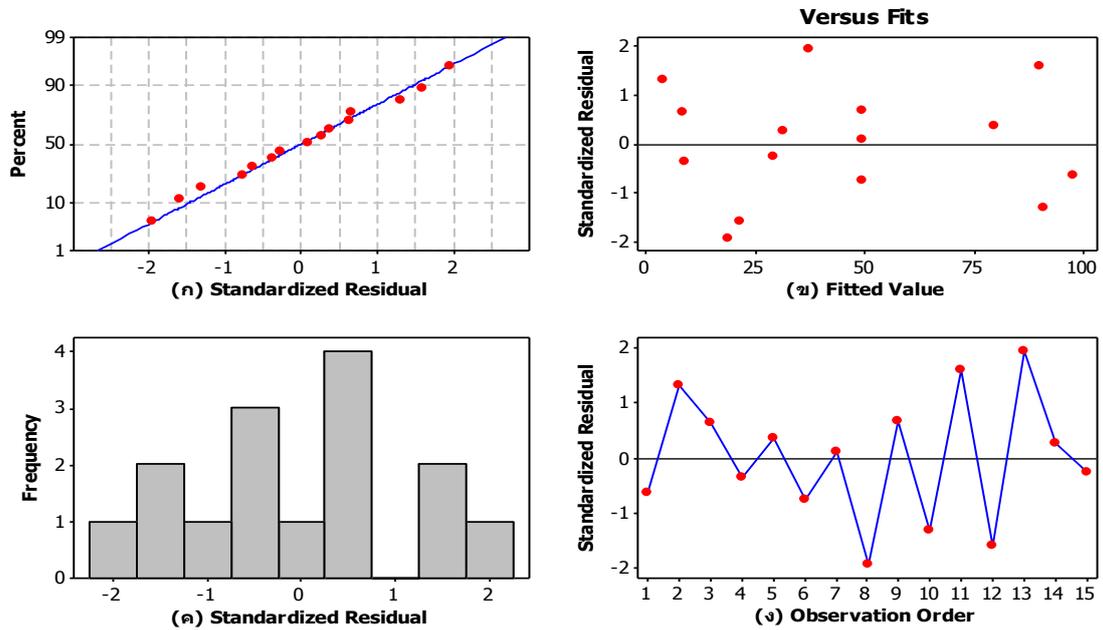
ตารางที่ 3 ผลการทำนายการทดลองโดยเทคนิค Least Square of Error

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์	P value
ค่าคงที่	49.41	0.000
X_1	-39.338	0.000
X_2	-4.133	0.136
X_3	5.16	0.077
X_1^2	10.752	0.026
X_2^2	-14.353	0.009
X_3^2	-5.912	0.145
$X_1 \times X_2$	1.514	0.665
$X_1 \times X_3$	1.41	0.686
$X_2 \times X_3$	1.24	0.722

