

# การหาภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีย้อมชนิดแอซิดด้วย ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## Optimization of Acid Dye Degradation by Photo-Fenton Reaction Over Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst

ณัฐถาวร ชนประดิษฐ์กุล, วิมลพร เอี่ยมอมรพันธ์, กิติโรจน์ หวันตาหลา  
สุธาสิณี เนรมิตตกพงส์ และอาทิตย์ เนรมิตตกพงส์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

### บทคัดย่อ

การสลายสีย้อมสีเหลืองชนิดแอซิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ปฏิกิริยาถูกทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม คือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายสี พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการสลายสีที่คำนวณได้จากแบบจำลอง จะสามารถสลายสีย้อมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นเวลา 180 นาที ที่ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 4 จากการทดสอบปฏิกิริยาจริงจำนวน 10 ครั้ง พบว่า สามารถสลายสีย้อมได้ร้อยละ 95±2 และไม่พบการละลายของเหล็กจากตัวเร่งปฏิกิริยา

คำสำคัญ : สีแอซิด โฟโต-เฟนตัน ภาวะที่เหมาะสม Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### Abstract

The degradation of yellow acid dye by Photo-Fenton reaction with Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst was carried out in batch reactor. The initial dye concentration is about 50 mg/L to find the optimal condition and significant effect on dye degradation. It has been found that the optimal condition calculated from model was at 500 mg/L of initial hydrogen peroxide concentration, 300 mg/L of Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst, 180 min of reaction time and solution pH of 4 with completely degradation of dye. The verification of optimal condition was performed by ten times of experiments. The results showed that 95±2% of dye was removed and there was no iron dissolution from the catalyst.

Keywords : Acid dye, Photo-Fenton, optimal condition, Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 1. บทนำ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่อยู่ในสีย้อมสูงและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีนักวิจัยหลายคนศึกษาการสลายสีย้อมด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดย Muthukumari และคณะศึกษาการสลายสีย้อมชนิดเอโซด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันบน

ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สามารถลดความเข้มข้นของสีลงได้ร้อยละ 65 [1] Lee และคณะได้ศึกษาการลดลงของฟีนอลด้วยกระบวนการเฟนตันพบว่าสามารถสลายฟีนอลได้ดี [2] Huang และคณะศึกษาการลดสีด้วยกระบวนการเฟนตันแต่ใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสามารถลดสีได้ร้อยละ 93 [3] ซึ่ง Modirshahla และคณะทำการลดสีด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน ซึ่งสามารถลดสีได้ร้อยละ 90 โดยพบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถลดสีหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีกว่ากระบวนการเฟนตันเพียงอย่างเดียว [4]

การสลายสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตันมีข้อเสียคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารละลาย อาจมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทดสอบการสลายสีย้อมชนิดแอซิดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5] พบว่าได้ผลการสลายสีและซีโอดีสูงมาก แต่ยังไม่ทราบภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อช่วยในการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสีย้อม และศึกษาการตกค้างของเหล็กในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วย

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเติม Fe บนตัวรองรับอะลูมินาด้วยวิธีการเอ็บซุ่มโดยนำสารละลาย Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> หยดลงบนตัวรองรับอะลูมินา อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่ 400 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [1] และผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง XRD ไม่พบฟีกของเหล็กเป็นผลจากเหล็กกระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับ และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF พบว่ามีปริมาณเหล็กบนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 24.8 โดยน้ำหนัก

### 2.2 การทดสอบการสลายสีย้อม

เตรียมสารละลายสีย้อมแอซิด สีเหลืองเครื่องหมาย การค้าสิงโตตีกลอง เบอร์ 16 ความเข้มข้น 50 mg/L

ปริมาตร 1000 ml และปรับตัวแปรต่างๆ ตามผลการออกแบบการทดลอง และทดสอบปฏิกิริยาภายในตู้ที่บแสงที่ติดตั้งหลอดยูวี 10 วัตต์ จำนวน 6 หลอด ความอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทดสอบปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer รุ่น 8453 Agilent ที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีด้วยวิธีไตเตรชัน และวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยเครื่อง AAS รุ่น Analyst 100 PerkinElmer

### 2.3 การออกแบบการทดลอง

การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสม ได้มีการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขอบเขตของปัจจัยต่างๆ [5] เพื่อนำมาออกแบบการทดลองโดยใช้ปัจจัย 4 ตัวแปร คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เวลาของการดำเนินปฏิกิริยา และ pH แบ่งระดับของค่าของตัวแปรเป็น 3 ระดับ คือ ค่าต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด ดังตารางที่ 1 ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน รวมการทดลองซ้ำสามครั้ง ได้การทดลองทั้งหมด 81 ชุดทดลอง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและช่วงของปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

