

การบำบัดน้ำสีรีแอคทีฟบลูความเข้มข้นสูง  
ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตันที่ใช้ผงตะไบเหล็ก  
Treatment of High Concentration Reactive Blue Dye  
with Fenton and Fenton-like Reactions Using Iron Filings

ศิริพรรณ พฤทธารักษ์ และภารดี ช่วยบำรุง\*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

ชุตินันท์ พูลเกิด

โครงการสหวิทยาการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมขั้นสูงและยั่งยืน (หลักสูตรนานาชาติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

สิทธิสุนทร สุโพธิณะ

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Siriphan Pruektara and Paradee Chuaybamroong\*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Chutinun Phoonkerd

Interdisciplinary Graduate Program in Advanced and Sustainable Environmental Engineering

(International Program), Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Bangkhen Campus,

Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

Sitthisuntorn Supothina

National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development

Agency, Thailand Science Park, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

---

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการบำบัดน้ำสีรีแอคทีฟบลูความเข้มข้นสูงในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันจากการใช้ผงตะไบเหล็กขนาดน้อยกว่า 38, 38-45, 75-90 ไมครอน และคละขนาดเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเฟนตันที่ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต โดยเริ่มจากการศึกษาความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมตั้งแต่ 2.0-3.0

ศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่เหมาะสม และศึกษาสัดส่วนโดยโมลของเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในระยะเวลาการบำบัด 3 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม คือ 2 ทั้งในปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตัน โดยน้ำสี 1,000, 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร การใช้เหล็ก 6, 11 และ 14 มิลลิโมลาร์ เพียงพอต่อการกำจัดสีความเข้มข้นดังกล่าว ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนโดยโมลของการใช้เหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สำหรับกำจัดน้ำสี 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร คือ 6:60 มิลลิโมลาร์ น้ำสี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร คือ 11:110 มิลลิโมลาร์ ส่วนน้ำสี 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร สัดส่วนที่เหมาะสมในปฏิกิริยาเฟนตันคือ 14:560 มิลลิโมลาร์ ในปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันคือ 14:140 มิลลิโมลาร์ โดยในระยะเวลา 3 ชั่วโมง ปฏิกิริยาเฟนตันบำบัดสีได้เร็วกว่าปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันมาก แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมจะใกล้เคียงกัน คือ 99.4-99.8 % ก็ตาม แต่หากทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องจนถึง 35 ชั่วโมง พบว่าผงตะไบเหล็กคลขนาดสามารถกำจัดสีได้ใกล้เคียงกับปฏิกิริยาเฟนตัน การนำผงตะไบเหล็กมาใช้ทดแทนเฟอร์รัสซัลเฟตจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำสีได้มาก

**คำสำคัญ :** เฟนตัน; เสมือนเฟนตัน; ผงตะไบเหล็ก; ซีรีแอคทีฟบลู

## Abstract

This research aimed to remove the reactive blue dye in the concentrations as high as 1,000-3,000 mg/L by using Fenton and Fenton-like processes. Ferrous sulfate was used in the Fenton, while iron filings in the size of <38, 38-45, 75-90 micron, and mixed size were used in the latter. The study was started from finding the optimum pH from 2.0 to 3.0, the optimum iron concentration, and then the optimum mole ratio of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> within 3 hours of treatment duration. The results revealed that the optimum pH was 2.0 in both processes. The optimum iron concentrations for the dyes concentrations of 1,000, 2,000 and 3,000 mg/L were 6, 11, and 14 mM, respectively. The mole ratio of Fe:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as 6:60 and 11:110 mM were the best for both processes to remove the dye concentrations of 1,000 and 2,000 mg/L, respectively. For the dye concentration of 3,000 mg/L, a 14:140 mM was the best ratio for Fenton-like process and a 14:560 mM was the best ratio for Fenton process. Dye treatment with Fenton was much faster than with Fenton-like in a 3-hr treatment although the removal efficiency was similar, 99.4-99.8 %. However, with the chain reactions when the treatment duration was as long as 35 hours, the Fenton-like process with mixed size of iron filings could be comparable to Fenton. Therefore, the usage of iron filings could be considerable in dye treatment with the cheaper cost than using ferrous sulfate.

**Keywords:** Fenton; Fenton-like; iron filing; reactive blue dye

## 1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งหมด อุตสาหกรรมฟอก ย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จเป็นกลุ่มที่ต้องใช้น้ำ

ในกระบวนการผลิตมากที่สุด เป็นเหตุให้น้ำเสียในปริมาณที่มากตามไปด้วย ทั้งจากกระบวนการฟอกย้อม เส้นด้าย กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ และกระบวนการ

ฟอกย้อมผ้าฝ้าย น้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงมีทั้งสีย้อม กรด ต่าง และสารตกค้างอื่น ๆ โดยปัญหาส่วนใหญ่มาจากสี รี แอคทีฟ (reactive dye) ซึ่งละลายน้ำได้ดี มีความคงตัวในสิ่งแวดล้อมสูง มีโครงสร้างพื้นฐานในกลุ่มอะโรมาติก (aromatic) และเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic) [1] จึงยากที่จะกำจัดโดยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ส่วนการบำบัดแบบใช้อากาศสามารถลดความเข้มข้นของสีได้ แต่จะให้ผลผลิตระหว่างทางในกลุ่มของอะโรมาติกเอมีน (aromatic amine) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง [2] สีย้อมทั่วไปแม้ว่าจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่สารประกอบและการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ในสีย้อมสามารถทำให้ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นได้ เมื่อน้ำสีที่ไม่ได้รับการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะสร้างปัญหาการขัดขวางการส่องผ่านของแสง จนพืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในน้ำตามมา

การบำบัดทางเคมี เช่น การตกตะกอน สามารถกำจัดสีย้อมชนิดที่ไม่ละลายน้ำได้ดี ขณะที่การใช้โอโซนให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูงเช่นกัน ปฏิกริยาเฟนตันเป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้น โดยใช้ไฮดรอกซิลในรูป  $Fe^{2+}$  จากเฟอร์รัสซัลเฟต ( $FeSO_4$ ) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสถานะที่เป็นกรด ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical,  $^{\circ}OH$ ) ซึ่งมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กลง ความเป็นพิษลดลงหรือหมดไป

นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน (Fenton-like) ซึ่งเป็นการใช้ไฮดรอกซิลในรูปของ  $Fe^{3+}$  จากเฟอร์ริกซัลเฟต ( $FeSO_4$ )<sub>3</sub> หรืออาจใช้  $Fe^0$  ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะได้อนุมูล

อิสระไฮดรอกซิลในลักษณะเดียวกับปฏิกิริยาเฟนตัน [3]