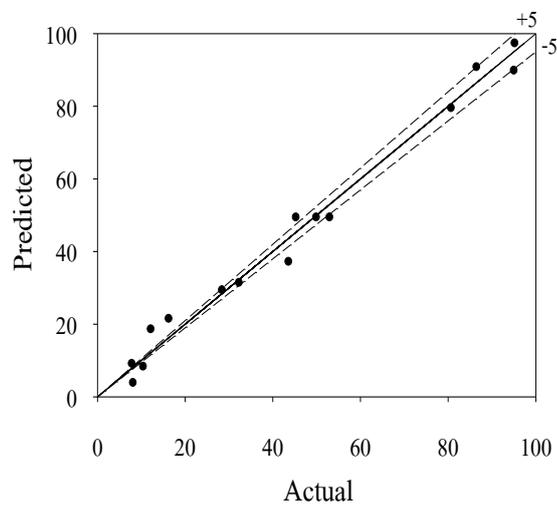
$R^2 = 0.9849$ $R^2_{adj} = 0.9578$

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการความถดถอย

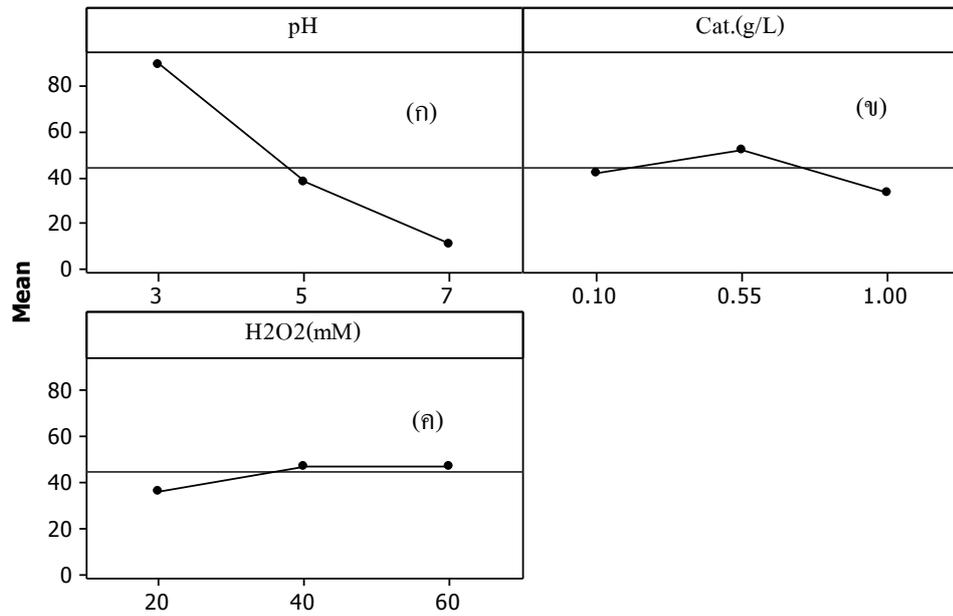
Source	DF	F	P	F _{Critical}
Regression	9	36.29	0.001	4.77
Linear	3	97.91	0.000	5.41
X_1	1	285.66	0.000	6.61
X_2	1	3.15	0.136	6.61
X_3	1	4.91	0.077	6.61
Square	3	10.78	0.013	5.41
X_1^2	1	9.85	0.026	6.61
X_2^2	1	17.55	0.009	6.61
X_3^2	1	2.98	0.145	6.61
Interaction	3	0.18	0.906	5.41
$X_1 \times X_2$	1	0.21	0.665	6.61
$X_1 \times X_3$	1	0.18	0.686	6.61
$X_2 \times X_3$	1	0.14	0.722	6.61
Residual Error	5			
Lace-of-fit	3	4.17	0.2	19.164
Pure-Error	2			
Total	14			



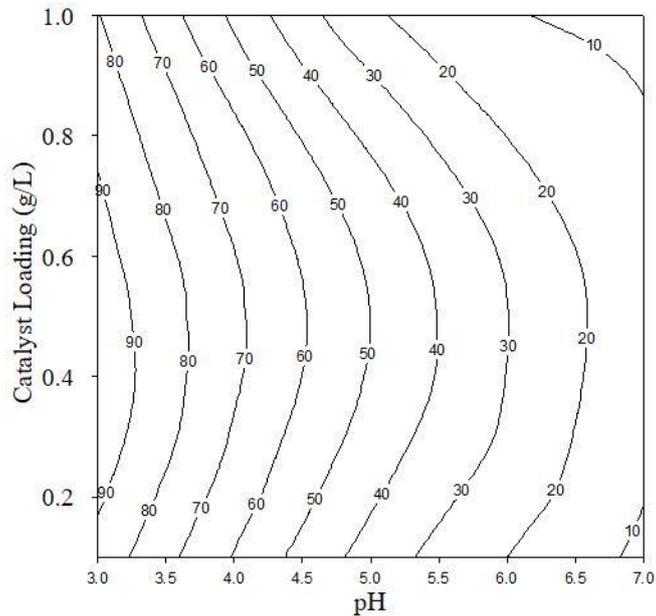
ภาพที่ 1 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานเมื่อเทียบกับ (ก) Normal Probability Plot (ข) Versus Fits (ค) Histogram และ (ง) Versus Orderorder



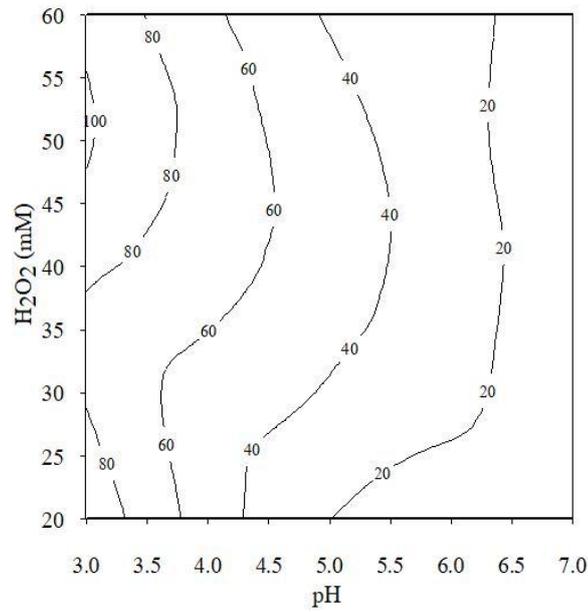
ภาพที่ 2 ค่าการทำนายการลดลงของสีเชื่อมที่เกี่ยวกับการทดลอง



