

# การฟอกสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ในจังหวัดลำพูนโดยกระบวนการโฟโตเฟนตันด้วยแสงอาทิตย์ Decolorization of Textile Wastewater in Lamphun Province by Solar Photo-Fenton Process

สายฝน มะโนคำ, มิกิ กันณะ\* และนีรนุช ไชยรังษี

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

สัมพันธ์ วงศ์นาวา

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ถนนกาญจนาภิเษย อำเภหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Saifon Manokum, Miki Kanna\* and Neeranuch Chairungsi

Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University,

Chang Phuak, Muang, Chiang Mai 50300

Sumpun Wongnawa

Department of Chemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University,

Karnjanavanich Road, Hat Yai, Songkhla 90112

## บทคัดย่อ

การศึกษาการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเพนตันและโฟโตเฟนตัน (UV และแสงอาทิตย์) โดยมีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฟอกสี ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของย้อมสังเคราะห์ อัตราส่วนเริ่มต้นของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$  เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ จากผลการทดลองพบว่าการใช้โฟโตเฟนตันด้วยแสงอาทิตย์ให้ผลดีที่สุด และเมื่อใช้อัตราส่วนของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$  เท่ากับ 4:80 mM ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นเวลา 360 นาที มีประสิทธิภาพในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ทั้ง 3 สี (แดง เหลือง และน้ำเงิน) มากกว่าร้อยละ 80 นอกจากนี้เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการฟอกสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอในจังหวัดลำพูนด้วยสภาวะที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่ามีประสิทธิภาพในการฟอกสีเท่ากับ 76.62 % ค่าซีโอดีลดลง 37 % และค่าความขุ่นลดลง 46 %

คำสำคัญ : การฟอกสี, น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า, โฟโตเฟนตันแสงอาทิตย์

\*ผู้รับผิดชอบบทความ : miki\_kan@cmru.ac.th

## Abstract

The decolorization of synthetic dyes under Fenton and photo-Fenton (UV and solar light) processes were studied. Some influential parameters such as initial concentrations of synthetic dye, initial concentrations of  $\text{Fe}^{2+}$  :  $\text{H}_2\text{O}_2$  ratio were evaluated to find the optimal conditions for the decolorization of synthetic dyes. The optimum result was obtained from the solar photo-Fenton. The decolorization efficiencies of greater than 80 % were achieved from three synthetic dyes (red, yellow and blue) with  $\text{Fe}^{2+}$  :  $\text{H}_2\text{O}_2$  concentration ratio 4:80 mM at pH 3 for 360 minutes. The same process under the same conditions was used to study the efficiency of decolorization of textile wastewater in Lumphun province. The result showed that the decolorization efficiency was 76.62 %, the COD and the turbidity decreased by 37 and 46 %, respectively.

**Keywords:** decolorization; textile wastewater; solar photo-Fenton

## 1. บทนำ

ในภาคเหนือของประเทศไทยมีการทำกิจการย้อมผ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งกิจการโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมหรืออุตสาหกรรมในครัวเรือน ตัวอย่าง เช่น ในอำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน ชาวบ้านประกอบอาชีพย้อมผ้า ผลิตภัณฑ์ส่งออกต่างจังหวัดและต่างประเทศ โดยทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน สีที่ใช้ในการย้อมผ้าเป็นสีเคมี เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการย้อมผ้าจะมีปริมาณน้ำทิ้งจากสีย้อมที่เหลือ รวมทั้งน้ำทิ้งจากการล้างวัสดุอุปกรณ์ ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะทิ้งน้ำเสียลงบ่อซึมหรือบ่อซีเมนต์ แล้วจางรดรดไปทิ้งตามป่า หรือปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะโดยตรง โดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัด ซึ่งการกระทำดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากน้ำทิ้งที่ปล่อยมีสีย้อมปะปนอยู่ซึ่งสีย้อมที่ปรากฏในน้ำทิ้งจากการย้อมผ่านนอกจากก่อให้เกิดความรู้สึกรังเกียจต่อผู้พบเห็นแล้ว น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของสีย้อมสูงยังขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำอีกด้วย

การบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันทั่วไปมีหลายวิธี เช่น กระบวนการทางชีวภาพ (biological process) การ

ตกตะกอน (coagulation) การดูดซับด้วยผงถ่าน (carbon adsorption) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม กระบวนการเหล่านี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถกำจัดของเสียให้หมดภายในครั้งเดียวได้ รวมทั้งต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดค่อนข้างมาก [1,2]