การศึกษานี้เสนอการใช้ปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันจากผงตะไบเหล็กที่หาซื้อได้ง่าย มาใช้ในการกำจัดน้ำสีสังเคราะห์รีแอคทีฟบลู ความเข้มข้นตั้งแต่ 1,000 ไปจนถึง 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใช้จริงในหม้อย้อมของโรงงานฟอกย้อม โดยประสงค์ที่จะกำจัดสีย้อมที่แหล่งกำเนิดโดยตรง แทนที่จะกำจัดในระบบบำบัดน้ำเสียรวม เนื่องจากมีปริมาณน้ำที่ต้องบำบัดน้อยกว่า แม้ว่าจะมีความเข้มข้นสีสูงกว่ามากก็ตาม แต่ก็สามารถลดสารเคมีที่ต้องใช้ในการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำ ลดสารเคมีที่ต้องใช้ในปฏิกิริยาเฟนตันหรือเสมือนเฟนตัน และลดสารเคมีที่ต้องใช้ในการปรับสภาพน้ำให้เป็นกลางก่อนปล่อยน้ำทิ้งออกสู่ภายนอกโรงงานเช่นกัน โดยในการศึกษามีการร่อนผงตะไบเหล็กให้มีขนาด 75-90, 38-45 และน้อยกว่า 38 ไมครอน เปรียบเทียบกับการใช้แบบคละขนาดที่ไม่มีการร่อนเพื่อความสะดวกในการใช้งานจริง ภายใต้สมมติฐานว่าขนาดยิ่งเล็กลงยิ่งมีพื้นที่ผิวมาก น่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีดีขึ้น โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับปฏิกิริยาเฟนตันด้วย การศึกษาเริ่มจากการทดสอบความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมกับปฏิกิริยา และศึกษาสัดส่วนโดยโมลที่เหมาะสมระหว่างผงตะไบเหล็ก (หรือเฟอร์รัสซัลเฟตในปฏิกิริยาเฟนตัน) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำจัดสีย้อมชนิดอื่นเพื่อลดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่อไป

## 2. อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้น้ำสีสังเคราะห์รีแอคทีฟบลู (Everzal blue LX) ความเข้มข้น 1,000, 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในปฏิกิริยาเฟนตันใช้เหล็กจากเฟอร์รัสซัลเฟต ( $Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$ ) (Ajax) ส่วนปฏิกิริยา

เสมือนเฟนตันใช้ผงตะไบเหล็ก (Gammaco Co., Ltd.) รวมทั้งหมด 4 ขนาด คือ น้อยกว่า 38 ไมครอน (ร่อนด้วย sieve ขนาด mesh size 400) ขนาด 38-45 ไมครอน (ร่อนด้วย sieve ขนาด mesh size 325)

ขนาด 75-90 ไมครอน (ร่อนด้วย sieve ขนาด mesh size 170) และคละขนาด (ไม่มีการร่อน) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผงตะไบเหล็กขนาด <38, 38-45, 75-90 ไมครอน และคละขนาด ตามลำดับ

## 2.1 การหาค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสม

การศึกษาในส่วนนี้ใช้น้ำสีความเข้มข้น 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร บรรจุในตุ้กระจก ขนาดกว้าง 7 ซม. ยาว 22 ซม. และสูง 18 ซม. ปรับความเป็นกรดต่างของน้ำสีด้วยกรดซัลฟิวริก (1 นอร์มัล) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1 นอร์มัล) ให้มีค่า 2, 2.5, 2.8 และ 3 ตลอดจนระยะเวลาที่ทำการทดลอง (ความเป็นกรดต่าง 3 ทดลองเฉพาะที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในปฏิกิริยาเฟนตัน) จากนั้นเติมเหล็กโดยใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 75-90 ไมครอนเป็นตัวแทนของปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน และใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในปฏิกิริยาเฟนตัน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในน้ำสีพร้อม ๆ กัน น้ำสีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้สัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6:60 มิลลิโมลาร์ ส่วนน้ำสีความเข้มข้น 2000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้สัดส่วน 7:140 มิลลิโมลาร์ จากนั้นคนน้ำสีด้วยแท่งแก้วและทิ้งให้เกิดปฏิกิริยานาน 180 นาที ทุก ๆ 15 นาที ดูดน้ำสีมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง visible spectrophotometer (Spectro SC spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร แล้วคำนวณเป็นความเข้มข้นของน้ำสีสังเคราะห์ ด้วยการเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve)

## 2.2 การหาสัดส่วนของเหล็กต่อไฮโดรเจน

### เปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

น้ำสีที่ใช้มีความเข้มข้น 1,000, 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากปรับความเป็นกรดต่างของน้ำตามค่าที่ได้จากข้อ 2.1 แล้ว จึงใส่เหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปพร้อม ๆ กัน ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน โดยในเบื้องต้นศึกษาจำนวนโมลของเหล็กที่เหมาะสมก่อนโดยใช้จำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10 เท่าของจำนวนโมลของเหล็กที่ใช้ หลังจากทราบจำนวนโมลของเหล็กที่ดีที่สุดแล้ว จึงศึกษาจำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น โดยแปรผันตั้งแต่ 5 เท่า ไปจนถึง 80 เท่าของจำนวนโมลของเหล็กที่ใช้ และเก็บน้ำตัวอย่างทุก ๆ 15 นาที เป็นเวลา 180 นาที เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงแล้วคำนวณเป็นความเข้มข้นของสีด้วยการเทียบกับกราฟมาตรฐาน

## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

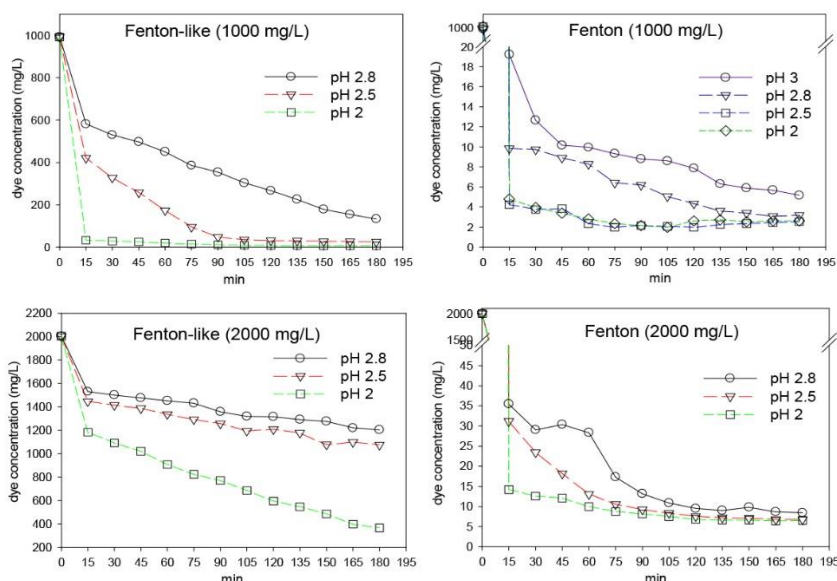
### 3.1 ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม

การกักจัดน้ำสีรีแอกทีฟพบความเข้มข้น 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนตันที่ใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 75-90 ไมครอน และ

ปฏิกิริยาเฟนตัน เมื่อใช้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสี 2, 2.5 และ 2.8 แสดงผลได้ดังรูปที่ 2 โดยเป็นการศึกษาอย่างละ 1 ชั่วโมง

จากรูปที่ 2 พบว่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟบลูสูงที่สุด ทั้งในปฏิกิริยาเหมือนเฟนตันและเฟนตัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปฏิกิริยาเหมือนเฟนตันที่พบความเข้มข้น

