

## Manuscript II

Color and COD removal of wastewater from rubber wood and packaging industries by Fenton reaction

# การกำจัดสีและ COD ในน้ำทิ้งจากโรงงานอบไม้ยางพาราและโรงงานผลิต กล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยแคลเซียม ออกไซด์

ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์<sup>1</sup> ปฐมาพร นันทากุล<sup>2</sup> จริญญา บุญกาญจน์<sup>3</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

โทรศัพท์ 074-28-7292, 074 -21-2896 E-mail [lupong.k@psu.ac.th](mailto:lupong.k@psu.ac.th)<sup>1</sup>

## บทคัดย่อ

การกำจัดสีและค่า COD ในน้ำทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราและโรงงานผลิตกล่องกระดาษ ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์ สภาพของน้ำทิ้งก่อนการบำบัดเป็นสีน้ำตาลดำ เข้มและสีชมพูอมม่วง ค่า COD และ pH สำหรับโรงงานอบไม้ยางพารามีค่าเท่ากับ 720 mg/L และ 8.5 ตามลำดับ ส่วนค่า COD และ pH สำหรับโรงงานผลิตกล่องกระดาษมีค่าเท่ากับ 2960 mg/L และค่า pH เท่ากับ 4.4 ตามลำดับ ค่าสัดส่วนโดยน้ำหนักของสารเฟนตันรีเอเจนต์ (ไฮออนเหล็กและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์) และสารตกตะกอน (แคลเซียมออกไซด์) คือ Fe: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Ca = 1:11.7:4.5 มีการปรับค่า pH ของปฏิกิริยาเฟนตันให้มีค่าเท่ากับ 2.3-3.3 ด้วยกรดซัลฟิวริก ผลของการทำปฏิกิริยาพบว่าน้ำทิ้งหลังการบำบัดสำหรับโรงงานอบไม้ยางพารามีลักษณะใสไม่มีสี ค่า COD เท่ากับศูนย์ และ pH มีค่าเป็นกลางเท่ากับ 6.7 และน้ำทิ้งหลังการบำบัดสำหรับโรงงานผลิตกล่องกระดาษมีลักษณะใสสีชมพูอ่อน สามารถลดค่า COD ได้ร้อยละ 15 - 47 และ pH มีค่าเท่ากับ 4.5-8.5 อย่างไรก็ตามยังมีสารตกค้างของแคลเซียม โบรอน และซัลเฟตในน้ำทิ้งหลังการบำบัดของโรงงานอบไม้ยางพาราในปริมาณเท่ากับ 400 mg/L, 510 mg/L และ 790 mg/L ตามลำดับ ส่วนสารตกค้างของแคลเซียม และซัลเฟตในน้ำทิ้งหลังการบำบัดของโรงงานผลิตกล่องกระดาษจะมีค่าเท่ากับ 400-1600 mg/L, และ 528-786 mg/L ตามลำดับนอกจากนี้ทั้งสองกรณีพบว่าปริมาณของเหล็กมากกว่า 85-99 % จากเฟอร์รัสซัลเฟตได้ฟอร์มตัวในรูปของตะกอน

# Color and COD Removal of Wastewater from Rubber Wood and Packaging Industries by Fenton Reaction

Lupong Kaewsichan<sup>1</sup> Pathamaporn Nantakakul<sup>2</sup> Charun Bunyakan<sup>3</sup>

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

<sup>1</sup>E-mail [lupong.k@psu.ac.th](mailto:lupong.k@psu.ac.th)

## Abstract

Color and COD removal of wastewater eliminated from rubber wood preservative plant and from packaging factory were treated by Fenton reaction together with precipitation by calcium oxide. The color, COD and pH of the waste from rubber wood preservative plant before treating were deep dark brown, 720 mg/L and 8.5, respectively. The color, COD and pH of the wastewater from packaging factory before treating were purple pink 2960 mg/L and 4.4, respectively. The weight ratio of Fenton reagents and precipitant were Fe: H<sub>2</sub>O: Ca = 1:11.7:4.5 in which the reaction was adjusted by adding sulfuric acid to keep the pH in the range of 2.3-3.3. The results showed that treated wastewater from rubber wood preservative plant was crystal clear, the removal of COD was 100 % and the pH was adjusted to 6.7 whereas the treated wastewater from packaging factory was slightly pink, the removal of COD was 15-47 % and the pH was adjusted to 4.5 -8.5. However, the remains of calcium, boron and sulfate in the treated wastewater from rubber wood preservative plant was 400 mg/L, 510 mg/L and 790 mg/L and that of calcium and sulfate in the treated wastewater from packaging factory was 400-1600 mg/L, and 525-786 mg/L, respectively. For the both sources of wastewater, more than 85-99% of Fe from Fenton reagents was precipitated with calcium oxide.