กระบวนการโฟโตเฟนตัน (photo Fenton) เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation process, AOPS) ที่ได้รับความนิยมในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารเคมีเจือปน กระบวนการโฟโตเฟนตันเป็นการใช้กระบวนการเฟนตัน (Fenton process) ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลต (ultra violet) หรือแสงยูวี เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ ) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงที่สุดโดยจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสีย้อมและนำไปสู่การสลายโมเลกุลนั้นในที่สุด โดยภาพรวมสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนและทำให้ความเป็นพิษลดลง ข้อดีของกระบวนการนี้คือสารที่ใช้ราคาไม่แพง สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี มีประสิทธิภาพในการสลายสารอินทรีย์สูง ไม่เกิดตะกอน (sludge) และเกิดสารมัธยันต์ (intermediate) ที่มีพิษต่ำ [3] อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ได้อีกด้วย ตัวอย่าง

เช่น ได้มีการนำกระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงอาทิตย์สลายสีย้อม Orange24 [4] และ สีย้อม CI Reactive Blue 4 [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาแนวทางในการนำกระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงอาทิตย์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าในอำเภอลำพูน จังหวัดลำพูน

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 อุปกรณ์

ตู้แสงยูวี ขนาด  $0.7 \times 0.7 \times 0.5$  ลูกบาศก์เมตร ภายในติดตั้งหลอดกำเนิดแสงยูวี (หลอด blacklight) ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 5 หลอด (F20T12-BLB, GE, USA)

### 2.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา มีดังนี้ คือ กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , AR Grade, Labscan, Germany) ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ , AR Grade, Merck, Germany) โพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , AR Grade, Merck, Germany) 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต ( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , AR Grade, Merck, Germany) เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Laboratory Grade, Ajax, Australia) เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ , AR Grade, Merck, Germany) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , AR Grade, Merck, Germany) และเมอร์คิวริกซัลเฟต ( $\text{HgSO}_4$ , Laboratory Grade, Rankem, India)

สีย้อมสังเคราะห์ 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน เป็นสีย้อมฝ้ายรุ่นพิเศษ (ตราเรือสำเภา บริษัทหิวงษ์สัมพันธ์ จำกัด ประเทศไทย) ใช้เตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำปราศจากไอออน (Milipore, Milli-Q & Elix 10) ใช้ในการเตรียมสารละลายทั้งหมดตลอดการทดลอง

### 2.3 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้ คือ เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV1600, Shimadzu, Japan) เครื่องวัดค่าพีเอช (Consort C861, multi-parameter analyzer, Belgium) เครื่องวัดความขุ่น (2100P Portable Turbidimeter, Hach Company, USA) และเครื่องวัดความเข้มแสง (LX 107, Lutron, Taiwan)

### 2.4 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เลือกสีย้อมฝ้ายที่ชาวบ้านชุมชนต้นฝิ่ง จังหวัดลำพูน ใช้ในกระบวนการย้อมผ้า จำนวน 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน

#### 2.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมเคมี 3 สี ทำการศึกษาโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแดงเท่ากับ 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 % w/v ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเหลืองและสีน้ำเงินเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 % w/v ในการศึกษาเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธี (กระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเพนต์รีเอเจนต์) โดยกระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงอาทิตย์นำน้ำสีย้อมวางรับแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่าง 10:00-16:00 น. (ค่าความเข้มแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 30,000 LUX) กระบวนการโฟโตเพนต์ที่ใช้แสงยูวีนำน้ำสีย้อมไปวางในตู้ทดสอบปฏิกิริยาที่ติดตั้งหลอดยูวีไว้ใน (ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 205 LUX) และกระบวนการเพนต์รีเอเจนต์ทำการหุ้มภาชนะที่ทำการทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อป้องกันการรบกวนจากแสง ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 3 ด้วย HCl และเติมสารละลาย

เฟนตันอัตราส่วน 4 : 20 มิลลิโมลาร์ (คือ สารละลายผสมระหว่างสารละลาย  $\text{Fe}^{2+}$  ความเข้มข้น 4 มิลลิโมลาร์ และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์) [6] ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายสีส้มและผสมสารละลายให้เข้ากัน และนำไปทดสอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ เก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{\text{max}}$  เท่ากับ 508, 403 และ 585.8 นาโนเมตร สำหรับสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ตามลำดับ ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละการฟอกสีโดยใช้สมการ (1) ทำการทดลอง 3 ครั้ง

$$\text{ร้อยละการฟอกสี} = \left[ \frac{A_0 - A_t}{A_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาเริ่มต้น

$A_t$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาใด ๆ

2.4.2 การศึกษาอัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ )

ผลของอัตราส่วนของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$  ที่มีการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ ศึกษาโดยใช้อัตราส่วนของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$  เท่ากับ 4 : 20, 4 : 40, 4 : 80, 4 : 120 และ 4 : 160 มิลลิโมลาร์ มีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

ใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากสีส้มเคมี 3 สี ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 % w/v ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีส้มให้เท่ากับ 3 ด้วย HCl และเติมสารละลายเฟนตันอัตราส่วนต่าง ๆ ดังที่กล่าวข้างต้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายสีส้มและผสมสารละลายให้เข้ากัน และนำไปวางรับแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่าง 10:00-16:00 น. เก็บน้ำตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปวัดค่า

การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{\text{max}}$  ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละการฟอกสีด้วยสมการ (1) ทำการทดลอง 3 ครั้ง

## 2.5 ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า

### 2.5.1 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ตัวอย่างน้ำเสียเก็บจากโรงงานย้อมผ้าในหมู่บ้านต้นผึ้ง ตำบลแม่แรง อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง คือ ใช้น้ำตัวอย่างที่จะเก็บแล้วขวดเก็บตัวอย่าง (ขวดโพลีเอทิลีนขนาด 500 มิลลิลิตร) ก่อน 2-3 ครั้ง แล้วเก็บน้ำตัวอย่างให้มีปริมาตร 2 ใน 3 ของขวดเก็บตัวอย่าง โดยทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผิวหน้า ซึ่งเป็นแอ่งน้ำก่อนน้ำทิ้งเข้าสู่บ่อซีเมนต์ เมื่อเก็บน้ำตัวอย่างแล้วจึงปิดฝาขวดทันที และนำขวดบรรจุ น้ำตัวอย่างแช่เย็นเพื่อรักษาสภาพของน้ำตัวอย่างที่จะใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับน้ำตัวอย่างที่จะต้องหาค่าซีไอดีเริ่มต้น ต้องปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 โดยใช้กรดซัลฟิวริก 2 มิลลิลิตร ต่อ น้ำตัวอย่าง 1,000 มิลลิลิตร ในการปรับค่าพีเอช [7]

### 2.5.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันแสงอาทิตย์

ใช้ตัวอย่างน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 และเติมสารละลายเฟนตันอัตราส่วน 4 : 80 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในสารละลายสีส้มและผสมสารละลายให้เข้ากัน นำไปวางรับแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาระหว่าง 10:00-16:00 น. เก็บน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{\text{max}}$  เท่ากับ 625.5 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่วิเคราะห์ได้มาทำการคำนวณหาค่าร้อยละการฟอกสี รวมทั้งวัดค่าความขุ่น

และค่าซีโอดี ก่อนและหลังการบำบัดน้ำเสีย ทำการทดลอง 3 ครั้ง

### 2.5.3 การหาค่าซีโอดี (COD)

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีของตัวอย่างน้ำเสียทั้งก่อนและหลังการบำบัด ใช้วิธี open reflux method [8] ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้ เติมตัวอย่างน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดกลั่นขนาด 500 มิลลิลิตร เติม  $\text{HgSO}_4$  ปริมาณ 1 กรัม สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร แล้วคนจน  $\text{HgSO}_4$  ละลาย จากนั้นเติมสารละลาย  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ที่มี  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  ผสมอยู่ 70 มิลลิลิตร จากนั้นทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น ล้างคอนเดนเซอร์ด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรน้ำตัวอย่างเป็น 140 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลาย ferroin indicator 2-3 หยด แล้วไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate 0.25 โมลาร์ จนน้ำตัวอย่างเปลี่ยนสี และบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate ที่ใช้ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนจากตัวอย่างน้ำเสียเป็นน้ำกลั่น แล้วนำไปคำนวณหาค่าซีโอดี ดังสมการ (2)

$$\text{ค่าซีโอดี} = \frac{(A-B) \times M \times 8000}{\text{sample (mL)}} \quad (2)$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำกลั่น

B คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง

M คือ ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน ferrous ammonium sulfate ที่ใช้ในการไทเทรต sample (มิลลิลิตร) คือ ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้ศึกษา

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 3.1 ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

กระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพดีในสภาวะที่เป็นกรด [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้พีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเคมีเท่ากับ 3

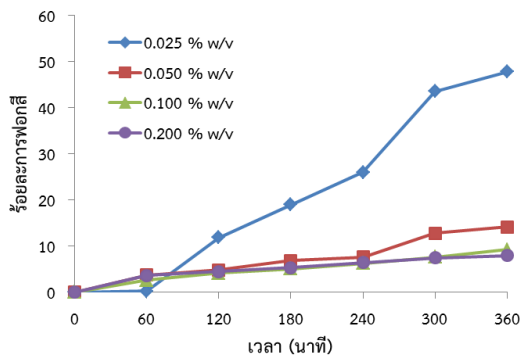
#### 3.1.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมเคมีที่มีต่อการฟอกสีทั้ง 3 วิธี ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นต่าง ๆ ค่าพีเอช (คงที่) เท่ากับ 3 โดยการปรับ พีเอชด้วย HCl และอัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน (คงที่) เท่ากับ 4 : 20 มิลลิโมลาร์ และค่าประสิทธิภาพในการฟอกสี หาได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{max}$  ของสีย้อมแต่ละสีมาคำนวณหาร้อยละการฟอกสี โดยค่า  $\lambda_{max}$  ของสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน เท่ากับ 508, 403 และ 585 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