ของน้ำสีลดลงอย่างชัดเจน เมื่อมีความเป็นกรดมากขึ้น จาก 2.8 เป็น 2.5 และ 2 ตามลำดับ ขณะที่ในปฏิกิริยาเฟนตันที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ความเป็นกรดต่าง 2 และ 2.5 ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเพิ่มความเป็นกรดต่างให้เป็น 2.8 และ 3 พบว่าประสิทธิภาพด้อยกว่าอย่างชัดเจน ในที่นี้จึงสรุปว่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุด คือ 2

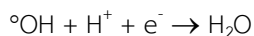
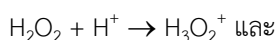


รูปที่ 2 การกำจัดสีรีแอกทีฟบลูด้วยปฏิกิริยาเหมือนเฟนตันและเฟนตันเมื่อใช้ค่าความเป็นกรดต่างต่างกัน

ค่าความเป็นกรดต่างนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเฟนตันและเหมือนเฟนตัน โดยค่าที่เหมาะสมกับการรายงานว่าเหมาะสมกับปฏิกิริยาเฟนตันส่วนใหญ่จะเท่ากับ 3 ซึ่งก่อให้เกิดการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสุด โดยค่าที่มากกว่า 3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวเป็นออกซิเจนอย่างรวดเร็วจึงทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}$  เป็นอนุมูลอิสระได้น้อยลง รวมถึงไฮดรอกซิลที่ความเป็นกรดต่างสูง ๆ จะอยู่ในรูป  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ซึ่งไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเช่นกัน [4] หากน้ำมีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 3.5 สมดุลของการละลายจะถูกควบคุมโดย  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ขณะที่

ความเป็นกรดต่างที่มากกว่า 3.5 สมดุลจะถูกควบคุมโดย  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  เพียงอย่างเดียว และการกำจัดมลสารจะมาจากการรวมตะกอน (coagulation) และการเกาะติด (sorption) ไม่ได้มาจากปฏิกิริยาเฟนตัน ในทางกลับกัน หากความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 3.5  $\text{Fe}^{3+}$  จะเป็นตัวควบคุมโดยที่ปฏิกิริยาเฟนตันมีส่วนเกี่ยวข้อง แต่หากน้ำมีความเป็นกรดมาก (น้อยกว่า 2) ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ  $\text{Fe}^{2+}$  จะช้าลงเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะรับโปรตอนกลายเป็น oxonium ion ( $\text{H}_3\text{O}_2^+$ ) ซึ่งมีสถานะเป็น electrophillic ที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนมากกว่าที่จะไป

ทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}$  รวมถึงในสภาวะที่เป็นกรดมาก ๆ  $\text{Fe}^{2+}$  จะอยู่ในรูป  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$  และ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  ซึ่งทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ช้ามาก รวมถึงการเป็นกรดมาก ๆ โปรตอนจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกลายเป็นน้ำ ซึ่งล้วนแต่ลดประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งสิ้น ดังสมการ [4]



ดังนั้นความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2-3 จึงเป็นค่าที่เหมาะสม ซึ่งในกรณีของผงตะไบเหล็กที่มีประจุเป็น 0 นั้น ในสภาวะที่เป็นกรด พื้นผิวของผงเหล็กจะถูกกัดกร่อนและกลายเป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ดังนั้นยิ่งน้ำมีความเป็นกรดมาก การกัดกร่อนจึงยิ่งเกิดได้ดีและรวดเร็ว โดยผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Zhang และคณะ [5] ที่ใช้  $\text{Fe}^0$  จากผงเหล็ก (0.5 กรัม/ลิตร หรือ 8.95 มิลลิโมลาร์) กำจัดสี C.I. acid orange 7 ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตันร่วมกับใช้คลื่นอัลตราโซนิก โดยพบว่าความเป็นกรดต่างยิ่งลดลงจาก 5 มาเป็น 4, 3 และ 2 การกำจัดสียิ่งเพิ่มขึ้น โดยความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 กำจัดสีได้มากที่สุด เนื่องจากผงเหล็กละลายได้ดีขึ้นในกรดแก่ และให้  $\text{Fe}^{2+}$  ขณะที่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในการศึกษานี้ เมื่อละลายในน้ำ จะเกิดการแตกตัวให้  $\text{Fe}^{2+}$  อยู่แล้ว การใช้ความเป็นกรดต่างตั้งแต่ 2, 2.5 และ 2.8 จึงให้ผลที่ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนักหากเทียบกับการใช้ผงตะไบเหล็ก

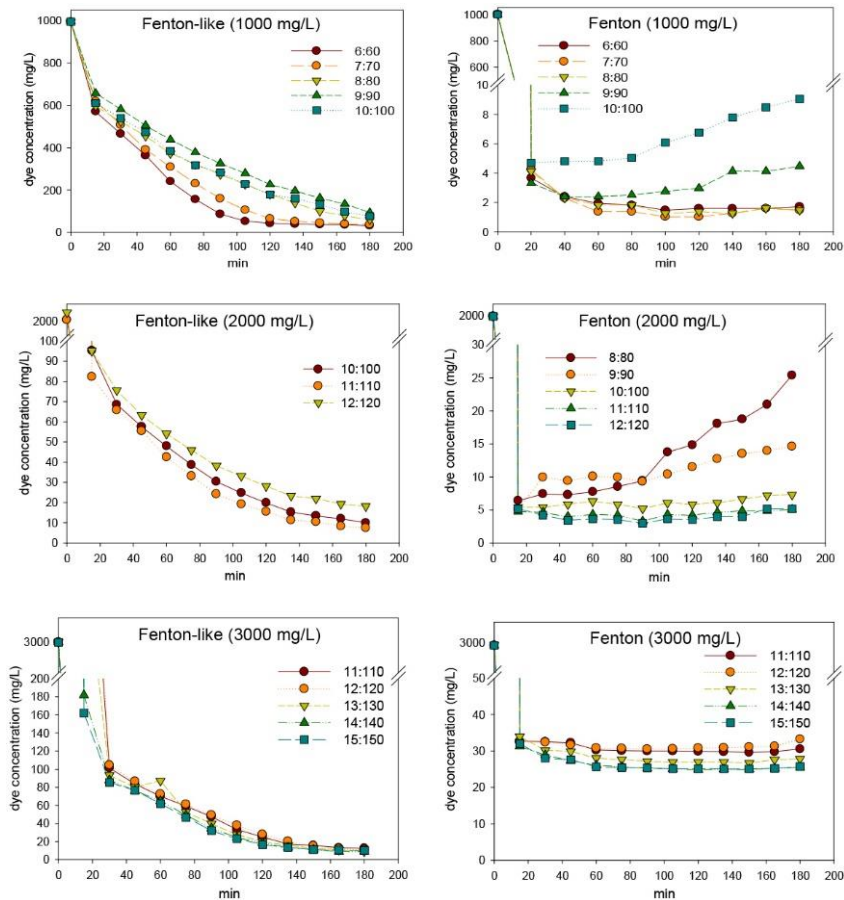
นอกจากนี้โครงสร้างของสีย้อมผ้ายังมีส่วนสำคัญในการกำหนดความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม โดย Neamtu และคณะ [6] ใช้ปฏิกิริยาโฟโตเฟ้นตันในการกำจัดสีรีแอคทีฟเยลโล 84 และสีรีแอคทีฟเฟรด 120 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้สัดส่วนเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.25 : 5 มิลลิโมลาร์ (เทียบเท่ากับ 1 : 20 มิลลิโมลาร์) พบว่าความเป็นกรดต่างที่กำจัดสีรีแอคทีฟเยลโล 84 ได้ดีที่สุด คือ 3

