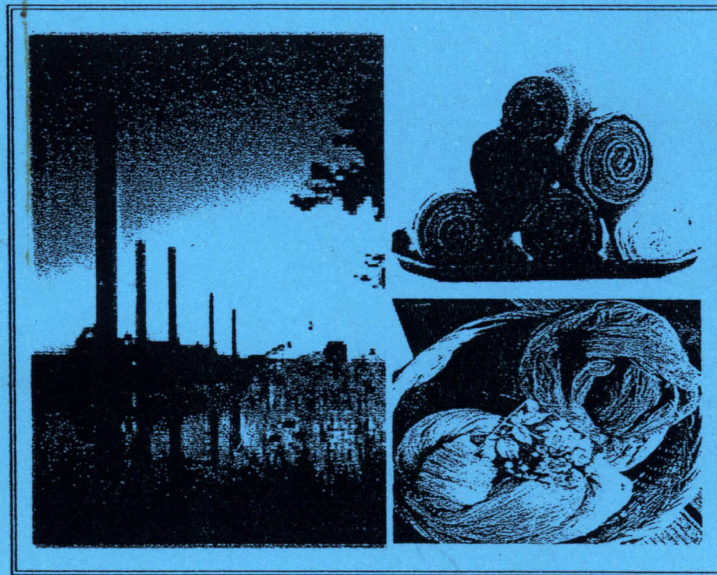


ระบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกและย้อม

Wastewater Recycling System in Bleaching and Dyeing Processes

ฉบับผู้บริหาร



จัดทำโดย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Law
8.10.09

นำเสนอ

สวทช
NSTDA

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

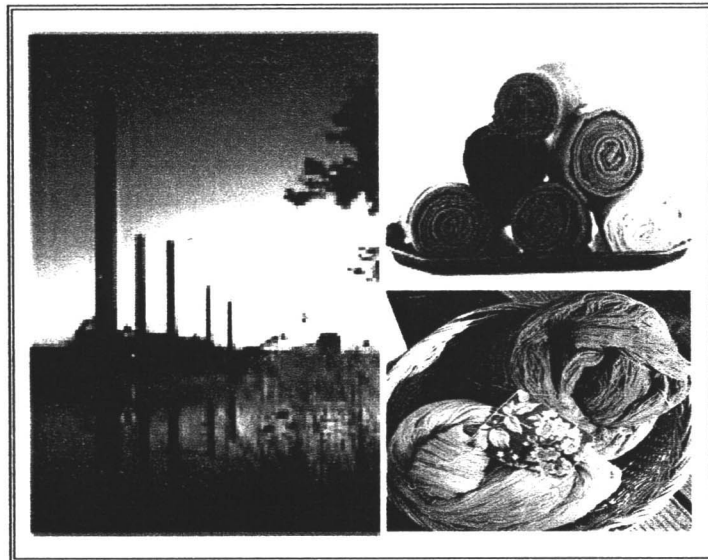


บริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด

ระบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกและย้อม

Wastewater Recycling System in Bleaching and Dyeing Processes

ฉบับผู้บริหาร



จัดทำโดย

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำเสนอ

สวทช.
NSTDA



สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด

คำนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมากในกระบวนการผลิตจึงก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากและมีการปนเปื้อนของสารเคมีและสีย้อมที่เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการผลิตในปริมาณที่สูง ซึ่งในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมก่อนการปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมนั้นต้องใช้ต้นทุนในการบำบัดสูง อีกทั้งต้นทุนในการนำน้ำดิบมาใช้ในกระบวนการผลิตก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดเวลา จึงมีแนวคิดที่จะนำน้ำจากการฟอกและย้อมกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดก่อนการระบายทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม

กระบวนการฟอกผ้าของโรงงานของบริษัท นั้นยังการทออุตสาหกรรม จำกัด ก็เช่นเดียวกับโรงงานสิ่งทออื่นๆ ที่น้ำทิ้งจากกระบวนการนี้มีสิ่งเจือปนจากผ้าดิบและสารเคมีที่ใช้ในการฟอกปะปนออกมาด้วย หากปริมาณสารเจือปนมีมากจนถึงจุดอิ่มตัวหรือส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน จะไม่สามารถนำน้ำนั้นกลับเข้าสู่กระบวนการฟอกขาวได้อีก แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดสีที่ตกค้างในน้ำทิ้งของกระบวนการย้อมสีผ้า วิธีการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่งคือกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน อาศัยหลักการการกระตุ้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ไอออนของโลหะ เพื่อให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวสารออกซิไดซ์อย่างแรง มีปฏิกิริยากับโมเลกุลของสี ทำให้สีในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมลดลง เนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ รวมทั้งสารตั้งต้นคือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีเหลืออยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกขาว จึงมีความเป็นไปได้สูงในการศึกษาวิจัยนำวิธีดังกล่าวมาปรับใช้เพื่อหาแนวทางในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการคือ 1. เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำด้วยการหมุนเวียนน้ำจากกระบวนการฟอกขาวกลับมาใช้ใหม่ 2. เพื่อลดปริมาณสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีก่อนนำไปใช้ประโยชน์

ความเป็นไปได้ในการจัดสร้างเครื่องมือและระบบต้นแบบ กรณีที่ 1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกขาวมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เหลือเพียงพอและสะอาดพอที่จะนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกขาว และกรณีที่ 2 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกขาวมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เหลือเพียงพอแต่ไม่สะอาดพอที่จะนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกขาว จะนำไปใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี โดยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันได้

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	
สารบัญ	
สารบัญตาราง	
สารบัญภาพ	
ความเป็นมาของโครงการ	1
วัตถุประสงค์และเป้าหมาย	1
แนวทางและแผนการดำเนินงานโครงการ	2
การดำเนินงาน	3
ส่วนของกระบวนการดูฉบับ	4
ส่วนของกระบวนการเฟ้นตอนออกซิเดชัน	8
สรุปผลการดำเนินงาน	19
ความเป็นไปได้ในการนำวิธีเฟ้นตอนออกซิเดชันมาใช้	
ในการกำจัดสี ในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ	19
ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์	19
ความเป็นไปได้ทางเทคนิค	22

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟมาตรฐาน	5
2. คุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกขาวและย้อมสี	10
3. ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ pH ของน้ำเสีย จากกระบวนการฟอกขาวและย้อมสี	10
4. แสดงค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการบำบัด โดยเฟนตอนออกซิเดชัน เมื่อใช้เฟอร์สไอออนและถ่านใหม่	20
5. แสดงค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการบำบัด โดยเฟนตอนออกซิเดชัน เมื่อนำเฟอร์สไอออนและถ่านกลับมาใช้ใหม่	21
6. แสดงค่าใช้จ่ายรวมด้านสารเคมีและวัสดุ (ต่อ 3 รอบการบำบัด)	21
7. ปริมาณของเหล็ก โครเมียม และทองแดง ในน้ำที่ผ่านการฟอกครั้งที่ 1 ,2 และ 3	23
8. แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยวิธีต่าง ๆ	24

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1. ตัวกลางอินทรีย์และตัวกลางอนินทรีย์	4
2. ผลจากการแช่น้ำกลั่น	5
3. Equilibrium time ของตัวกลางอินทรีย์	6
4. Equilibrium time ของตัวกลางอนินทรีย์	7
5. ขณะทำการทดลองเขย่าตัวกลางในน้ำสีเพื่อดูชั้นและคือน้ำสี	7
6. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 3 ชนิด โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นต่างๆ	11
7. การลดสีรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิด ที่ความเป็นกรดต่างๆ ด้วยกระบวนการฟenton ออกซิเดชัน	13
8. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆ ของ เฟอร์รัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	14
9. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ ในกระบวนการฟenton ออกซิเดชัน	15
10. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ระหว่างเฟอร์รัสใหม่กับ เฟอร์รัสที่นำกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน	17
11. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ระหว่างไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์สังเคราะห์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ในน้ำฟอก โดยใช้กระบวนการฟentonออกซิเดชัน	18
12. แสดงค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการกำจัดสีด้วยวิธีต่างๆ	22
13. แสดงต้นแบบระบบบำบัดด้วยฟentonออกซิเดชัน	25

ระบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกและย้อม

Wastewater Recycling System in Bleaching and Dyeing Processes

ความเป็นมาของโครงการ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการน้ำปริมาณมากในกระบวนการผลิต จึงก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก นอกจากนี้สารเคมีและสีที่ยังเป็นวัตถุอันตรายในการผลิต จึงมักก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เห็นได้ชัดคือ มลพิษในน้ำจากสีและสารเคมีที่เจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง ในการบำบัดให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมนั้นต้องใช้ต้นทุนในการบำบัดสูง รวมทั้งต้นทุนในการนำน้ำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตลอดเวลา จึงมีแนวคิดที่จะนำน้ำจากการฟอกและย้อมกลับมาใช้ใหม่

โรงงานของบริษัท นันยางการทออุตสาหกรรม จำกัด มีกระบวนการฟอกผ้าด้วยวิธี Exhaustion Process ซึ่งมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และใช้สารเคมีในการฟอกขาวคือ $H_2O_2/NaOH$ อัตราส่วนน้ำต่อผ้าในเครื่องฟอกผ้า (Liquor Ratio) เป็น 6:1 คือ ปริมาณน้ำ 6 ลิตรต่อผ้า 1 กิโลกรัม หลังจากผ่านกระบวนการฟอกผ้าแล้ว ในน้ำที่ทิ้งนั้นจะมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) คงเหลืออยู่จำนวนหนึ่งซึ่งหากเติมสารเคมีเพิ่มอีกเล็กน้อยแล้ว สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ใน Batch ต่อไปก็จะช่วยลดต้นทุนด้านสารเคมีและน้ำในการผลิตได้ ทั้งยังลดปริมาณน้ำที่ต้องบำบัดก่อนปล่อยออกภายนอกโรงงานอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม น้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการฟอกผ้านั้นจะมีสิ่งเจือปนจากผ้าดิบปะปนออกมาด้วย หากปริมาณสารเจือปนมีมากจนถึงจุดอิ่มตัวหรือส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน ก็จะไม่นำกลับเข้าสู่กระบวนการฟอกขาวอีก แต่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำจัดสีที่ตกค้างในน้ำทิ้งในกระบวนการต่อไปคือ กระบวนการย้อมสีผ้า วิธีการกำจัดสีในน้ำทิ้งวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ กระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสำคัญต่อกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน ในขั้นตอนการฟอกขาวจะมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง ซึ่งสามารถนำน้ำทิ้งนี้มาใช้ประโยชน์ ในฐานะเป็นสารออกซิไดซ์ในกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันได้

วัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการ

1. เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำด้วยการหมุนเวียนน้ำจากกระบวนการฟอกขาวกลับมาใช้ใหม่
(มีเป้าหมายที่จะนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ 50 %)
2. เพื่อลดปริมาณสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีก่อนนำไปใช้ประโยชน์
(มีเป้าหมายในการลดปริมาณสีในน้ำทิ้งให้น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของสภาพปัจจุบัน)

แนวทางและแผนการดำเนินงานโครงการ

แนวทางของโครงการ

โครงการนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ระยะคือ

1. ระยะที่ 1 เป็นการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อนำผลไปประเมินความเป็นไปได้ในการจัดสร้างเครื่องมือและระบบต้นแบบ ในเชิงเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ระยะที่ 2 เป็นการนำผลจากการดำเนินงานในระยะที่ 1 มากำหนดและสร้างเครื่องต้นแบบ ทำการติดตั้งและทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ

ความเป็นไปได้ในการจัดสร้างเครื่องมือและระบบต้นแบบ

กรณีที่ 1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกขาวมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เหลือเพียงพอและสะอาดพอที่จะนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกขาว

กรณีที่ 2 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกขาวมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เหลือเพียงพอแต่ไม่สะอาดพอที่จะนำไปใช้ใหม่ในกระบวนการฟอกขาว นำไปใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี โดยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันได้

ระเบียบวิธีวิจัย (โดยย่อ)

การดำเนินงานระยะที่ 1

1. ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิตของโรงงาน
2. สำรวจและจัดเตรียมอุปกรณ์ สารเคมีและสถานที่ในการดำเนินงาน
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากการฟอกและย้อมและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี
4. แปลค่าผลการวิเคราะห์และจัดแบ่งประเภท

4.1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกขาวมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เหลือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสี โดยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันได้

4.2 น้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน แล้วจะมีสารประกอบของเหล็กและสีฟอกขาวอยู่ ซึ่งสามารถลดได้โดยวิธีการดูดซับ (Adsorption)

4.3 นำน้ำที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน มาบำบัดด้วยวิธีการดูดซับ (Adsorption) โดยตรงอาจมีประสิทธิภาพการบำบัดที่สูงเพียงพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่างๆ บางอย่างของทางโรงงานได้

5. นำข้อมูลที่ได้มาประเมินความเป็นไปได้ในการจัดสร้างเครื่องมือและระบบต้นแบบ ในเชิงเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยี

6. จัดทำรายงานสรุประยะที่ 1

การดำเนินงานระยะที่ 2

7. เตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการสร้างต้นแบบระบบการนำน้ำมาใช้ใหม่ของโรงงานฟอกย้อม
8. คิดตั้งและทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ
9. จัดทำรายงานสรุประยะที่ 2

การดำเนินงานโครงการ

การวิจัยในส่วนของ การบำบัดสีในน้ำเสียจากขั้นตอนการย้อมนั้น ใช้วิธีเฟนตอนออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารออกซิไดซ์ และใช้เฟอร์รัสไอออนในรูปของ เฟอร์รัสซัลเฟต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพยายามที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำเสียจากขั้นตอนการฟอกขาวซึ่งมีการใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กลับมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ ซึ่งงานในส่วนหนึ่งคือการศึกษาถึงปริมาณที่เหลืออยู่ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการนำกลับมาใช้

ในการนำการบำบัดสีโดยการเฟนตอนออกซิเดชันไปใช้กับ โรงงานนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงปัจจัยต่างๆเหมาะสม เช่น ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงความประหยัดในต้นทุนด้านสารเคมี และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยต้องทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการก่อนนำไปปรับใช้กับระบบจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองเพื่อหาตัวกลางชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี หาง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (regenerate) หรืออาจเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรกรรม ซึ่งเป็นทรัพยากรไร้ค่าที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยมีผู้เคยทำการศึกษาค้นคว้าตัวดูดซับอนินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ทางผู้วิจัยเห็นว่าเป็นการทดลองที่น่าสนใจ สามารถศึกษาเพิ่มเติมนำมาปรับใช้ได้จริงต่อไป โดยหาตัวดูดซับอื่นๆที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า และนำเอาตัวดูดซับที่ได้ทำการศึกษาแล้วมีคุณสมบัติที่ดี มาศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ เช่น ความเป็นกรดเป็นด่าง ขนาดของตัวดูดซับ เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูล ในการตัดสินใจเลือกตัวกลางที่เหมาะสมที่สุด มาใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