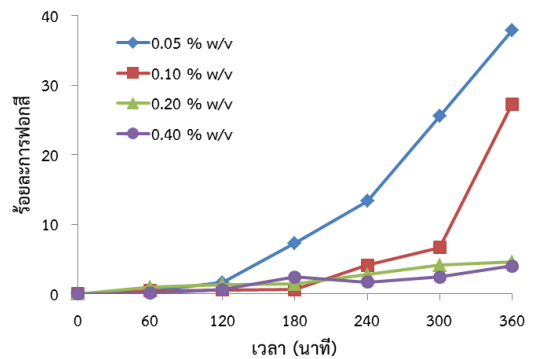
ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.2 % w/v ที่มีต่อการฟอกสีแดงด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ แสดงดังรูปที่ 1ก-1ค

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 % w/v ที่มีต่อการฟอกสีเหลืองด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ แสดงดังรูปที่ 2ก-2ค

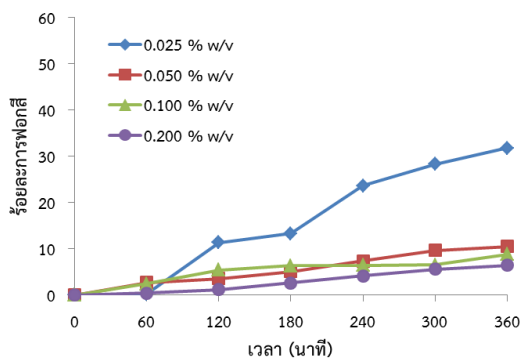
ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.4 % w/v ที่มีต่อการฟอกสีน้ำเงินด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ แสดงดังรูปที่ 3ก-3ค



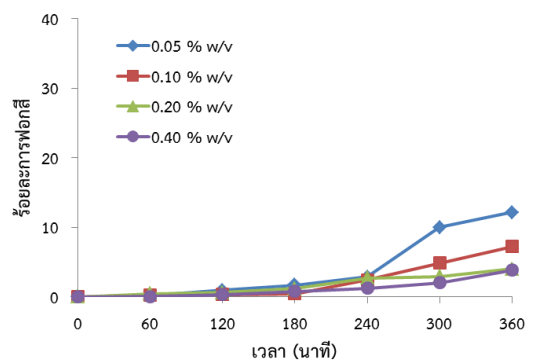
(ก) กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์



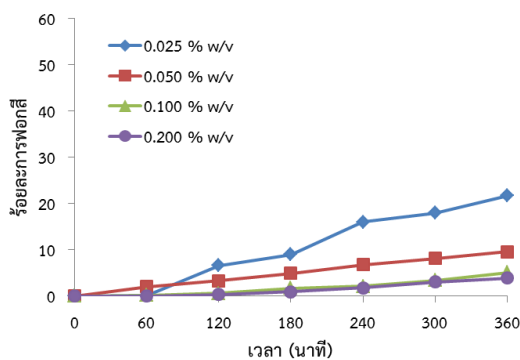
(ก) กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์



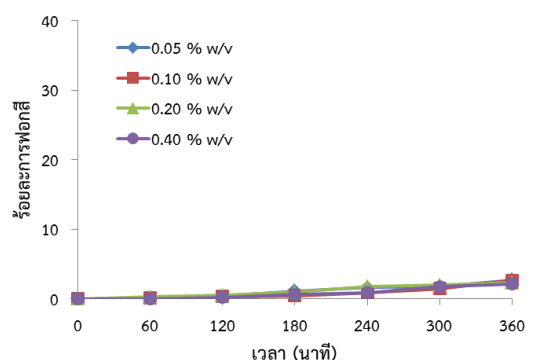
(ข) กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี



(ข) กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี



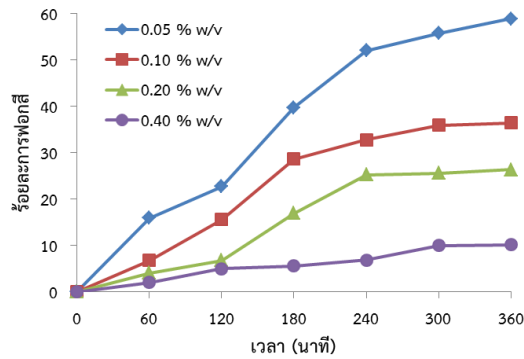
(ค) กระบวนการเพนตันรีเอเจนท์



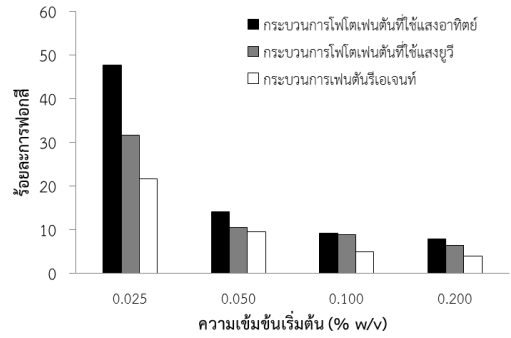
(ค) กระบวนการเพนตันรีเอเจนท์

รูปที่ 1 ผลการฟอกสีย้อมสีแดงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ โดยกระบวนการ (ก) โฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ (ข) โฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และ (ค) เพนตันรีเอเจนท์