ขณะที่ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 กำจัดสีรีแอคทีฟเฟรด 120 ได้ดีที่สุด ทั้งที่ทั้งคู่เป็นสีรีแอคทีฟเฟ้นเดียวกัน แสดงว่าโครงสร้างของสีมีส่วนสำคัญต่อค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมด้วย

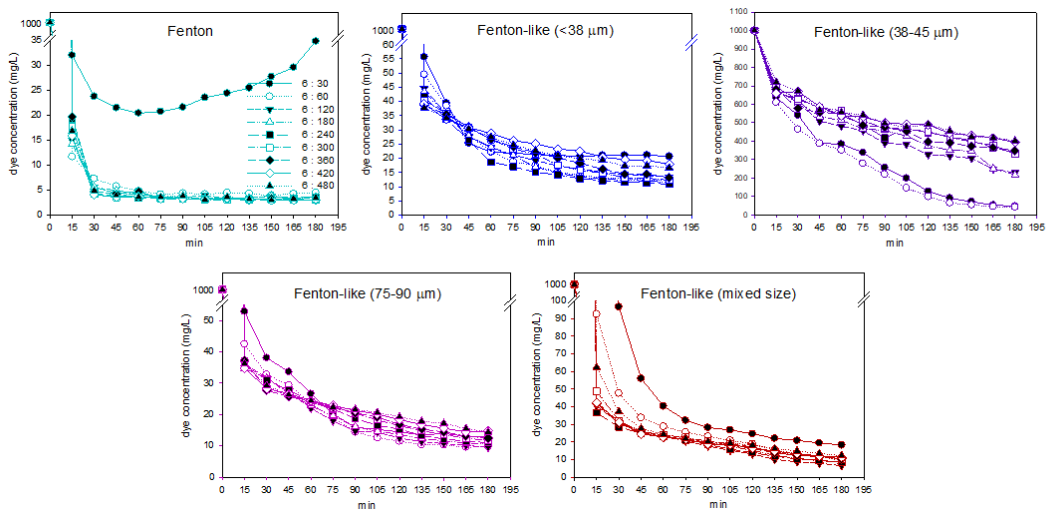
### 3.2 จำนวนโมลของเหล็กที่เหมาะสม

เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ความเข้มข้นของน้ำสีที่สูง จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความเข้มข้นของเหล็กที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาก่อนโดยใช้จำนวนโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10 เท่าของจำนวนโมลของเหล็กที่ใช้ ซึ่งน้ำสีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 38-45 ไมครอน ความเข้มข้นตั้งแต่ 6 ถึง 10 มิลลิโมลาร์ ส่วนน้ำสีความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ผงตะไบเหล็กขนาด <38 ไมครอน ความเข้มข้นตั้งแต่ 8 ถึง 12 มิลลิโมลาร์ และน้ำสีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 75-90 ไมครอน ความเข้มข้น 11-15 มิลลิโมลาร์ อย่างละ 1 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 พบว่าน้ำสีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร สัดส่วนเหล็ก : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตันที่ดีที่สุด คือ 6 : 60 มิลลิโมลาร์ ขณะที่ในปฏิกิริยาเฟ้นตันสัดส่วน 6 : 60, 7 : 70 และ 8 : 80 มิลลิโมลาร์ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน เมื่อทดสอบด้วย randomized complete block design และ Tukey HSD พบว่าความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} > 0.05$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %) จึงเลือกใช้เหล็ก 6 มิลลิโมลาร์ ในการกำจัดสีรีแอคทีฟเฟลู ความเข้มข้นดังกล่าว ส่วนน้ำสีความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นตันพบว่าสัดส่วน 11 : 110 มิลลิโมลาร์กำจัดน้ำสีได้ดีกว่าสัดส่วนอื่น ขณะที่ในปฏิกิริยาเฟ้นตัน สัดส่วน 11 : 110 และ 12 : 120 มิลลิโมลาร์ ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ในครั้งนี้จึงเลือกใช้เหล็ก 11 มิลลิโมลาร์เป็นความเข้มข้นที่



รูปที่ 3 จำนวนโมลของเหล็กที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำสีแสดที่พบลูความเข้มข้น 1,000-3,000 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 4 การกำจัดสีแสดที่พบลู ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ กัน

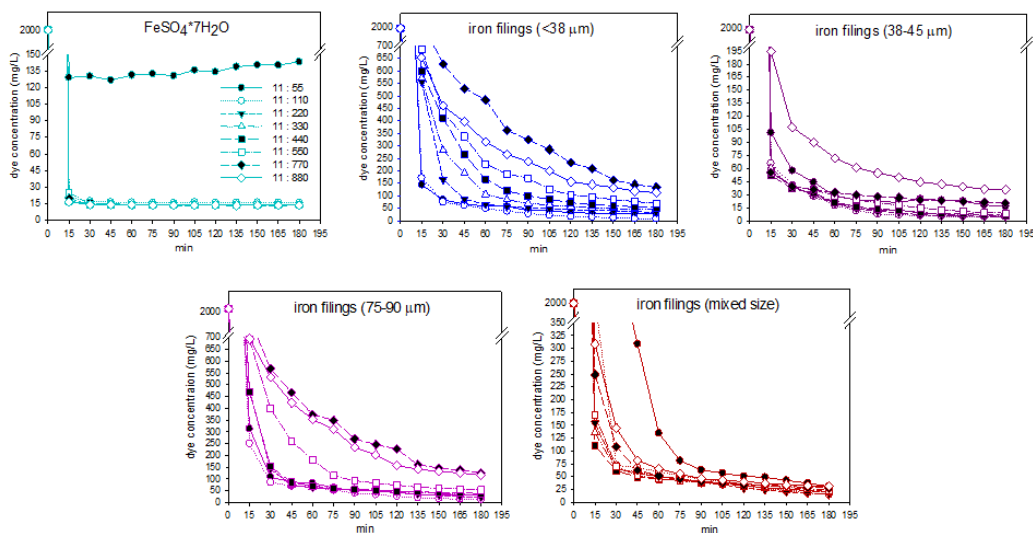
เหมาะสมกับน้ำสี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนน้ำสีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าการใช้สัดส่วน 14:140 และ 15:150 มิลลิโมลาร์ กำจัดน้ำสีได้ดีที่สุด ทั้งปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตัน โดยทั้ง 2 สัดส่วน ให้ความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ในที่นี้จึงเลือกใช้เหล็ก 14 มิลลิโมลาร์ ไปทดสอบความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในหัวข้อ 3.3 ต่อไป