---

Keywords: Fenton , Boron, Wood Preservative, Calcium Oxide

---

<sup>1</sup> Ph.D. (Chemical Engineering) , Lecturer, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand

<sup>2</sup>M.E. (Chemical Engineering), student , Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand

<sup>3</sup>Ph.D. (Chemical Engineering), Assist. Prof., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand

## 2. บทนำ

การใช้ประโยชน์ไม้ยางพาราหมักพบในอุตสาหกรรมประเภทเครื่องเรือน ผลิตภัณฑ์แผ่นไม้ ประกอบ ถ่าน และอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ การนำต้นยางพาราที่มีประสิทธิภาพในการให้ปริมาณน้ำยางต่ำมาใช้ประโยชน์เป็นที่นิยมกันมากเนื่องจาก มีปริมาณมากเพียงพอ เนื้อไม้มีสีขาวสวย และสถานการณ์การขาดแคลนไม้ชนิดอื่น (พรรณนิภา, 2545a) และในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีในการอบไม้และอาบน้ำยารักษาเนื้อไม้ยางพาราสูงขึ้น สามารถลดปัญหาเรื่อง มอด และราเข้าทำลาย สารเคมีที่ใช้กันในเขตภาคใต้ของประเทศไทยนั้นจะใช้สารที่เป็นสารประกอบโบรอน ([www.scandasia.com](http://www.scandasia.com)) คือ กรดบอริก ( $H_3BO_3$ ) และสารบอแร็กซ์( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการควบคุมและกำจัดแมลงและรา และไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่เป็นพิษต่อแมลงสาบ มด แมลงปีกแข็ง ตัวอ่อนของแมลง และแมลงอื่น ๆ ([www.chemicaland21.com](http://www.chemicaland21.com)) การรักษาน้ำยางเนื้อไม้ให้คงทนนั้นทำได้โดยการอัดน้ำยาเข้าไปในเนื้อไม้ ซึ่งจะให้ผลดีกว่าการทาน้ำยาป้องกันแบบผิวเผินและสิ้นเปลือง การอัดน้ำยานั้นอาจทนทานได้นานถึง 20 ปีส่วนการทาน้ำยาอาจทนทานได้ 5 ปี หลังจากการอัดน้ำยาแล้วจะต้องฝังไม้และอบไม้ให้แห้งก่อนนำไปใช้งาน จากกระบวนการนี้จะทำให้น้ำยารักษาเนื้อไม้ที่อัดเข้าไปจะไปอยู่ในช่องว่างของเนื้อไม้ และเมื่อน้ำยาลงซึมหลาย ๆ ครั้งอาจทำให้น้ำยามีสีเปลี่ยนไปโดยน้ำที่ใต้จะมีสีน้ำตาลจนถึงดำ ส่งผลต่อสีของเนื้อไม้ที่การอัดน้ำยาในครั้งต่อไปโดยมีสีเข้มขึ้น ความเข้มของสีที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดขึ้นมาจาก ลิกนินที่เป็นสารพอลิเมอร์ของสารพวกอะโรมาติก โพลีฟีนอลซึ่งเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ที่ให้สีน้ำตาล (พรรณนิภา, 2545b)ทำให้อายุการใช้งานของน้ำยาล้นลงและต้องทิ้งไปในลักษณะของน้ำเสียที่ยังคงมีสารเจือปนนั้น คือยังคงมีโบรอนตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อลดการทิ้งและยืดอายุการใช้ น้ำยารักษาเนื้อไม้ จึงได้หาวิธีการกำจัดสีที่เกิดขึ้น

สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษเป็นสีสังเคราะห์แตกต่างจากสีในน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพาราซึ่งเป็นสารอินทรีย์ประเภทลิกนินและสารประกอบฟีนอลิก(พรรณนิภา, 2545) ประเภทของสีสังเคราะห์จะจำแนกสีได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง เช่นกลุ่มสีเอโซ (azo colorants) ซึ่งโครงสร้างของสีชนิดนี้จะต้องมีหมู่  $-N=N-$  อย่างน้อย 1 หมู่เป็นองค์ประกอบ และเป็นสีกลุ่มใหญ่ที่สุด เนื่องจากสังเคราะห์ได้ง่าย และให้เจดสีครบทุกเจด กลุ่มสีฟทาลาโลไซยานิน (phthalocyanine colorants) เป็นกลุ่มสีที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนของโลหะ (metal complex) หลายๆชนิด ส่วนใหญ่จะให้สีน้ำเงินและเขียวเข้ม กลุ่มสีสไตเบน (stibene dyes) เป็นกลุ่มสีที่ให้สารเรืองแสง (fluorescent brightening agents) เป็นต้น (ภาวี,2001)

การกำจัดสีโดยทั่วไปทำได้หลายวิธี ได้แก่การย่อยสลายโดยขบวนการทางชีววิทยา, การดูดติดด้วยผงถ่าน การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) การออกซิเดชันรีดักชันด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) และการกรองด้วยเมมเบรน เป็นต้น ซึ่งในแต่ละวิธีก็สามารถกำจัดสีได้มากน้อยแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดของสีที่มีอยู่ในน้ำทิ้ง ในวิธีการต่างๆที่เอ่ยถึงมีวิธีที่น่าสนใจที่สุดวิธีหนึ่งได้แก่การออกซิเดชันรีดักชันโดยสารเคมี คือการบำบัดสีน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้เฟนตันรีเอเจนต์ประกอบด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และไอออนของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นวิธีที่มีผลกระทบจากสารเคมีตกค้างน้อยกว่าวิธีการบำบัดทางเคมีอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกกระทำด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ซึ่งไม่ตกค้างในน้ำโดยสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ในสภาวะกรดที่มีไอออนของเหล็กละลายอยู่ การแยกเอา

ไอออนของเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำสภาพเป็นกรดทำได้โดยวิธีการตกตะกอนเมื่อสารละลายมีสภาพเป็นเบส งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดลงของ สี และ COD ในน้ำเสียในขณะเดียวกันก็จะตรวจสอบปริมาณสารเคมีตกค้างทั้งนี้ก็เพื่อต้องการบำบัดสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมระดับหนึ่ง ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่อไป