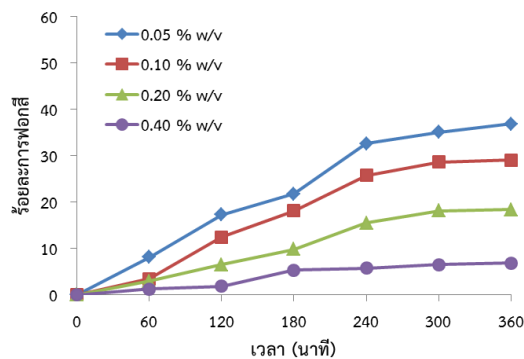
รูปที่ 2 ผลการฟอกสีย้อมสีเหลืองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ โดยกระบวนการเพนตัน (ก) โฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ (ข) โฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และ (ค) เพนตันรีเอเจนท์



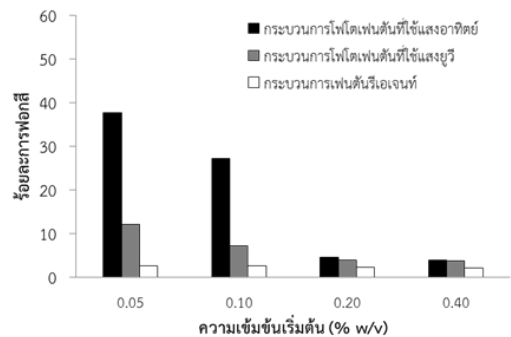
(ก) กระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์



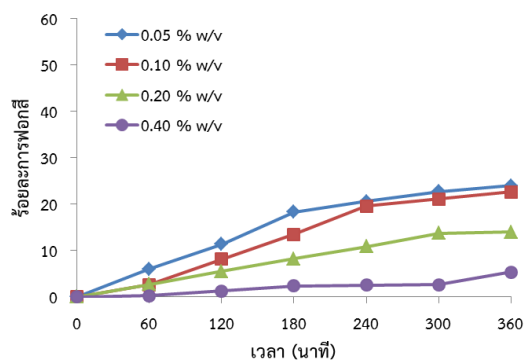
(ก) สีแดง



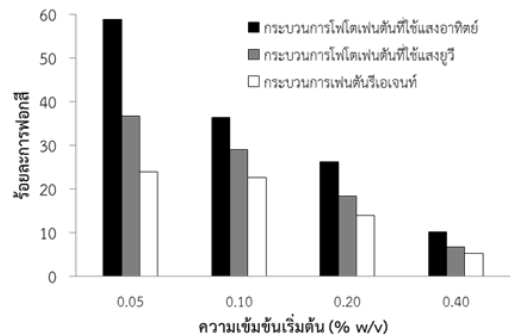
(ข) กระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงยูวี



(ข) สีเหลือง



(ค) กระบวนการเพนตันรีเอเจนท์



(ค) สีน้ำเงิน

รูปที่ 3 ผลการพอกสีย้อมสีน้ำเงินที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ โดยกระบวนการเพนตัน (ก) โฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ (ข) โฟโตเพนตันที่ใช้แสงยูวี และ (ค) เพนตันรีเอเจนท์

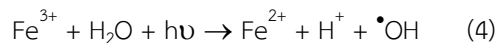
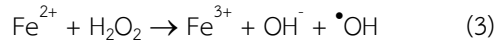
รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลของแสงที่มีต่อการพอก (ก) สีแดง (ข) สีเหลือง และ (ค) สีน้ำเงิน ที่เวลา 360 นาที เมื่อใช้กระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเพนตันรีเอเจนท์

ผลของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นพบว่าค่าพีเอชของสารละลายสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ 3 และอัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ) เท่ากับ 4 : 20 มิลลิโมลาร์ กระบวนการฟอกสีทั้ง 3 วิธีสามารถฟอกสีย้อมทั้ง 3 สีได้ โดยพบว่าประสิทธิภาพในการฟอกสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Muruganandham และ Swaminathan [10] ที่ศึกษาการบำบัดน้ำสีย้อมด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีลดลง ซึ่ง Taha และคณะ [11] ได้อธิบายว่าการฟอกสีจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงไปโดยสารละลายน้อยลง และส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลลดลง จึงเป็นสาเหตุให้การฟอกสีลดลงด้วย