### 3.3 สัดส่วนโดยโมลของเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

หลังจากทราบความเข้มข้นของเหล็กที่ควรใช้แล้ว จึงแปรผันความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 5 เท่าไปจนถึง 80 เท่าของความเข้มข้นของเหล็กทั้งในปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตันที่ใช้ผงตะไบเหล็ก 4 ขนาด ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-6 โดยสัญลักษณ์ในแต่ละรูปนั้นเหมือนกัน จึงแสดงไว้เพียงใน

ปฏิกิริยาเฟนตันเท่านั้น

จากรูปที่ 4 พบว่าในปฏิกิริยาเฟนตัน สัดส่วน 6:30 มิลลิโมลาร์ ให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด (ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 5 เท่าของความเข้มข้นของเหล็ก) ขณะที่สัดส่วนอื่น ๆ ให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมากโดยความแตกต่างนั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน พบว่าการใช้ผงตะไบเหล็กขนาดต่างกัน สัดส่วนที่ดีที่สุดนั้นแตกต่างกันไปด้วย อย่างไรก็ตาม การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10 เท่าของเหล็ก หรือ สัดส่วน 6:60 มิลลิโมลาร์ มักอยู่ในกลุ่มที่กำจัดสีริแอกทีฟได้ดีเสมอ โดยเห็นได้ชัดเจนมากเมื่อใช้ผงตะไบเหล็กขนาด 38-45 และ 75-90 ไมครอน ส่วนน้ำสีริแอกทีฟ ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการศึกษาแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การกำจัดสีริแอกทีฟ ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สัดส่วนเหล็ก : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ กัน

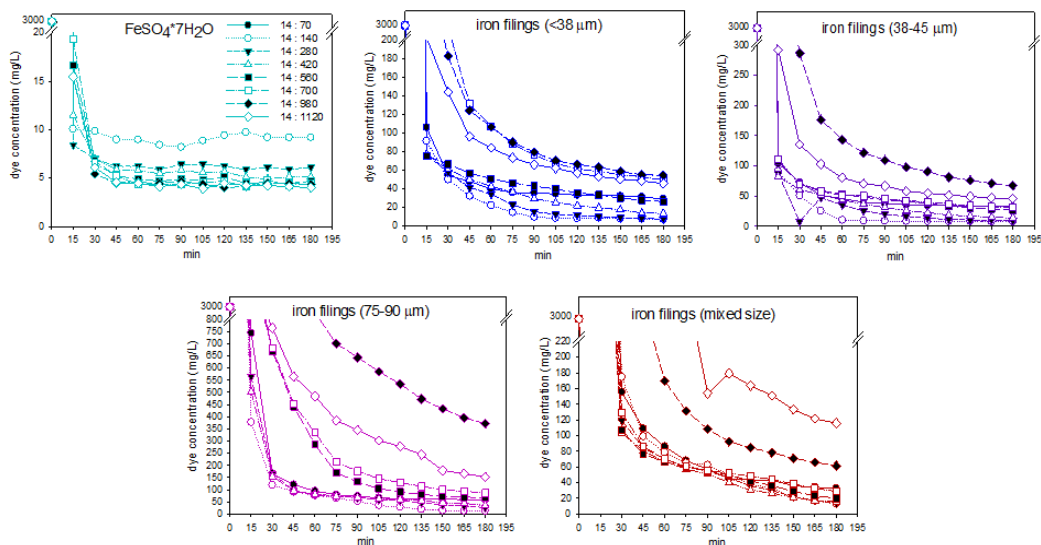
จากรูปที่ 5 พบว่าในปฏิกิริยาเฟนตัน การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นเป็น 5 เท่าของ

เหล็กยังคงให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด ส่วนสัดส่วนอื่นให้ผลแทบไม่ต่างกัน ขณะที่ในปฏิกิริยาเสมือนเฟนตัน



การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10 เท่าของความเข้มข้นเหล็กหรือสัดส่วน 11:110 มิลลิโมลาร์ นั้นอยู่ในกลุ่มประสิทธิภาพสูงในทุกขนาดของผงตะไบเหล็กที่ใช้ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่น้อยเกินไป (สัดส่วน 11:55 มิลลิโมลาร์ ในกรณีที่ใช้ผงตะไบเหล็กขนาดเล็ก) หรือที่มากเกินไป (สัดส่วน 11:770 และ 11

:880 มิลลิโมลาร์ ในกรณีผงตะไบเหล็กขนาด <38, 38-45 และ 75-90 ไมครอน) พบว่าให้ประสิทธิภาพต่ำสุดในปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน ส่วนผลการศึกษาของน้ำสีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงได้ดังรูปที่ 6



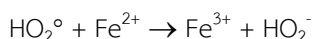
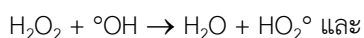
รูปที่ 6 การกำจัดสีรีแอคทีฟบลู ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 6 การใช้ปฏิกิริยาเฟนต์ัน พบว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ การกำจัดสีรีแอคทีฟบลูยิ่งเพิ่มขึ้น โดยในรูปไม่ได้แสดงสัดส่วน 14:70 มิลลิโมลาร์ ไว้เนื่องจากให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมาก หากนำสัดส่วน 14:70 มิลลิโมลาร์ มาแสดงร่วมด้วย จะไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสัดส่วนอื่น ๆ ที่ชัดเจนได้ แต่ทั้งนี้ตั้งแต่สัดส่วน 14:560 มิลลิโมลาร์ เป็นต้นไป (ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 40 เท่าของความเข้มข้นเหล็ก) การกำจัดสีรีแอคทีฟบลูของปฏิกิริยาเฟนต์ันเริ่มใกล้เคียงกัน การศึกษานี้จึงเลือกสัดส่วน 14:560 มิลลิโมลาร์ ให้เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเฟนต์ัน

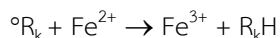
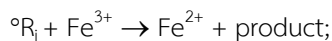
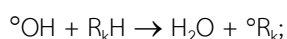
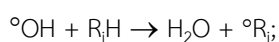
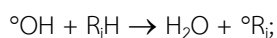
ส่วนในปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ัน พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 10 เท่าของเหล็ก หรือสัดส่วน 14:140 มิลลิโมลาร์ เป็นสัดส่วนที่กำจัดน้ำสีรีแอคทีฟบลูได้ดีที่สุดเช่นเดิม โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป (สัดส่วน 14:980 และ 14:1120 มิลลิโมลาร์) ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำสีที่ต่ำที่สุด

ทั้งนี้ในการศึกษาของผู้วิจัยคณะอื่น ๆ พบว่าสัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:10 และ 1:20 มิลลิโมลาร์ เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดด้วยเช่นกัน เช่น การศึกษาของ Kušić และคณะ [3] ใช้ผงเหล็กในปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ันในสัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ 1:5 ไปจนถึง 1