ทดลอง	ปัจจัย	แฟกเตอร์	ช่วงและระดับ		
			-1	0	1
ความเข้มข้นของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/l)	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	100	300	500
ปริมาณ Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mg/l)	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	100	200	300
เวลา (min)	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>	30	105	180
pH	X <sub>4</sub>	X <sub>4</sub>	4	7	10

จากปัจจัยที่ศึกษาสามารถสร้างสมการในการทำนายการสลายสี ดังสมการที่ 1

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} X_i^2 + \beta_{iiii} X_i^4 \dots (1)$$

โดยที่ Y คือ ร้อยละการสลายสีย้อม X<sub>1</sub> คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ X<sub>2</sub> คือ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, X<sub>3</sub> คือ เวลาของการทำปฏิกิริยา และ X<sub>4</sub> คือ pH ของสารละลายเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละการสลายสีข้อมสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\% \text{ degradation} = \frac{(C_1 - C_t)}{C_1} \times 100 \quad \dots (2)$$

โดย  $C_1$  คือ ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น และ  $C_t$  คือ ความเข้มข้นของสีที่เวลาต่างๆ

**3. ผลการทดลอง**

การศึกษาการสลายสีข้อมชนิดแอสิด โดยศึกษาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการสลายสีข้อม 4 ตัวแปร โดยมีการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้ค่าผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุด (Least-Square error) ดังตารางที่ 2 ซึ่งจะได้สมการเชิงถดถอยในการทำนายผลการทดลอง ดังสมการที่ 3

$$Y = 69.92 + 0.40X_1 + 6.98X_2 + 17.65X_3 - 4.26X_4 - 2.05X_1^2 - 1.11X_2^2 - 11.96X_3^2 + 11.79X_4^2 + 0.93X_1X_2 + 4.01X_1X_3 - 4.43X_1X_4 + 1.36X_2X_3 - 2.77X_2X_4 + 2.36X_3X_4 \quad (3)$$

เมื่อ Y คือค่าร้อยละการสลายสีข้อม และ X คือตัวแปรอิสระที่ถูกศึกษา

พิจารณาที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่า P ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงถึงปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญต่อค่าการตอบสนอง ตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าเทอมของ  $X_1, X_{11}, X_{22}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{23}, X_{24}$  และ  $X_{34}$  นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อการสลายสีข้อม ( $P > 0.05$ ) สำหรับปัจจัยอื่นนอกเหนือจากนั้นมีนัยสำคัญต่อการสลายสีข้อม เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 1 (ก) พบว่าข้อมูลความน่าจะเป็นปกติ

(Normal probability plot) กระจายอยู่บนเส้นตรงและใกล้เคียงเส้นตรง แสดงว่าไม่มีชุดการทดลองที่แสดงค่าความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณากราฟฮิสโทแกรม (Histogram) แสดงรูปที่ 1 (จ) พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้งปกติโดยมีแนวโน้มของข้อมูลวิ่งเข้าสู่ศูนย์ เมื่อพิจารณากราฟค่าความผิดพลาดมาตรฐานกับค่าการคำนวณจากสมการที่ 3 แสดงรูปที่ 1 (ค) พบว่ามีกระจายตัวที่ดีของชุดข้อมูล และกราฟค่าความผิดพลาดมาตรฐานกับการทดลองแสดงรูปที่ 1 (ง) พบว่าผลมีการแกว่งขึ้นลงในคาบของศูนย์โดยลักษณะของการแกว่งไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นผลที่อธิบายมาทั้งหมดข้างต้นจึงไม่พบว่ามีผลการทดลองที่แสดงค่าผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการทดลองนี้ชุดข้อมูลการทดลองสอดคล้องกันกับสมการที่ (3) ดังนั้นจึงสามารถทำนายผลการทดลองโดยใช้สมการที่ (3) เพื่อเทียบกับผลการทดลองจริง ผลดังแสดงในรูปที่ 2

ผลของรูปที่ 2 ค่า  $R^2$  เท่ากับร้อยละ 83.93 และ  $R^2$  (adj) เท่ากับร้อยละ 77.83 ซึ่งผลดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงถึงสมการในการทำนายการสลายสีข้อมสามารถทำนายผลการทดลองได้จริง และพบว่าปัจจัยกระทบอื่นๆ นั้นมีผลต่อการทำนายลดลงประมาณร้อยละ 6 (83.93-77.83)