งานวิจัยที่ได้ดำเนินการ

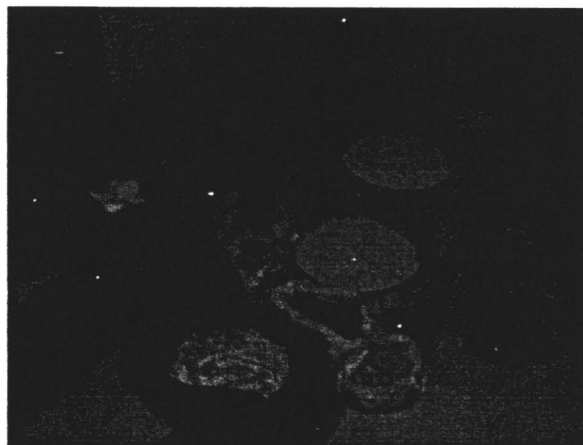
1. ทำการทดลอง Adsorption isotherm
2. ทำการทดลองดูดซับเหล็กด้วยตัวกลางอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ดีที่สุด
3. ทำการทดลองดูดซับสีและเหล็กในน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์
4. ทำการทดลองดูดซับสีและเหล็กต่อจากกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน

5. ทดลองผสมตัวกลางอินทรีย์และอนินทรีย์เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับ
6. ทำการทดลองปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย
7. ทดลองหาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียจากขั้นตอนการฟอก
8. ทำการวิเคราะห์หาอัตราส่วนของสารเคมีที่ต้องใช้โดยกระบวนการฟentonออกซิเดชัน
9. นำผลการทดลองที่ได้ไปทดลองใช้กับน้ำเสียของโรงงาน
10. ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์

ส่วนของกระบวนการดูดซับ

1. การทดสอบตัวกลาง

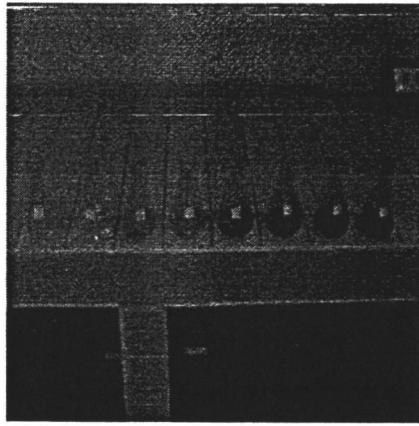
1.1 นำตัวกลางอินทรีย์ทั้ง 8 ชนิด คือ ขี้เลื่อย แกลบ ชานอ้อย เปลือกไข่ กาบมะพร้าว ฟางข้าว ใบไม้แห้ง และต้นกล้วย และตัวกลางอนินทรีย์ 12 ชนิด คือ ทรายหยาบ ทรายละเอียด ก้อนกรวดแดง เศษกระถางต้นไม้ สีลาแลง หินเกร็ดขาวจากสระบุรี ปะการัง นิลบ่อพลอย หินบัวลอย หินกรวดทะเล หินกรวดแก้ว และหินลูกรัง ดังภาพที่ 1 มาแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง



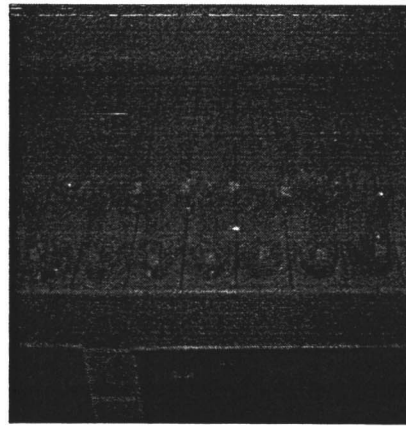
ภาพที่ 1 ตัวกลางอินทรีย์ และตัวกลางอนินทรีย์

1.2 นำน้ำที่ผ่านการแช่ตัวกลางมาผ่านกระดาษกรอง

1.3 ผลที่ได้จากการดูด้วยสายตาพบว่า ตัวกลางอินทรีย์มีตัวกลางที่มีสีเข้ม 2 ชนิด คือ ต้นกล้วย กับใบไม้ ส่วนตัวกลางอนินทรีย์มีตัวกลางที่มีสีเข้ม 2 ชนิด คือ ทรายหยาบกับทรายละเอียด แต่เมื่อเทียบกับตัวกลางอินทรีย์แล้วยังนับได้ว่ามีสีอ่อนอยู่ ดังภาพที่ 2