### 3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kang และ Hwang (2000) ศึกษาประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเฟนต์รีเอเจนต์ของน้ำใต้ดินจากแหล่งทิ้งขยะของเมืองคิมโปประเทศเกาหลีใต้จากการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและการตกตะกอนโดยสารเคมีเฟนต์รีเอเจนต์ (fenton's reagent) พบว่าการลดลงของค่า COD โดยการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพอร์ซัลเฟต และค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 3-6 แต่ค่า COD จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเพอร์ซัลเฟตมากกว่า 500 mg/L

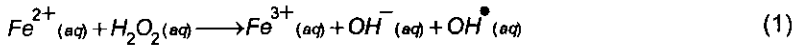
Sureyya และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ปฏิกิริยาเฟนต์รีเอเจนต์ งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงความเข้มข้นของ  $\text{FeSO}_4$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$ , pH และ อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้การบำบัดได้ดี จากการทดลองพบว่าในการบำบัดน้ำเสีย reactive Black 5 ความเข้มข้น 100 mg/L สภาวะในการบำบัดที่ดีที่สุดคือ pH 3 อุณหภูมิ 40 °C ใช้  $\text{FeSO}_4$  เข้มข้น 100 mg/L,  $\text{H}_2\text{O}_2$  เข้มข้น 400 mg/L ตามลำดับ สามารถบำบัด COD ได้ 71% และบำบัดสีได้ถึง 99% ส่วนน้ำเสียสี reactive Black 5 ความเข้มข้น 200 mg/L สภาวะที่ดีที่สุดคือ pH 3 อุณหภูมิ 40 °C ใช้  $\text{FeSO}_4$  225 mg/L,  $\text{H}_2\text{O}_2$  1000 mg/L สามารถบำบัด COD ได้ 84% และบำบัดสีได้มากกว่า 99% ใช้อัตราส่วนโดยโมลของ  $\text{FeSO}_4 / \text{H}_2\text{O}_2$  ที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ค่า

N. Azbar และคณะ (2004) ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงหลายกระบวนการกับการบำบัดด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยใช้  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3$  และ  $\text{FeSO}_4$  เพื่อลดค่า COD และ สี จากน้ำเสียที่มีสารโพลีเอสเทอร์และไฟเบอร์ที่ส่วนประกอบของสีอะซิเตท พบว่าเมื่อใช้สารเคมีอย่างเดียวนั้น  $\text{FeSO}_4$  จะให้ประสิทธิภาพในการลด COD และสีได้ 60% และ 49% ตามลำดับ pH และ  $\text{FeSO}_4$  ที่เหมาะสมคือ 8.5 และ 350 mg/L กระบวนการเฟนต์รีเอเจนต์ ลด COD และสีได้ 96% และ 94% ตามลำดับ pH,  $\text{H}_2\text{O}_2$  และ  $\text{FeSO}_4$  ที่เหมาะสมคือ 5, 300 mg/L และ 500 mg/L ตามลำดับ การใช้โอโซนสามารถลดค่า COD และสีได้ 92% และ 90% ตามลำดับ การใช้  $\text{O}_3 / \text{UV}$  จะให้การลดลงของค่า COD และสีได้ 94% และ 93% ตามลำดับ การใช้  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$  สามารถลดค่า COD และสีได้ 90% และ 85% ตามลำดับ และการใช้  $\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$  ร่วมกันนั้นจะให้การลดลงของ COD และ สีได้ถึง 99% และ 96% ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงจะทำให้ค่า COD และสีลดลงมากกว่า 85% ในเรื่องของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการนั้น กระบวนการที่ใช้ โอโซน ( $5.28\$/\text{m}^3$ ) และ UV ( $1.1\$/\text{m}^3$  ไม่รวม UV lamp และค่าแรง) นั้นจะมีค่าใช้จ่ายแพงกว่าการใช้กระบวนการเฟนต์รีเอเจนต์ ( $0.23 \text{ US}\$/\text{m}^3$ ) ซึ่งเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดให้การลดลงของ COD และสีมากกว่า 90 %

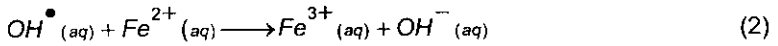
A. Lopez and J. Kiwi (2001) ศึกษาประสิทธิภาพการลดสีและการย่อยสลายของสารละลาย azo dye (Orange II) โดยการใช้ Nafion-Fe (1.78%) membrane ใน photoreactor โดยใช้ 3 ความเข้มข้น ที่อัตราส่วนระหว่าง azo dye (Orange II):  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น 0.032 : 1 พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำสุดคือ Orange II 0.16 mM :  $\text{H}_2\text{O}_2$  5 mM ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาด้วยแสงที่ 36 วัตต์, pH เท่ากับ 3 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและในที่มีดioxidant 20 ชั่วโมง จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า TOC มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นอื่น ๆ

#### 4. กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

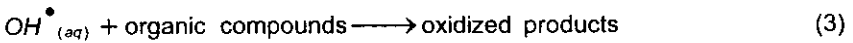
ปฏิกิริยาเฟนตัน คือปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับไอออนของเฟอร์รัส ซึ่งก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังนี้ ([www.lenntech.com](http://www.lenntech.com) and Waling et al. 1975)



ปฏิกิริยาต่อมาก็คือ อนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ดังนี้



หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับสารละลายดังนี้



ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชันที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสีย คือคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะหมายถึงสารอินทรีย์ได้ถูกเปลี่ยนรูปจนหมดสภาพการเป็นพิษ นอกจากนี้ปริมาณของค่า COD ก็ จะหมดไปเมื่อปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนได้แปรสภาพไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด

#### 5. การทดลอง

##### 5.1 สารเคมี

ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 30 wt% (Reagent grade, AJAX) , เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) (AR grade, UNIVAR), แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) (Lab grade, UNILAB) และ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$  96%, AJAX) นำสารเคมีเหล่านี้มาใช้โดยไม่ผ่านการทำบริสุทธิ์ซ้ำ น้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพาราและจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษได้รับความอนุเคราะห์จาก โรงงานรัตภูมิพาราวูด อำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา และจากโรงงาน S-PAC อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา น้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพาราเก็บจากบ่อเก็บน้ำยารักษาเนื้อไม้ที่มีขนาด 20,000 ลูกบาศก์เมตร และใช้งานมาเป็นเวลา 1 เดือน สำหรับน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษเก็บจาก บ่อฝังซึ่งเป็นบ่อสุดท้ายหลังการบำบัด

##### 5.2 วิธีการทดลอง

เนื่องจากน้ำทิ้งจากทั้งสองแหล่งมีภาระของ COD ต่างกันประมาณ 4 เท่า ข้อมูลภาระ COD และอื่นๆของน้ำทิ้งก่อนการบำบัดแสดงไว้ใน Table 1 และ Figure 1 สำหรับสภาวะการทดลอง สำหรับน้ำทิ้งจากโรงงานอบไม้ยางพาราจะดำเนินการเหมือนกับวิธีการของลือพงศ์ และคณะ (2547) ส่วนน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก (ratio 1) จะใช้สภาวะเดียวกับสภาวะที่ใช้กับน้ำทิ้งจากโรงงานอบไม้ยางพารา ซึ่งสภาวะการทดลองข้างต้นได้ใช้ค่าความเข้มข้นของ  $FeSO_4$  ในน้ำเสียเท่ากับ  $2.25 \times 10^{-3}$  mole/L ส่วนชุดที่ 2 (ratio 2) จะเพิ่มสารเฟนตันหรือเจเนตเป็น 4 เท่าของการทดลองชุดแรก (ซึ่งสภาวะการทดลองชุดนี้ได้ใช้ค่าความเข้มข้นของ  $FeSO_4$  ในน้ำเสียเท่ากับ  $8.99 \times 10^{-3}$  mole/L) Figure 2 แสดงลักษณะของระบบ

การบำบัดน้ำเสียจำลองขนาดถึง 20 ลิตร จำนวน 2 ถังต่อกันแบบอนุกรม มีใบพัดกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้

การวิเคราะห์ค่า COD pH และปริมาณไอออนต่างๆ ใช้วิธีการมาตรฐานต่อไปนี้ COD ใช้วิธี Open Reflux Method pH ใช้วิธี Glass Electrode (Hanna, HI221 Bench Top Model) ปริมาณของแคลเซียมใช้วิธี EDTA Titrimetric Method ปริมาณของซัลเฟตใช้วิธี Turbidimetric Method ปริมาณของเหล็กใช้วิธี Phenanthroline Method และปริมาณโบรอนใช้วิธี ICP OES 4300DV PERKIN ELMER USA. (Greenberg *et al.*, 1985) สำหรับปริมาณของสารแขวนลอยและสีไม่ได้วิเคราะห์เนื่องจากตะกอนที่ได้เป็นตะกอนหนัก โดยที่สารละลายหลังจากการตกตะกอนจะมีลักษณะใสปราศจากสารแขวนลอย ส่วนความแตกต่างของสีในขั้นตอนต่างๆ ในระหว่างการบำบัดมีความชัดเจนทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้สเกลของสีในการตรวจสอบ

Table 1 Characters of wastewaters before treatment

	COD	pH	Color
โรงงานอบไม้ยางพารา	720	8.7	deep dark brown
โรงงานผลิตกล่องกระดาษ	2960	5.0	purple pink

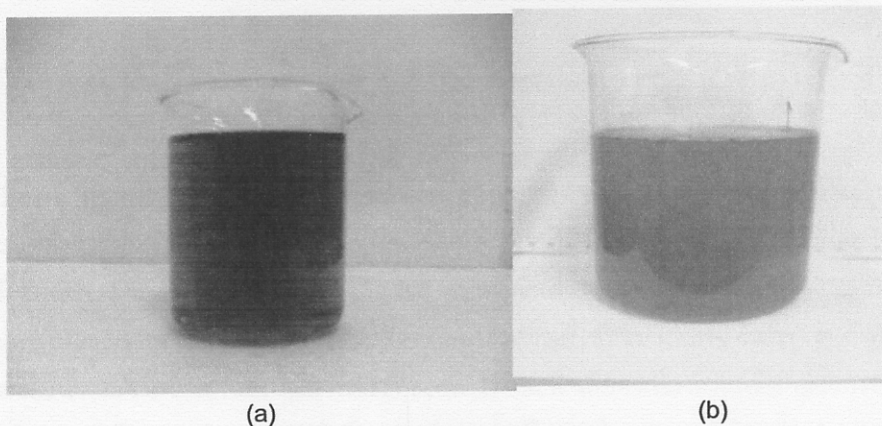


Figure 1 Colors of wastewaters before treatment (a) Rubber wood factory (b) Packaging factory

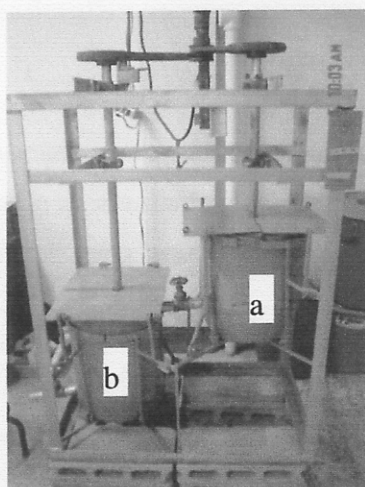


Figure 2 Scheme of the fenton and precipitation reactors: (a) Fenton reactor, (b) precipitation reactor.