เมื่อนำผลการทดลองที่เวลา 360 นาทีของกระบวนการฟอกสีทั้ง 3 วิธี มาสร้างกราฟเปรียบเทียบผลของแสงที่มีต่อการฟอกสีย้อมทั้งสามสีจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 พบว่าแสงมีผลต่อประสิทธิภาพในการฟอกสีย้อม โดยจากกราฟแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์และกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวีมีประสิทธิภาพในการฟอกสีสูงกว่ากระบวนการเฟนตันรีเอเจนต์เนื่องจากกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์และแสงยูวีเป็นกระบวนการที่นำแสงมาใช้ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งความยาวคลื่นของแสงที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการโฟโตเฟนตันไม่ควรเกิน 400 นาโนเมตร [12] ทำให้สามารถเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลได้ในปริมาณที่สูงขึ้น โดยไฮดรอกซิลเรดิคอลเกิดจากการทำปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตัน ดังสมการ (3) และเมื่อมีการฉายแสงให้กับกระบวนการเฟนตันนอกจากจะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลแล้วยังทำให้เกิดการเปลี่ยน

รูปของเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเฟนตันกลับมาเป็นเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ด้วยกระบวนการโฟโตรีดักชันของเฟอร์ริกไอออนอีกด้วย ดังสมการ (4) [13]



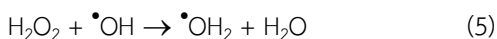
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฟอกสีของกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์และกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี พบว่าการใช้แสงอาทิตย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีสูงกว่าการใช้แสงยูวี เนื่องจากหลอดกำเนิดแสงยูวีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร [14] ซึ่งอยู่ในช่วงของรังสียูวีเอ (315-380 นาโนเมตร) ในขณะที่แสงอาทิตย์ แม้จะมีองค์ประกอบจากแสงยูวีต่ำแต่ก็ครอบคลุมช่วงแสงยูวีที่กว้างกว่า คือ ในช่วงรังสียูวีเอ ยูวีบี (280-315 นาโนเมตร) และยูวีซี (ต่ำกว่า 280 นาโนเมตร) จึงทำให้พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตไลซิสของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่ามากกว่าดังนั้นเมื่อเราใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคอลในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีสูงขึ้นตามไปด้วย [15]

### 3.1.2 ผลของอัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ )

ผลของอัตราส่วนของสารละลายเฟนตันที่มีต่อการฟอกสีโดยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ 0.05 % w/v ค่าพีเอชเท่ากับ 3 อัตราส่วนของสารละลายเฟนตันเท่ากับ 4 : 20, 4 : 40, 4 : 80, 4 : 120 และ 4 : 160 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ แสดงผลการทดลองได้ดังนี้

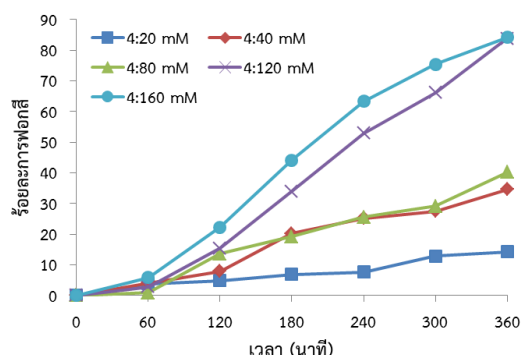
ผลของอัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ) ที่มีต่อการฟอกสารละลายสี

ย้อม (ก) สีแดง (ข) สีเหลือง และ (ค) สีน้ำเงิน ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 5ก, 5ข และ 5ค ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่เวลา 360 นาที พบว่าเมื่อใช้กระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์บำบัดสีย้อมสีแดงเมื่อใช้สารละลายเพนตันอัตราส่วน 4 : 20, 4 : 40, 4 : 80, 4 : 120 และ 4 : 160 มิลลิโมลาร์ สามารถฟอกสีย้อมได้เท่ากับร้อยละ 14.18, 34.51, 40.21, 41.04 และ 41.96 ตามลำดับ การฟอกสีย้อมสีเหลืองพบว่าสามารถฟอกสีย้อมได้เท่ากับ ร้อยละ 37.83, 76.89, 78.12, 79.23, และ 79.87 ตามลำดับ และในการฟอกสีย้อมสีน้ำเงินพบว่าสามารถฟอกสีย้อมได้เท่ากับ ร้อยละ 58.90, 69.57, 80.16, 83.63 และ 83.80 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าผลการฟอกสีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น และเมื่อถึงความเข้มข้นค่าหนึ่งการฟอกสีจะเริ่มคงที่หรือลดลงเล็กน้อย โดยการฟอกสีแดงประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่ที่อัตราส่วน 4 : 120 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่การฟอกสีเหลืองและสีน้ำเงินประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่ที่ 4 : 80 มิลลิโมลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Neyens และ Baeyens [16] ซึ่งอธิบายผลของอัตราส่วนของ  $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$  ดังนี้ คือ เมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง อัตราการสลายตัวของสีย้อมจะคงที่และค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ไฮดรอกซิลเรดิคัลบางส่วนไปจับกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แล้วเกิดเป็น  $\cdot\text{OH}_2$  ดังสมการ (5) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีลดลง เนื่องจาก  $\cdot\text{OH}_2$  จะมีความว่องไวน้อยกว่าไฮดรอกซิลเรดิคัล [17]