ตัวกลางอินทรีย์



ตัวกลางอนินทรีย์

ภาพที่ 2 ผลจากการแช่น้ำกลั่น

1.4 เนื่องจากคั่นกล้วให้น้ำที่มีสีเข้มแล้ว พบว่ายังมียางกล้วออกมาด้วย จึงตัดตัวกลางนี้ออก

1.5 ตัวกลางที่นำมาแทนคือ ขี้เถ้าที่เหลือจากการปิ้งหมูกระทะ

2. การเตรียมน้ำสีตัวอย่าง

2.1 ชั่งสีค่า 0.0700 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นปรับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 แล้วเทใส่ขวดเชิง ปริมาตรขนาด 1000 มล .

2.2 นำน้ำสีตัวอย่างที่เตรียมไว้ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นก่อนการดูดซับ โดยต้องมีการทำกราฟมาตรฐานทุกครั้ง

3. การทำกราฟมาตรฐาน

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสีตัวอย่าง 0.0100 กรัมต่อ 100 มล. แล้วนำไปเจือจางให้ได้ความเข้มข้นทั้งหมดคือ 0, 5, 10, 20, 40, 75 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 นำสารละลายมาตรฐานที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการดูดกลืนแสงของกราฟมาตรฐาน

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
5	0.098
10	0.194
20	0.387
40	0.772
75	1.439
100	1.913

4. ทำการทดลองหา Equilibrium time

4.1 เตรียมขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร สำหรับตัวกลางอินทรีย์ใช้น้ำหนักตัวกลาง 3 กรัม และแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 มิลลิโมล 97 มล.ในน้ำสี และสำหรับตัวกลางอนินทรีย์ใช้น้ำหนักตัวกลาง 15 กรัม และแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 มิลลิโมล 85 มล.ในน้ำสีตัวอย่างที่ความเข้มข้น 70 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการเก็บตัวอย่างเริ่มจาก 10, 20, 30 นาที และหลังจากนั้นทุกชั่วโมงเป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง

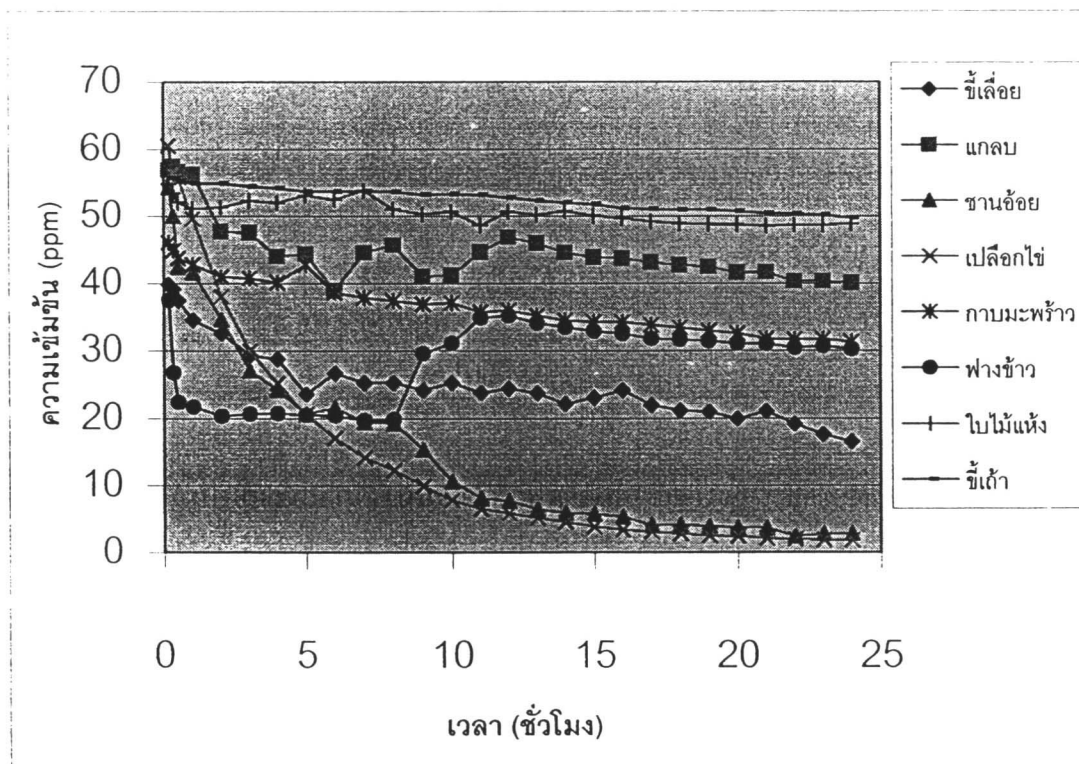
4.3 ดูดสารละลายหลังการเขย่า 1-2 มิลลิลิตร ใส่ในไมโครเซนทิฟิว นำไปปั่นที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