## 5. ผลการทดลอง

### 5.1 การศึกษาปริมาณ สี สารแขวนลอย COD และ pH

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณเล็กน้อยปรับ pH อยู่ในช่วง 2.3-3.3 โดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (96%) พบว่าเมื่อเติมกรดลงไปสีของน้ำเสียจะเปลี่ยนไป จากเดิมทันทีโดยจะมีสีน้ำตาลอ่อนอมเหลืองสำหรับกรณีน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพารา และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดงสำหรับโรงงานผลิตกล่องกระดาษ ดังแสดงไว้ใน Figure 3

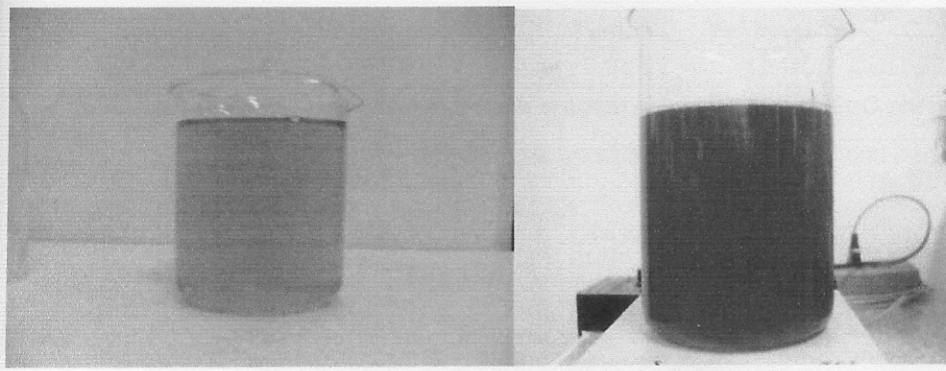


Figure 3 Colors of wastewaters before and after acidify with sulfuric acid (a) Rubber wood factory (b) Packaging factory

เมื่อพิจารณาค่า COD และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD แล้วพบว่าปริมาณรีเอเจนต์ที่ใช้เพียงพอที่จะลดค่า COD หลังจากเกิดปฏิกิริยาฟenton โดยเฉพาะกรณีของน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพารา โดยที่เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD จะเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ 15 เปอร์เซ็นต์ และ 47% สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพารา น้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษที่ใช้ปริมาณฟentonรีเอเจนต์เท่ากับฟentonรีเอเจนต์ของน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพารา (ratio 1) และน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษที่ใช้ปริมาณฟentonรีเอเจนต์เป็น 4 เท่าของฟentonรีเอเจนต์ของน้ำเสียจากโรงงานอบไม้ยางพารา (ratio 2) ตามลำดับ Table 2 แสดงค่าของ COD ในขั้นตอนต่างๆตั้งแต่สภาวะเริ่มต้นจนถึงขั้นตอนการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์ Figure 4 และ Figure 5 เปรียบเทียบปริมาณการลดลงและเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า COD ในขั้นตอนต่างๆของการบำบัด

Table 2 CODs of wastewaters before and after treatments by Fenton reagents and CaO precipitation: comparison between wastewater from rubber wood factory, packaging factory (ratio 1) and packaging factory (ratio 2)

	COD (mg/L)		
	Initial	after fenton reaction (%)	after precipitation with CaO (%)
Rubber wood factory	720	80 (90%)	0 (100%)
Packaging factory, ratio 1	2960	2874 (3%)	2159 (15%)
Packaging factory, ratio 2	2960	2808(5%)	1568(47%)



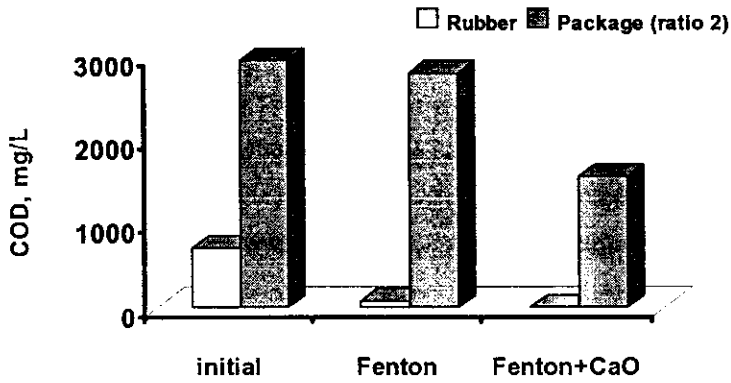


Figure 4 Decreasing of COD by Fenton reaction combination with CaO precipitation: comparison between wastewater from rubber wood factory and packaging factory (ratio 2)