: 50 มิลลิโมลาร์ ในการกำจัดสีรีแอคทีฟบลู 49 ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ที่ pH 2 สัดส่วน 1:10 มิลลิโมลาร์ กำจัดสีได้สูงสุดคือ 97.5-98.8 % ขณะที่ปฏิกิริยาเฟนตัน สัดส่วน 1:20 มิลลิโมลาร์ กำจัดสีรีแอคทีฟบลู 49 ได้สูงสุด คือ 95.6-96.3 % หรือการศึกษาของ Neamtu และคณะ [6] ใช้ปฏิกิริยาเฟนตันกำจัดสีรีแอคทีฟเยลโล 84 และรีแอคทีฟเรด 120 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร โดยทดลองสัดส่วนเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตั้งแต่ 1:7 ไปจนถึง 1:20 พบว่าสัดส่วน 1:20 เป็นสัดส่วนที่ดีที่สุดสามารถกำจัดสีรีแอคทีฟเยลโล 84 ได้ 97.5 % และกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 81.3 % ภายในเวลา 15 นาที อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่ได้ถูกใช้งานจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลกลายเป็นน้ำและเปอร์ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2^\circ$ ) ซึ่งมีฤทธิ์ในการออกซิไดซ์ที่อ่อนกว่าไฮดรอกซิลมาก อีกทั้งยังแย่งทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}$  กลายเป็น  $\text{Fe}^{3+}$  อีกด้วย ดังสมการ [4,7]



นอกจากนี้สัดส่วนระหว่างเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ไม่เหมาะสม ยังสามารถทำให้น้ำสีที่บำบัดแล้วเกิดสีขึ้นมาใหม่ได้ดังเช่นในรูปที่ 3 ในกรณีของปฏิกิริยาเฟนตัน (1,000 และ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร) ที่พบว่าความเข้มข้นของน้ำสีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ผ่านไป และรูปที่ 4 ในปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา dimerization ของโครงสร้างสีที่คืนกลับดังสมการ [8]



โดย R เป็นตัวแทนของโมเลกุลสี ซึ่งกรณีของสี Reactive Blue LX ในการศึกษาครั้งนี้ บริษัท Everzol ผู้ผลิตไม่สามารถเปิดเผยโครงสร้างของสี แต่สีรีแอคทีฟนั้นจะมีโครงสร้างของกลุ่ม azo ( $-\text{N}=\text{N}-$ ) อย่างน้อย 1 ตำแหน่ง ยึดเกาะอยู่กับโครงสร้าง aromatic radical ซึ่งพันธะของกลุ่ม azo จะเป็นเป้าหมายหลักที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล จากปฏิกิริยาเฟนตัน/เสมือนเฟนตันเข้าทำลาย [9] โมเลกุลของสี  ${}^\circ\text{R}_i$ ,  ${}^\circ\text{R}_j$  และ  ${}^\circ\text{R}_k$  ในสมการจึงเป็นตัวแทนของอนุมูลอิสระของสีกลุ่มโครงสร้างต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยา hydrogen abstraction จากการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ จากนั้น  ${}^\circ\text{R}_i$ ,  ${}^\circ\text{R}_j$  และ  ${}^\circ\text{R}_k$  สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องทั้งในรูปของการผลิต  $\text{Fe}^{2+}$  หรือเกิดการรวมตัวกันเองกลายเป็น dimer และเกิดเป็นสีขึ้นมาใหม่ หรือเป็นตัวออกซิไดซ์ทำให้  $\text{Fe}^{2+}$  กลายเป็น  $\text{Fe}^{3+}$  ได้ทั้งสิ้น [8]

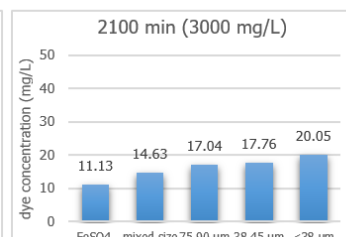
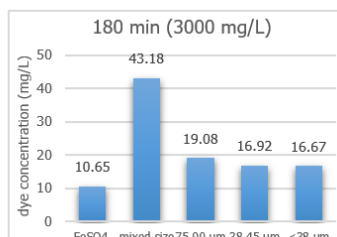
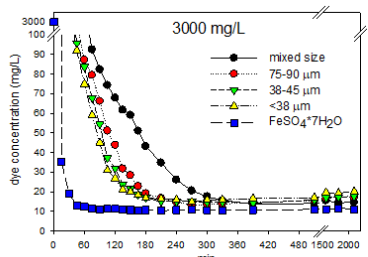
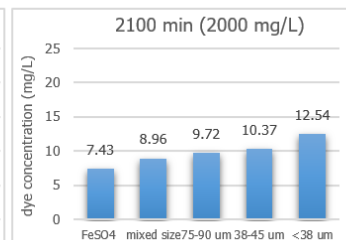
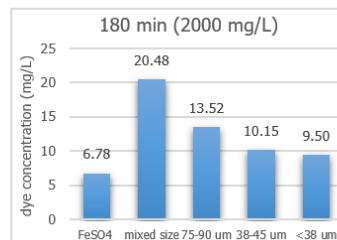
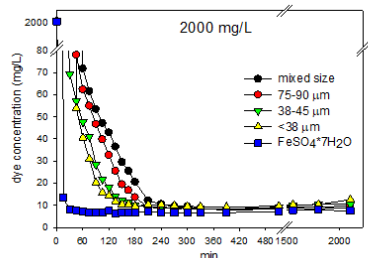
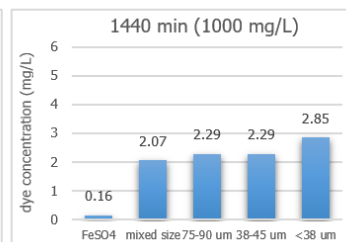
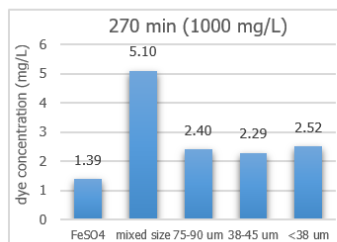
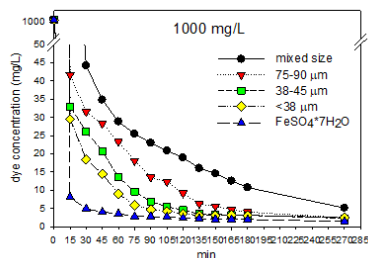
### 3.4 การเปรียบเทียบปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตัน

เมื่อทราบสัดส่วนของเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอคทีฟบลูในน้ำที่ดีที่สุดแล้ว ลำดับต่อไปจึงเป็นการใช้สัดส่วนดังกล่าวกำจัดน้ำสีความเข้มข้น 1,000-3,000 มิลลิกรัม/ลิตรพร้อม ๆ กัน โดยเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้นานขึ้น ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 7 โดยรูปกราฟเส้นเป็นความเข้มข้นของน้ำสีที่ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ส่วนรูปกราฟแท่งเป็นความเข้มข้นที่พบจากการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและเสมือนเฟนตันที่ใช้ผงตะไบเหล็กขนาดต่างกันในช่วงเวลาต่าง ๆ

จากกราฟเส้นในรูปที่ 7 ชัดเจนว่าปฏิกิริยาเฟนตันกำจัดสีรีแอคทีฟบลูได้รวดเร็วกว่าปฏิกิริยา