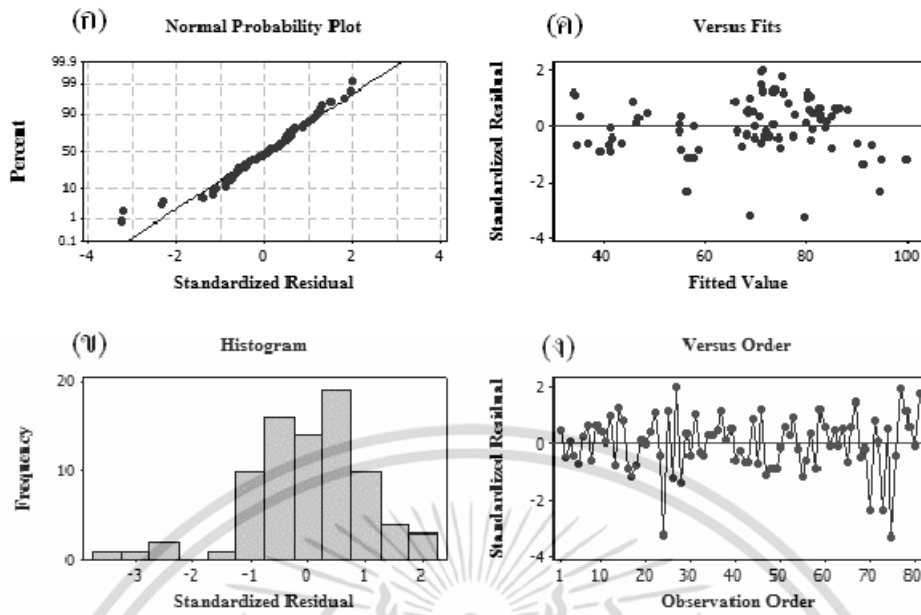
ผลการวิเคราะห์ตัวแปรของสมการถดถอย (สมการที่ 3) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยศึกษาที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งให้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จากการออกแบบการทดลองแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน

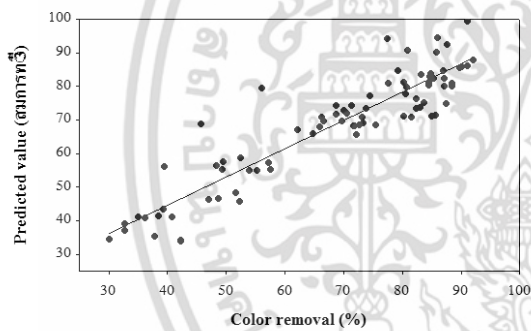
Term	สัมประสิทธิ์	P	Term	สัมประสิทธิ์	P		
Constant	$\beta_0$	69.92	0.000	pH*pH	$\beta_{44}$	11.79	0.000
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$\beta_1$	0.40	0.776	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> *Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\beta_{12}$	0.93	0.705
Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\beta_2$	6.98	0.000	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> *Time (min)	$\beta_{13}$	4.01	0.108
Time (min)	$\beta_3$	17.65	0.000	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> *pH	$\beta_{14}$	-4.43	0.076
pH	$\beta_4$	-4.62	0.002	Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Time (min)	$\beta_{23}$	1.36	0.582
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> *H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$\beta_{11}$	-2.05	0.338	Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *pH	$\beta_{24}$	-2.77	0.264
Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\beta_{22}$	-1.11	0.604	Time (min)*pH	$\beta_{34}$	2.36	0.340
Time (min)*Time (min)	$\beta_{33}$	-11.96	0.000				

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ค่าความผิดพลาดสำหรับการสลายสีเหลือง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ค่าที่ได้จากการทำนายเทียบกับผลการทดลอง

สลายสีข้อม มีเพียงตัวแปรที่มีผลร่วมกันนั้น พบว่าไม่มีผลซึ่งกันและกันเนื่องจากค่า F-value (1.43) ของสมการมีค่าต่ำกว่า F-critical (2.26) และค่า P-value มีค่าสูงกว่า 0.05 คือ มีค่า 0.218 จึงสามารถอธิบายได้ว่า ในกระบวนการโฟโตเฟนตันตัวแปรไม่มีผลร่วมกันต่อการสลายสีข้อม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติ (ANOVA) ของสมการเชิงเส้นของการสลายของสีข้อม

Source	Degree of freedom	F-value	P-value
Regression	14	20.99	0.000
Linear	4	47.58	0.000
Square	4	23.73	0.000
Interaction	6	1.43	0.218