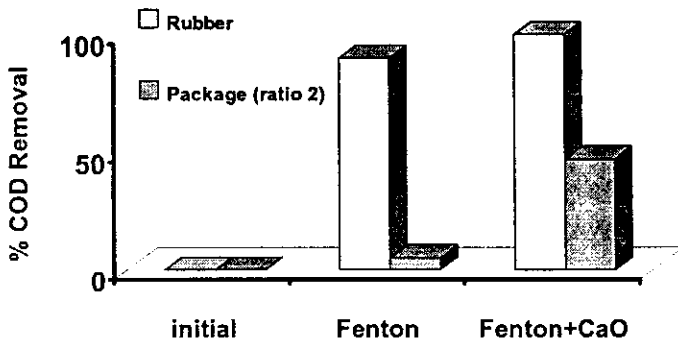
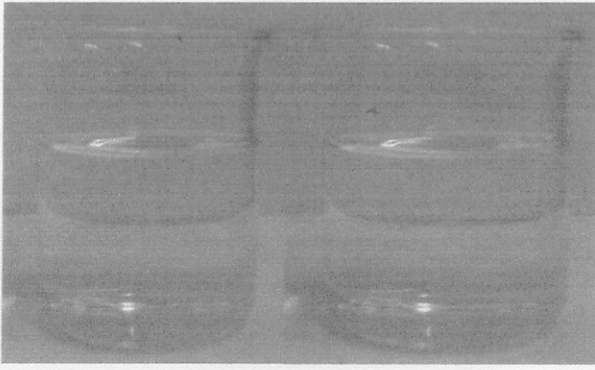


Figure 5 Per cent removal of COD by Fenton reaction combination with CaO precipitation: comparison between wastewater from rubber wood factory and packaging factory (ratio 2)

พิจารณาถึงสีที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเฟนตัน พบว่าน้ำเสียเดิมมีสีดำน้ำไม่มีตะกอน หลังจากเติมกรดซัลฟิวริกแล้วจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลเหลืองทันทีดังแสดงใน Figure 1 ข้างต้น เมื่อเติมไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และเฟอร์รัสซัลเฟตลงไปแล้วจะเกิดสีที่เข้มขึ้นอีกเล็กน้อย และจะจางลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป 1 ชั่วโมง ดังแสดงใน Figure 6(a), 6(c) และ 6(e) ในการบำบัดขั้นต่อไปคือการเติมแคลเซียมออกไซด์เพื่อปรับ pH และตกตะกอนไอออนต่างๆแล้วกวนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อหยุดกวนผสมเพื่อให้เกิดการตกตะกอน แล้วจึงกรองแยกตะกอนออกจะได้สารละลายที่ใสไม่มี สีดังแสดงใน Figure 6(b), 6(d) และ 6(f)



6(a)

Fenton reaction

6(b)

Fenton + CaO precipitation



6(c)

Fenton reaction

6(d)

Fenton + CaO precipitation



6(e)

Fenton reaction

6(f)

Fenton + CaO precipitation

Figure 6 Colors of wastewaters after treatment with fenton reagent and after precipitation with CaO : 6(a), 6(b) represented wastewater from rubber wood factory, 6(c),6(d) represented wastewater from Packaging factory ratio 1 and 6(e),6(f) represented wastewater from packaging factory ratio 2

ฝ่ายหอสมุด  
คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร

เมื่อพิจารณาค่า pH จากน้ำเสียและน้ำเสียที่บำบัดด้วยเฟนตันรีเอเจนต์ พบว่าน้ำเสียของโรงงานอบไม้ยางพารามีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 8 เมื่อปรับด้วยกรดซัลฟิวริกแล้วจะได้ประมาณ 2.5 หลังเกิดปฏิกิริยาเฟนตันค่า pH มีค่าประมาณ 2.5 และเมื่อเติมแคลเซียมออกไซด์ จะทำให้ค่า pH ปรับสูงขึ้นเท่ากับ 6-7 ส่วนน้ำเสียของโรงงานอบไม้ยางพารามีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 4.5 เมื่อปรับด้วยกรดซัลฟิวริกแล้วจะได้ประมาณ 3.1 หลังเกิดปฏิกิริยาเฟนตันค่า pH มีค่าประมาณ 2.6 และเมื่อเติมแคลเซียมออกไซด์ จะทำให้ค่า pH ปรับสูงขึ้นเท่ากับ 4.5-8.5 แสดงไว้ใน Table 3 และ Figure 7 (ควบคุมปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ปรับค่า pH ในแต่ละการทดลองให้มีค่าเท่ากัน ทำให้ค่า pH หลังการปรับในแต่ละการทดลองมีค่าไม่เท่ากัน)

Table 3 pH of wastewaters before and after treatment

	ค่า pH			
	initial	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH adjustment	Fenton reaction	Fenton Reaction+ CaO
Rubber wood factory	8.3	2.6	2.4	6.8
Packaging factory, ratio 1	4.4	3.1	2.6	4.45
Packaging factory, ratio 2	4.4	3.2	2.8	8.52

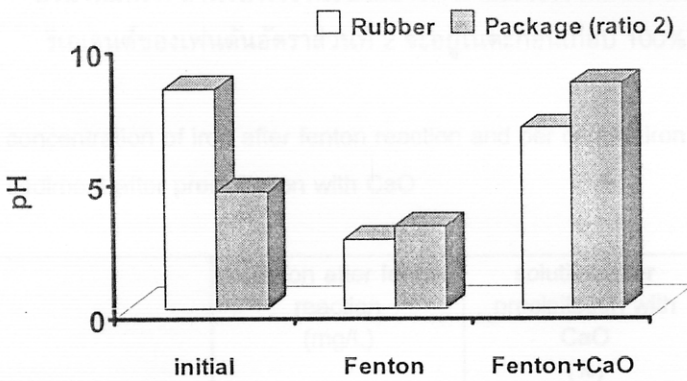


Figure 7 Change of pH by Fenton reaction combination with CaO precipitation:  
Comparison between wastewater from rubber wood factory and packaging factory (ratio 2)