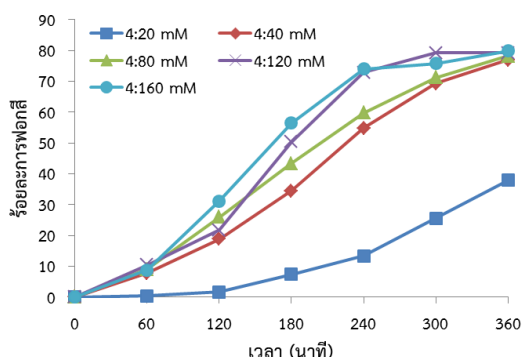


จากการศึกษาสภาวะข้างต้นได้ข้อมูลที่เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกสีย้อมเป็น 4 : 80 มิลลิโมลาร์ สำหรับใช้ในฟอกสีทั้งสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงินได้ ซึ่งจะนำไปทดสอบกับน้ำเสียที่มีสีย้อมปนใน

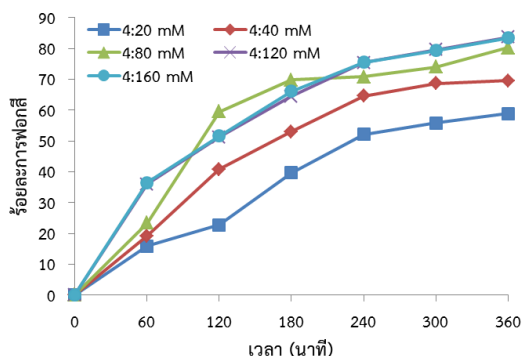
หัวข้อ 3.2 เนื่องจากน้ำเสียที่ทิ้งจากโรงงานไม่ได้เกิดจากการย้อมสีเพียงอย่างเดียวเท่านั้น



(ก) สีแดง



(ข) สีเหลือง

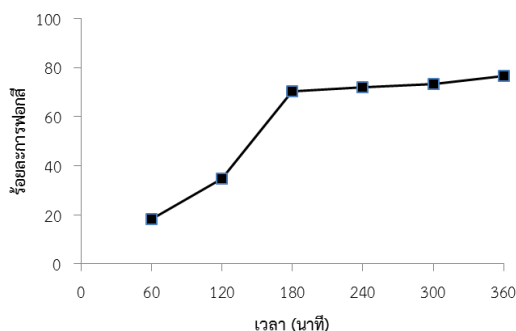


(ค) สีน้ำเงิน

รูปที่ 5 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนของสารละลายเพนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ) ที่มีต่อการฟอกสารละลายสีย้อม (ก) สีแดง (ข) สีเหลือง และ (ค) สีน้ำเงิน ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันที่ใช้แสงอาทิตย์

### 3.2 ผลการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า

น้ำเสียที่เก็บจากโรงงานย้อมผ้ามีสีเขียวมืด ค่าพีเอชเท่ากับ 8.61 และอุณหภูมิ 31.6 °C การศึกษาประสิทธิภาพในการฟอกสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า โดยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ ใช้สภาวะในการทดลองดังนี้ อัตราส่วนของสารละลายเฟนตันเท่ากับ 4 : 80 มิลลิโมลาร์ ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพในการฟอกสีที่เวลา 60, 120, 180, 240, 300 และ 360 นาที เท่ากับ 18.32, 34.60, 70.33, 71.84, 73.24 และ 76.62 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ผลการฟอกสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าจากค่าซีโอดีและความขุ่นโดยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ใช้อัตราส่วนของสารละลายเฟนตันเท่ากับ 4 : 80 มิลลิโมลาร์ ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นเวลา 360 นาที ดังแสดงในตารางที่ 1

### 4. สรุป

การฟอกสีน้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมเคมี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเฟนตัน

ที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผล คือ ผลของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น ผลของอัตราส่วนสารละลายเฟนตัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการฟอกสีจะลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการฟอกสีทั้งสามที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเดียวกัน พบว่าลำดับของประสิทธิภาพในการฟอกสีจากมากไปหาน้อย คือ สีน้ำเงิน สีเหลือง และ สีแดง ตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาอัตราส่วนสารละลายเฟนตันพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารละลายเฟนตันจะทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกสีเพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงความเข้มข้นค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการฟอกสีจะมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 1 ค่าการฟอกสี ค่าซีโอดีและค่าความขุ่นก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์

| ค่าที่วิเคราะห์   | ก่อนบำบัด | หลังบำบัด | ร้อยละการลดลง |
|-------------------|-----------|-----------|---------------|
| การฟอกสี (Abs)    | 0.3434    | 0.0803    | 76.62         |
| ค่าซีโอดี (mg/L)  | 445       | 281       | 37            |
| ค่าความขุ่น (NTU) | 55.2      | 29.8      | 46.0          |