4.4 ดูเฉพาะส่วนที่เป็นสารละลายใสไม่มีตะกอนมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4.5 ทำการทดลองเช่นเดียวกันตั้งแต่ข้อ 1-3 กับตัวกลางอินทรีย์ทั้ง 8 ชนิด และตัวกลางอนินทรีย์ทั้ง 12 ชนิด (ทำรอบละ 4 ชนิด)

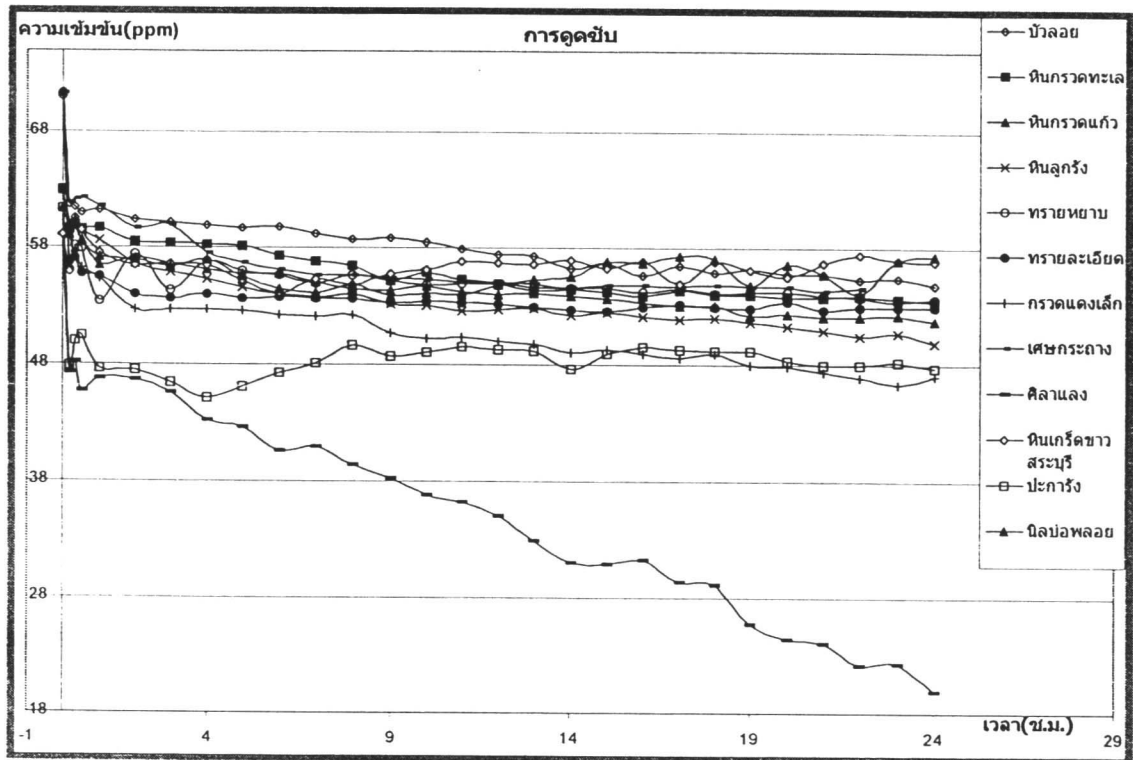
4.6 นำค่าความเข้มข้นที่ได้ไปเขียนกราฟ โดยแกน y เป็นค่าความเข้มข้น และแกน x เป็นระยะเวลา