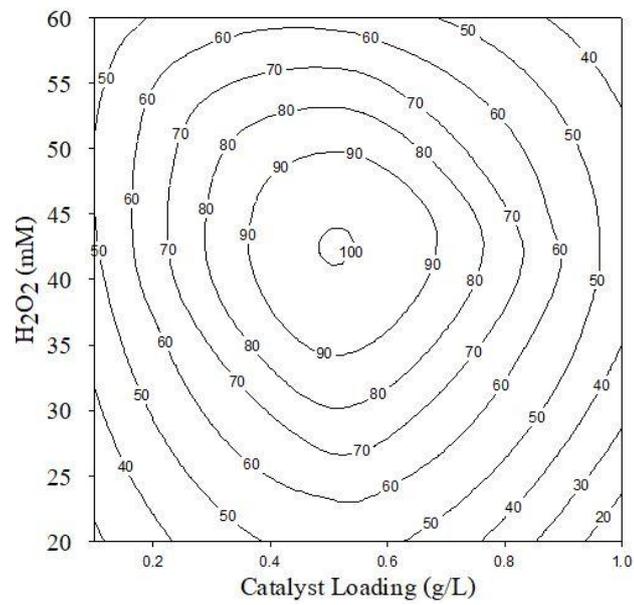
ภาพที่ 3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายของสีข้อมฟ้า (ก) pH เริ่มต้น (ข) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g/L) (ค) ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (mM)



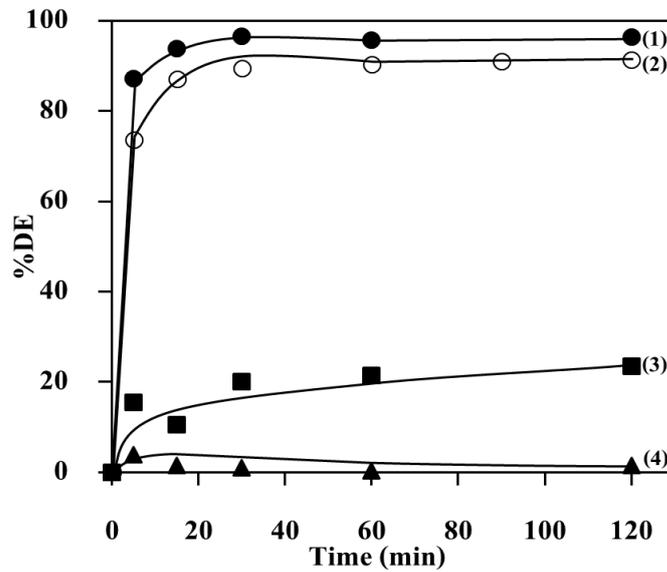
ภาพที่ 4 ผลระหว่าง pH เริ่มต้นและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (ผงเหล็ก)



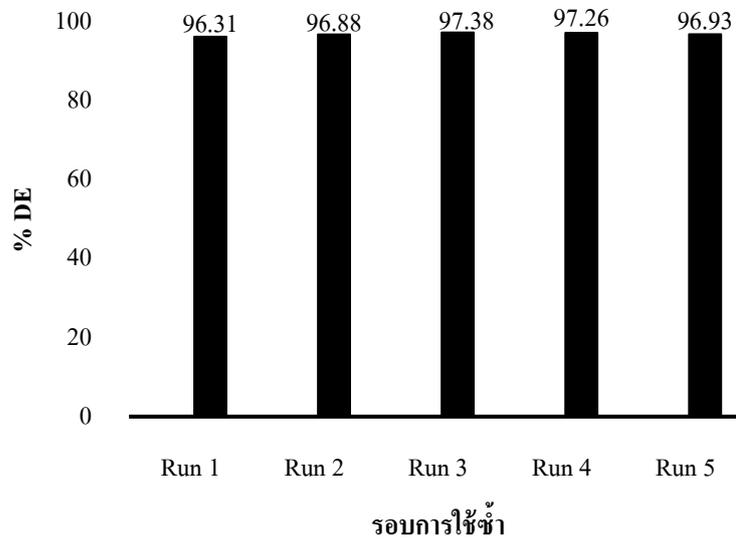
ภาพที่ 5 ผลระหว่าง pH เริ่มต้นและความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ภาพที่ 6 ผลระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ (ผงเหล็ก) และความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ภาพที่ 7 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสี ระหว่างปฏิกิริยาเฟนตัน ตัวเร่งปฏิกิริยา (0.464 g/L) และ H₂O₂ (45.858 mM) ที่ pH เริ่มต้น 3 ในสีข้อมความเข้มข้น 100 ppm (1) Fenton-Like (2) Fenton aqua Fe²⁺ (3) Iron-powder (4) Hydrogen peroxide



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพในการสลายสีข้อมโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาซ้ำ (pH เริ่มต้นเท่ากับ 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.464 g/L และ H₂O₂ 45.85 mM สีข้อม 100 ppm ในเวลา 2 ชั่วโมง)