## 6.2 การศึกษาปริมาณสารตกค้างในสารละลายและตะกอน

การบำบัดน้ำเสียทางเคมีนั้นจะมีสารเคมีตกค้างอยู่ในน้ำ และตะกอนหลังจากการบำบัด ในที่นี้ จะศึกษา ปริมาณของ ซัลเฟต เหล็ก แคลเซียม ซึ่งเป็นรีเอเจนต์ในการทำปฏิกิริยา และวิเคราะห์ธาตุโบรอนซึ่งเป็นสารที่ใช้เป็นสารรักษาเนื้อไม้ยางพาราในกรณีโรงงานอบไม้ยางพารา

1. ปริมาณซัลเฟต ซึ่งจะเห็นว่าในการบำบัดขั้นสุดท้าย ซัลเฟตจะยังคงอยู่ในสารละลายเป็นส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 70 - 99% ดังแสดงไว้ใน Table 4

Table 4 concentration of sulfate after Fenton reaction and per cent of sulfate in solution and sediment after precipitation with CaO

	Solution after fenton reaction (mg/L)	solution after precipitation with CaO (%)	sediment (%)
Rubber wood factory	790	98.8	1.2
Packaging factory, ratio 1	528	67	33
Packaging factory, ratio 2	786	87	13

2. ปริมาณเหล็ก สำหรับโรงงานอบไม้ยางพาราและโรงงานผลิตกล่องกระดาษที่บำบัดด้วยรีเอเจนต์ของเฟนตันอัตราส่วนที่ 2 จะอยู่ในตะกอนเกือบ 100% ดังแสดงไว้ใน Table 5

Table 5 concentration of iron after fenton reaction and per cent of iron in solution and sediment after precipitation with CaO

	Solution after fenton reaction (mg/L)	solution after precipitation with CaO (%)	sediment (%)
Rubber wood factory	115	0.6	99.4
Packaging factory, ratio 1	123	15.0	85.0
Packaging factory, ratio 2	428	0.1	99.9

### 3. ปริมาณแคลเซียม แคลเซียมจะมีอยู่ในสารละลายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงไว้ใน Table 6

Table 6 concentration of calcium after fenton reaction and per cent of calcium in solution and sediment after precipitation with CaO

	Solution after fenton reaction (mg/L)	solution after precipitation with CaO %	sediment %
Rubber wood factory	410	98%	2
Packaging factory, ratio 1	410	88%	12
Packaging factory, ratio 2	1643	80%	20

### 4. ปริมาณโบรอน โบรอนจะมีอยู่ในสารละลายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงไว้ใน Table 7

Table 7 concentration of boron after fenton reaction and per cent of boron in solution and sediment after precipitation with CaO

	Solution after fenton reaction (mg/L)	Solution after precipitation with CaO (%)	Sediment (%)
Rubber wood factory	509	99.6	0.4

## 7. สรุปและวิจารณ์

ผลจากการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการใช้เฟนตันในการบำบัด COD และ สี ซึ่งทำ ณ อุณหภูมิห้อง ปรับ pH ของน้ำเสียให้ได้ 2.5 – 3.3 เพราะเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเฟนตันได้ดีโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น และใช้เฟนตันรีเอเจนต์ (ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และเพอร์ซัลเฟต) ในปริมาณน้อย โดยใช้ความเข้มข้นของเพอร์ซัลเฟตเท่ากับ 2.25 มิลลิโมลต่อลิตรสำหรับน้ำทิ้งที่มีค่า COD เท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร

การลดปริมาณของค่า COD สามารถทำได้ ถึง 88.92-100 % สีของสารละลายใสไม่มีสี มี pH ประมาณ 7 แต่อย่างไรก็ตามยังมีสารตกค้างอยู่ในสารละลายมากกว่าในตะกอน โดยที่ซัลเฟตไอออนจะมีอยู่ในสารละลาย มีความเข้มข้นประมาณ 800 mg/L หรือเป็นประมาณมากกว่า 90 % ของปริมาณซัลเฟตทั้งหมดในระบบ (น้อยกว่า 10% อยู่ในตะกอน) โดยซัลเฟตส่วนใหญ่จะมาจากกรดซัลฟิวริกที่ใช้สำหรับปรับสภาพ pH

สารแขวนลอยและสี เนื่องจากตะกอนที่เกิดขึ้นในการบำบัดขั้นสุดท้ายจะเป็นตะกอนหนักและสารละลายหลังการตกตะกอนจะมีลักษณะใส ทำให้ระดับความเข้มข้นของสีและปริมาณสารแขวนลอยมีค่าต่ำมาก และปัญหาที่จะต้องคำนึงถึงคือปริมาณของไอออนตกค้างหลังการบำบัด ซึ่งได้ผลจากการวิเคราะห์ดังนี้

สำหรับแคลเซียมซึ่งมีความเข้มข้นในช่วง 150- 650 mg/L เป็นประมาณมากกว่า 90 % ของปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในระบบ (น้อยกว่า 10% อยู่ในตะกอน) โดยที่ปริมาณของแคลเซียม