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ พบว่าเมื่อบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์จะมีค่าประสิทธิภาพในการฟอกสีสูงที่สุด รองลงมา คือ กระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงยูวี และกระบวนการเฟนตันรีเอเจนท์ ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าในหมู่บ้านต้นผึ้ง ตำบลแม่แรง อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของสารละลายเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+} : \text{H}_2\text{O}_2$ ) เท่ากับ 4 : 80 มิลลิโมลาร์ ค่าพีเอชเท่ากับ 3 และใช้เวลาในการบำบัด 360 นาที สามารถกำจัดโมเลกุลสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถฟอกสีได้เท่ากับร้อยละ 76.62 ลดค่าซีไอดีและค่าความขุ่นเท่ากับร้อยละ 37 และ 46 ตามลำดับ

ผลการวิจัยครั้งนี้ได้แนวทางในการนำกระบวนการโฟโตเฟนตันที่ใช้แสงอาทิตย์ไปใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าขนาดเล็ก เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง และยังเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในท้องถิ่นได้อีกทางหนึ่ง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือจากศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และผู้วิจัยขอขอบพระคุณเจ้าของโรงงานย้อมผ้าในหมู่บ้านต้นผึ้ง ตำบลแม่แรง อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน สำหรับข้อมูลและความร่วมมือในการเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tanaka, K., Padermpole, K. and Hisanaga, T., 2000, Photocatalytic degradation of commercial azo dyes, *Water Res.* 34: 327-333.
- [2] Hachem, C., Bocquillon, F., Zahraa, O. and Bouchy, M., 2001, Decolourization of textile industry wastewater by the

photocatalytic degradation process, *Dyes Pigments* 49: 117-125.

- [3] Shu, H.Y., Chany, M.C. and Fan, H.J., 2004, Decolorization of azo dye acid black1 by the  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  process and optimization of operating parameters, *J. Hazard. Mater. B* 113: 210-208.
- [4] Leal, M.T.C., Sánchez, M. and Bandala, E.R., 2006, Solar photo catalytic degradation of azo-dyes by photo-Fenton process, *Dyes Pigments* 69: 144-150.
- [5] Patricia, A., Raquel, F. and Maria, V., 2007, Homogeneous photodegradation of C.I. Reactive Blue 4 using a photo-Fenton process under artificial and solar irradiation, *Dyes Pigments* 74: 127-132.
- [6] Idil, A., Betul, H. and Schmidt, J., 2008, Advance oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes, *Dyes Pigments* 78: 117-130.
- [7] กรมควบคุมมลพิษ, 2553, วิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บน้ำตัวอย่างจากแหล่งน้ำ, สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, กรุงเทพฯ, 16 น.
- [8] Lenore, S., Arnold, E. and Rhodes, R., 1989, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington, D.C.
- [9] Neamtu, M., Yediler, A., Simniceanu, I. and Ketttrup, A., 2003, Oxidation of commercial reactive azo dyes aqueous

- solutions by the photo-Fenton and Fenton-like processes, J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry 161: 87-93.
- [10] Muruganandham, M. and Swaminathan, M., 2005, Enhanced heterogeneous ferrioxalate photo-fenton degradation of reactive orange 4 by solar light, Solar Energ. Mater. Solar Cell. 89: 61-74.
- [11] Taha, M., Yasser, M., Zeinhom, H. and Hassan, M.H., 2010, Decolorization of mordant red 73 azo dye in water using  $H_2O_2$ /UV and photo-Fenton treatment, J. Hazard. Mater. B 174: 352-358.
- [12] Pérez, M., Torrades, F., Domènech, X. and Peral, J., 2002, Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents, Water Res. 36: 2703-2710.
- [13] Baver, R. and Fallmann, H., 1997, The photo-Fenton oxidation-a cheap and efficient wastewater treatment method, Res. Chem. Intermed. 23: 341-354.
- [14] Randorn, C., Wongnawa, S., Boonsin, P. and 2004, Bleaching of methylene blue by hydrated titanium dioxide, ScienceAsia, 30: 149-156.
- [15] Melgoza, D., Hernandez, R. and Peralta, J.M., 2009, Comparative efficiencies of the decolourisation of Methylene Blue using Fenton's and photo-Fenton's reactions, Photochem. Photobiol. 8: 596-599.
- [16] Neyens, E. and Baeyens, J., 2003, A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, J. Hazard. Mater. B 98: 33-50.
- [17] Galindo, C., Jacques, P. and Kalt, A. 2001, Photochemical and photocatalytic degradation of an indigoid dye: A case study of acid blue 74 (AB74), J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry 141: 47-56.