เสมือนเฟ้นต้นในทุกความเข้มข้น ซึ่งในกรณีของปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น พบว่าผงตะไบเหล็กขนาดยิ่งเล็กลงยิ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำสี โดยประสิทธิภาพเรียงจากขนาดน้อยกว่า  $38 > 38-45 > 75-90$  ไมครอน  $>$  คละขนาด สาเหตุน่าจะมาจากปริมาณพื้นที่ผิวของผงตะไบเหล็ก โดยขนาดยิ่งเล็กลง พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยายิ่งมีมากขึ้น เมื่อปรับสภาพของน้ำให้เป็นกรด เหล็กประจุ 0 จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน

ประจุ +2 ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นผงเหล็กยิ่งละเอียด การแตกตัวจะยิ่งง่าย อีกทั้งผงเหล็กที่ขนาดใกล้เคียงกันจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าผงเหล็กที่คละขนาดซึ่งขาดความสม่ำเสมอในการแตกตัว โดยขนาดและรูปร่างของผงตะไบเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยรูปซ้ายมือเป็นการใช้กำลังขยาย 250 เท่า และรูปขวามือเป็นการใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า



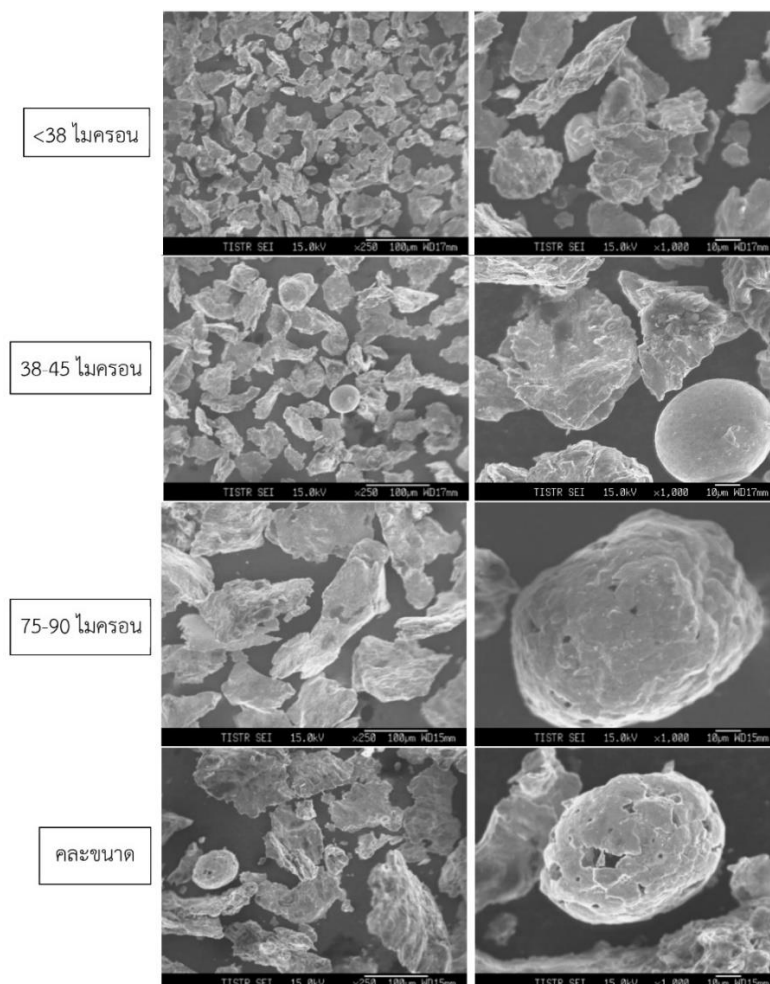
รูปที่ 7 การกำจัดสีรีแอคทีฟบลู ความเข้มข้น 1,000-3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยปฏิกิริยาเฟ้นต้นและเสมือนเฟ้นต้น

อย่างไรก็ตาม เมื่อปล่อยให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง (รูปที่ 7 กราฟแท่ง) พบว่าผงตะไบเหล็กแบบคละขนาดสามารถลดความเข้มข้นของน้ำสีได้มากที่สุด ขณะที่ผง

ตะไบเหล็กขนาดยิ่งเล็กลง ยิ่งเหลือความเข้มข้นของน้ำสีมาก ซึ่งในกรณีของน้ำสี 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อครบเวลา 270 นาที ความเข้มข้นของน้ำสีคงเหลือจากปฏิกิริยาเฟ้นต้น คือ 1.39 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่ความ

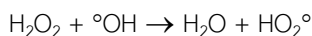
เข้มข้นคงเหลือจากปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้นอยู่ในช่วง 2.29-2.52 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เมื่อปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจนครบ 1,440 นาที พบว่าความเข้มข้นของน้ำสีจากปฏิกิริยาเฟ้นต้นเหลือเพียง 0.16 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้น พบว่าผงตะไบเหล็กคละขนาดลดน้ำสีลงได้มากที่สุดเหลือความเข้มข้น 2.07 มิลลิกรัม/ลิตร โดยค่าความเป็นกรดต่างสุดท้ายในนาที่ที่ 1,440 พบว่าคู่ปฏิกิริยาเฟ้นต้นมีค่า 2.06 (ไม่ต่างจากค่าเริ่มต้น) ส่วนตู้ผงตะไบเหล็กคละขนาด (ขนาด 75-90, 38-45 และ <38 ไมครอน) มีค่าความเป็นกรดต่าง 2.17, 2.38, 2.47 และ 2.55 ตามลำดับ โดยขนาดของผงตะไบเหล็กยิ่งเล็ก ค่าความเป็นกรดต่างยิ่งเพิ่ม

จึงเป็นไปได้ว่าสาเหตุที่ตู้ผงตะไบเหล็กขนาด <38 ไมครอน มีสีหลงเหลือมากที่สุดเมื่อครบ 1,440 นาที มาจากความเป็นกรดต่างที่ไม่เหมาะสม เช่นเดียวกับน้ำสีความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าเมื่อครบ 2,100 นาที ค่าความเป็นกรดต่างในตู้ดังกล่าว คือ 2.26, 2.48, 3.11, 3.88, 3.26 ตามลำดับ ส่วนน้ำสีความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าที่เวลา 2,100 นาที ค่าความเป็นกรดต่างในตู้ปฏิกิริยา คือ 2.29, 2.59, 3.34, 3.79 และ 3.56 ตามลำดับ ซึ่งชัดเจนว่าผงตะไบเหล็กทุกขนาด ยกเว้นคละขนาด ให้ค่าความกรดต่างที่เกิน 3 ซึ่งไม่เหมาะสมกับปฏิกิริยาเสมือนเฟ้นต้นทั้งสิ้น



รูปที่ 8 ขนาดและรูปร่างของ  
ผงตะไบเหล็ก ซึ่ง  
ถ่ายภาพจากกล้อง  
จุลทรรศน์แบบส่อง  
กราด

ทั้งนี้สาเหตุที่ค่าความเป็นกรดต่างในน้ำสีเพิ่มขึ้นน่าจะมาจากการที่อนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นน้ำ ความเป็นกรดของน้ำสีจึงค่อย ๆ เจือจางลงเรื่อย ๆ ดังสมการ [4]



โดยผงตะไบเหล็กยังมีขนาดเล็ก การแตกตัวเป็น  $\text{Fe}^{2+}$  ยิ่งเกิดได้ง่ายและทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลอย่างรวดเร็ว ดังสมการ [3]



อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจึงทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กลายเป็นน้ำได้ไวกว่าการใช้ผงตะไบเหล็กขนาดใหญ่หรือคละขนาด ความเป็นกรดต่างของตุ้คละขนาดจึงมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า

จากผลการศึกษาดังกล่าว ชัดเจนว่าสามารถนำผงตะไบเหล็กมาใช้กำจัดสีในน้ำด้วยปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์แทนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในปฏิกิริยาเฟนต์ได้ โดยการบำบัดน้ำสีความเข้มข้น 1,000, 2,000 และ 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในระยะเวลา 3 ชั่วโมงของปฏิกิริยาเฟนต์ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดน้ำสีได้ 99.8, 99.7 และ 99.6 % ตามลำดับ ขณะที่ปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์คิดเป็นประสิทธิภาพได้ 99.7, 99.5 และ 99.4 % ตามลำดับ ซึ่งจัดว่าใกล้เคียงกันมาก โดยในการบำบัดน้ำสี 1 ลิตร ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ต้องใช้เหล็ก 6 มิลลิโมลาร์ ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต 1.6681 กรัม (น้ำหนักโมเลกุล 278.01 กรัม/โมล) แต่ใช้ผงตะไบเหล็กเพียง 0.3351 กรัม (น้ำหนักโมเลกุล 55.847 กรัม/โมล) คิดเป็นค่าใช้จ่ายคือ 1.64 บาท/ลิตร ในกรณีของเฟนต์ และ 0.335 บาท/ลิตร ในเสมือนเฟนต์ ส่วนน้ำสี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เหล็ก 11 มิลลิโมลาร์ คิดเป็นเงิน 3.0 บาท/ลิตร ในเฟนต์ และ 0.61 บาท/ลิตร ในเสมือนเฟนต์ ขณะที่น้ำสี 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ต้องใช้เหล็ก 14 มิลลิ

โมลาร์ คิดเป็นเงิน 3.83 บาท/ลิตรสำหรับเฟนต์ และ 0.78 บาท/ลิตรสำหรับเสมือนเฟนต์ (ราคาเฟอร์รัสซัลเฟต ณ เดือนเมษายน พ.ศ. 2561 คือ 492.2 บาท/500 กรัม ราคาผงตะไบเหล็ก คือ 500 บาท/500 กรัม) การนำผงตะไบเหล็กมาใช้ในปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์เพื่อบำบัดสีในน้ำเสียจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการใช้ปฏิกิริยาเฟนต์

#### 4. สรุปผลการศึกษา

การกำจัดสีรีแอกทีฟฟลูออโรในน้ำในการศึกษานี้ ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเฟนต์และเสมือนเฟนต์ โดยความเป็นกรดต่างที่สูงเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวกลายเป็นออกซิเจน และไอออนเหล็กจะอยู่ในรูป  $(\text{FeOH})_3$  ซึ่งไม่ไวในการทำปฏิกิริยา ส่วนความเป็นกรดต่างที่ต่ำเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะรับโปรตอนกลายเป็น  $\text{H}_3\text{O}_2^+$  และไอออนเหล็ก  $\text{Fe}^{2+}$  จะอยู่ในรูป  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$  และ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  ซึ่งทำปฏิกิริยาได้ช้ามาก รวมถึงอนุมูลอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตอนกลายเป็นน้ำได้ ทั้งนี้สัดส่วนโดยโมลระหว่างเหล็ก:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมกับการกำจัดน้ำสีรีแอกทีฟฟลูออโร ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร คือ 6:60 มิลลิโมลาร์ ทั้งในปฏิกิริยาเฟนต์และเสมือนเฟนต์ ส่วนน้ำสี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร คือ 11:110 มิลลิโมลาร์ ขณะที่น้ำสี 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร สัดส่วนที่เหมาะสมในปฏิกิริยาเฟนต์ คือ 14:560 มิลลิโมลาร์ ส่วนปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ คือ 14:140 มิลลิโมลาร์ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดน้ำสีจากทั้งปฏิกิริยาทั้งสองในระยะเวลา 3 ชั่วโมง คือ 99.7-99.8 % สำหรับความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร, 99.5-99.7 % สำหรับความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และ 99.4-99.6 % สำหรับความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยในกรณีของปฏิกิริยาเสมือนเฟนต์ ผงตะไบเหล็ก

คละขนาดให้ประสิทธิภาพต่ำที่สุดในช่วงเวลา 3 ชั่วโมง แต่ถ้างทำให้เกิดปฏิกิริยานานขึ้น ผงตะไบเหล็กคละขนาดสามารถกำจัดน้ำสีได้เหนือกว่าขนาดอื่น ๆ ได้ อันเป็นผลมาจากค่าความเป็นกรดต่างที่ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับขนาดอื่น ๆ ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับ การสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2560 ตามสัญญาเลขที่ 9/2560 สิริแอคทีฟพลูที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จาก คุณปวิณ โรจนวงศ์ บริษัทแสนทวี อินเทอร์เน็ต จำกัด และจาก คุณวิไลลักษณ์ แก้วเขียว บริษัท วินนิเม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด การวิเคราะห์ด้วย กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้รับความอนุเคราะห์ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สวทช. จึงขอขอบคุณทุกท่านและทุกหน่วยงานเป็นอย่างสูง

## 6. รายการอ้างอิง

- [1] Lin, S.H. and Lai, C.L., 1999, Catalytic oxidation of dye wastewater by metal oxide catalyst and granular activated carbon, *Environ. Int.* 25: 497-504.
- [2] Panswad, T. and Lunagdilok, W., 2000, Decolorization of reactive dyes with different molecular structures under different environmental conditions, *Water Res.* 34: 4177-4184.
- [3] Kušić, H., Božić, L. and Koprivanac, N., 2007, Fenton type processes for minimization of organic content in colored wastewaters: part I: processes optimization, *Dyes Pigments* 74: 380-387.
- [4] Hassan, H. and Hameed, B.H., 2011, Fe-clay as effective heterogeneous Fenton catalyst for the decolorization of reactive blue 4, *Chem. Eng. J.* 171: 912-918.
- [5] Zhang, H., Zhang, J., Zhang, C., Liu, F. and Zhang, D., 2009, Degradation of C.I. Acid Orange 7 by the advanced Fenton process in combination with ultrasonic irradiation, *Ultrasonics Sonochem.* 16: 325-330.
- [6] Neamtu, M., Yediler, A., Siminiceanu, I. and Kettrup, A., 2003, Oxidation of commercial reactive azo dye aqueous solutions by the photo-Fenton and Fenton-like processes, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 161: 87-93.
- [7] Nidheesh, P.V., Gandhimathi, R. and Ramesh, S.T., 2013, Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: A review, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20: 2099-2132.
- [8] Walling, C., 1975, Fenton's reagent revisited, *Acc. Chem. Res.* 8: 125-131.
- [9] Tang, W.Z. and Chen, R.Z., 1996, Decolorization kinetics and mechanisms of commercial dyes by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/iron powder system, *Chemosphere* 32: 947-958.