ทั้งหมดมาจากแคลเซียมออกไซด์

เหล็กที่ตกค้างหลังการบำบัดส่วนใหญ่จะตกตะกอนมากกว่า 90% โดยที่ปริมาณของเหล็กทั้งหมดมาจาก  $FeSO_4$  ซึ่งเป็นเฟนตันรีเอเจนต์

โบรอนซึ่งเดิมเป็นสารที่ใช้ในการผสมน้ำอบไม้ยางนั้นจะยังคงตกค้างอยู่ในสารละลายหลังจากการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์เกือบ 100%

การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันและแคลเซียมออกไซด์ในการลดสีและ COD ของโรงงานอบไม้ยางพารามีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากใช้ปริมาณของสารเคมีเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของโรงงานผลิตกล่องกระดาษ นอกจากนี้ลักษณะของน้ำทิ้งหลังการบำบัดจากโรงงานอบไม้ยางพารายังมีลักษณะใสสะอาด มีค่า COD เท่ากับศูนย์ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำกลับมาใช้เป็นสารรักษาสภาพเนื้อไม้ได้ใหม่ เนื่องจากยังมีปริมาณของสารประกอบโบรอนในระดับสูงและสารละลายหลังการบำบัดขั้นสุดท้ายมีลักษณะใสสะอาด ค่าใช้จ่ายโดยรวมของการบำบัดมีค่าเท่ากับ 60 บาทต่อหน้า 1 ลูกบาศก์เมตร โดยที่ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เป็นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และของกรดซัลฟิวริก สำหรับกรณีของการใช้ปฏิกิริยาเฟนตันและแคลเซียมออกไซด์ในการลดสีและ COD ของโรงงานผลิตกล่องกระดาษจะให้ผลไม่คุ้มค่าเนื่องจากจะสิ้นเปลืองปริมาณของสารเคมี ส่งผลให้มีไอออนต่าง ๆ ตกค้างอยู่ในน้ำทิ้งหลังการบำบัดค่อนข้างสูง และค่า COD ของน้ำทิ้งหลังการบำบัดก็ยังคงมีปริมาณสูงอยู่แม้จะมีลักษณะใสไม่มีสีก็ตาม

จากการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงาน 2 ประเภทจะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาเฟนตันสามารถบำบัดน้ำทิ้งที่มีแหล่งจากสารประกอบจากธรรมชาติในที่นี้คือสารประกอบประเภทลิกนินและฟีนอลิกจากต้นไม้ได้ดี ในขณะที่แหล่งน้ำทิ้งที่มีต้นตอมาจากสารสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซับซ้อนกว่า เช่นโมเลกุลของสีสังเคราะห์ การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันจะไม่ได้ผลเหมือนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีต้นตอจากสารประกอบในธรรมชาติ

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินจากทุนสนับสนุนการวิจัย จากเงินงบประมาณแผ่นดิน ปี 2547 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ

### บรรณานุกรม

ภาวี ศรีกุลกิจ, 2001. หลักการย้อมสีทอ.colourway, Vol33, March – April,p.14-17.

พรรณนิภา มาลานิตย์ .2002. ไม้ยางพารา. วารสาร Woodshere. Vol 1. No 1. June-August, p.2.

พรรณนิภา มาลานิตย์. 2002. Wood decoration ตอนรักษาเนื้อไม้.woodshere vol 2. No 2. September-November, p.7.

ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ จิราวรรณ ศรีโยม และ จริญญา บุญกาญจน์. 2547. การบำบัดน้ำเสียที่มีสารประกอบฟีนอลิกด้วยปฏิกิริยาเฟนตันร่วมกับการตกตะกอนด้วยแคลเซียมออกไซด์. สงขลานครินทร์ วทท. (กำลังอยู่ระหว่างดำเนินการพิมพ์)

- Azbar, N., Yonar, T. and Kestioglu, K. 2004. Comparison of various advanced oxidation Processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. *Chemosphere*.55: 35-43.
- Greenberg, A.E., Trussell, R.R., Clesceri, L. and Frannson, M.A.H. 1985. Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, 6<sup>th</sup> ed. American Public Health Assoc., Washington D.C.
- Lopez, A. and Kiwi, J., 2001. Modeling the performance of an Innovative Membrane-Based Reactor. Abatement of azo dye (Orange II) up to Biocompatibility. *Ind. Eng. Chem. Res.* .40: 1854-1858.
- Kang Yun Whan and Hwang Kyung- Yub, 2000. Effects of reaction condition on the oxidation efficiency in the fenton process. *Wat.Res.* 34(10): 2786-2790.
- Sureyya Meric, Deniz Kaptan and Tugba Olmez, 2004. Color and COD removal from Wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton's oxidation process. *Chemosphere*.54: 435-441.
- Walling C.1975.Fenton's reagent revisited. *Acc.Chem.Res.* 8: 125-131.
- <http://www.chemicaland21.com/arokorhi/industrialchem/inorganic/BORAX%20DECAHYDRATE.htm> Accessed Sep 28, 2004.
- <http://www.chemicaland21.com/arokorhi/industrialchem/inorganic/BORIC%20ACID.htm>, Accessed Sep 28, 2004.
- <http://www.lenntech.com/Fenton-reaction.htm>, Accessed Sep 28, 2004.
- <http://www.scandasia.com/oldscandasia/Oldse02/Malaysiatofight.php>, Accessed Sep 28, 2004.