ตารางที่ 3 พบว่า สมการเชิงเส้นแบบถดถอยที่ใช้ในการทำนายที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อพิจารณาค่า F-value (20.99) ของสมการมีค่าสูงกว่า F-critical (1.87) และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 คือ มีค่า 0.000 เช่นเดียวกัน แสดงถึงความน่าเชื่อถืออย่างมีนัยสำคัญของสมการในการทำนาย และเมื่อพิจารณาตัวแปรของสมการที่เป็นเส้นตรง และกำลังสองพบว่าค่า F-value เท่ากับ 47.58 และ 3.73 ตามลำดับ มีค่าสูงกว่า F-critical (2.54) และค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 คือ มีค่า 0.000 เช่นเดียวกัน แสดงถึงตัวแปรอิสระที่ศึกษาในทอมที่เป็นเส้นตรง และกำลังสองนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการ

การสลายสีข้อมชนิดแอซิดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน พบว่า การสลายสีที่เวลา 180 นาที pH เท่ากับ 4 โดยมีความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  300 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความเข้มของ

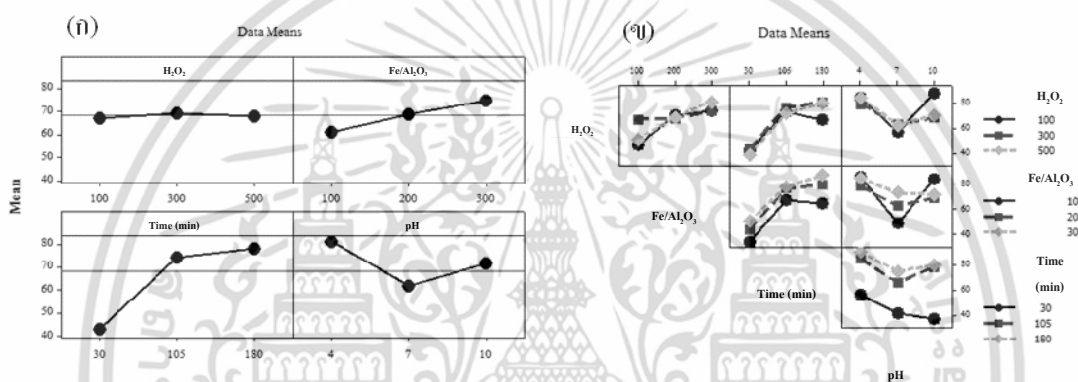
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีเข้มด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันได้มากที่สุด

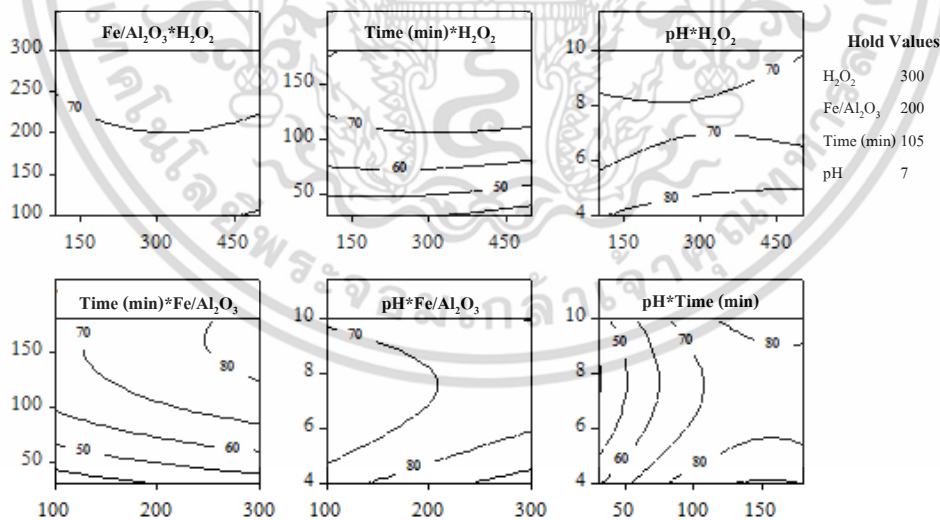
รูปที่ 3 (ก) อิทธิพลหลักของการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการสลายสีคือ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  และเวลา ซึ่งเมื่อเวลาและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของการสลายสีเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงเวลา 105 นาทีแรกการสลายสีจะลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆลดลงหลังจากผ่านไป 105 นาที แต่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  จะลดลงได้มากขึ้นเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น แต่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีปริมาณ

เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องดังผลในตารางที่ 2 พบว่า ค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงชี้ให้เห็นว่าปัจจัยหลักแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลต่อการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

การศึกษาผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ดังแสดงใน รูปที่ 3 (ข) พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  และเวลาส่งผลต่อการสลายสี โดยเมื่อทำการปรับค่าทั้ง 3 ในทิศทางที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การสลายสีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3 ผลของปัจจัยหลัก (ก) และปัจจัยร่วม (ข) ที่มีผลต่อการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน



รูปที่ 4 ผลของการตอบสนองต่อปัจจัยที่มีต่อการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

ในทางตรงข้ามอิทธิพลร่วมระหว่าง pH กับ ปัจจัยทั้ง 3 พบว่า ที่ pH 4 จะให้ค่าการสลายสีสูงที่สุดแต่เมื่อเพิ่ม pH จนถึง 7 จะทำให้การสลายสีลดลงและจะเพิ่มขึ้น เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pH สูงขึ้น ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มค่าของทั้ง 3 ปัจจัย ที่ pH 7 จะทำให้การสลายสีน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายสีร่วมกันมี 3 ปัจจัย คือ ความ

เข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  และเวลา ส่วน pH ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อการสลายสีกับปัจจัยอื่น ซึ่งจากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งให้เห็นว่า ถ้าพิจารณาปัจจัยทั้ง 4 ร่วมกันแล้ว จะไม่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการตอบสนองต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสลายสีด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตอน ดังรูปที่ 4 แสดงผลระหว่างปัจจัยต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลของอิทธิพลต่อการสลายสี ซึ่งชี้ให้เห็นว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลในทิศทางที่เพิ่มขึ้นแล้วทำให้ค่าการตอบสนองเพิ่มขึ้น ยกเว้นผลระหว่าง pH กับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลในทิศทางตรงกันข้ามกัน

การทำนายหาภาวะที่เหมาะสมของการสลายสีข้อมโดยสมการที่ (3) พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าการลดสีมากที่สุด คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  300 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 180 นาที ที่ pH เท่ากับ 4 สามารถให้ค่าการลดสีได้มากที่สุด ร้อยละ 100 เมื่อมีการตรวจสอบค่าที่ได้จากแบบจำลองโดยการทำการทดลองซ้ำที่ภาวะที่เหมาะสม 10 การทดลองพบว่าที่ภาวะที่เหมาะสม สามารถสลายสีได้ร้อยละ  $95 \pm 2$  ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่ได้การทำนายด้วยสมการการออกแบบการทดลอง และเมื่อตรวจสอบปริมาณของเหล็กในน้ำหลังการบำบัดพบว่าไม่สามารถตรวจวัดปริมาณของเหล็กได้ ดังนั้นจึงไม่มีการละลายของเหล็กระหว่างการทำปฏิกิริยา

#### 4. สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันต่อการสลายสีข้อมชนิดแอซิดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  ร่วมกันมี 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และเวลา ส่วน pH ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อการสลายสีกับปัจจัยอื่น จากแบบจำลองสามารถทำนายภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ในการสลายสีอย่างสมบูรณ์ เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ เข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $Fe/Al_2O_3$  เข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 180 นาที ที่ pH เท่ากับ 4 จากการทำการทดลองซ้ำที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 10 การทดลอง พบว่าสามารถสลายสีข้อมได้ร้อยละ  $95 \pm 2$  และไม่พบการละลายของเหล็กจากตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Muthukumari, K. Selvam, I. Muthuvel, and M. Swaminathan, "Photoassisted hetero-Fenton mineralisation of azo dyes by Fe(II)- $Al_2O_3$  catalyst," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 153, No. 1-3, pp. 9-15, Nov., 2009.
- [2] S. LEE, J. OH, and Y. PARK, "Degradation of phenol with fenton-like treatment by using heterogeneous catalyst (modified iron oxide) and hydrogen peroxide," *Bulletin of the Korean Chemical Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 489-494. April, 2006.
- [3] Y.-H. Huang, Y.-F. Huang, P.-S. Chang, and C.-Y. Chen, "Comparative study of oxidation of dye-Reactive Black B by different advanced oxidation processes: Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 154, No. 1-3, pp. 655-662, Jun., 2008.
- [4] N. Modirshahla, M. A. Behnajady, and F. Ghanbary, "Decolorization and mineralization of C.I. Acid Yellow 23 by Fenton and photo-Fenton processes," *Dyes and Pigments*, Vol. 73, No. 3, pp. 305-310, 2007.
- [5] N. Thanapradhitkul, W. Iamamornphan, A. Neramittagapong, S. Neramittagapong and P. Sripron "Decolorization of synthetic wastewater by photo-fenton with  $Fe/Al_2O_3$  catalyst," *TICHe* 20<sup>th</sup>, pp. 51, Nov., 2010.