4.7 เปรียบเทียบแนวโน้มของกราฟที่ได้เพื่อหาค่า Equilibrium time ของการดูดซับดังกล่าวที่ 3 สำหรับตัวกลางอินทรีย์ และภาพที่ 4 สำหรับตัวกลางอนินทรีย์



ภาพที่ 3 Equilibrium time ของตัวกลางอินทรีย์

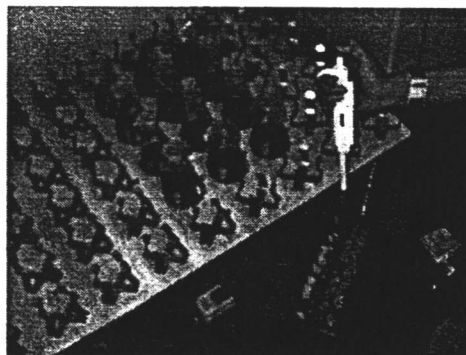
พบว่าตัวกลางอินทรีย์ที่มีแนวโน้มในการดูดซับดีที่สุดใน 3 ตัวคือ เปลือกไข่ ชานอ้อย และขี้เลื่อย ซึ่งจากกราฟพบว่าทั้ง 3 ตัวกลางมี Equilibrium time อยู่ที่ประมาณ 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 Equilibrium time ของตัวกลางอินทรีย์

ส่วนตัวกลางอินทรีย์ที่มีแนวโน้มในการดูดซับดีที่สุดใน 3 ตัวคือ ศีลาแลง ปะการัง ก้อนกรวดแดง สำหรับศิลาล้างยังไม่พบ Equilibrium time ภายใน 24 ชั่วโมง จึงต้องทำการทดลองในขั้นต่อไป ส่วนตัวกลางชนิดอื่นมี Equilibrium time อยู่ที่ประมาณ 5 ชั่วโมง

หมายเหตุ ในการทดลองครั้งแรกตัวกลางที่ใช้คือ ขี้เลื่อย แกลบ ชานอ้อย เปลือกไข่ ศีลาแลง หินแกรนิตขาวจากสระบุรี ปะการัง และนิลบอพลอย หลังจากดูดสารละลายที่เหวี่ยงตะกอนออกแล้วไม่ได้นำมาตรวจวัดเลยทิ้งไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ จึงทำให้เกิดเป็นความผิดพลาดขึ้นในการทดลอง และได้มีการทำการทดลองใหม่



ภาพที่ 5 ขณะทำการทดลองเขย่าตัวกลางในน้ำสีเพื่อดูดซับและดูน้ำสี

5. ทำการทดลอง Adsorption isotherm

5.1 ใส่ตัวกลางอินทรีย์ที่เลือกแล้ว 3 กรัม และแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 3 มิลลิโมล 97 มล. ในน้ำสีตัวอย่างที่ความเข้มข้น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล.

5.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง สำหรับตัวกลางอินทรีย์ และ 5 ชั่วโมง สำหรับตัวกลางอนินทรีย์ โดยทำการเก็บตัวอย่างหลังจากครบเวลาที่กำหนด

5.3 คุณสารละลายหลังการเขย่า 1-2 มิลลิลิตร ใส่ในไมโครเซนทิฟิว นำไปปั่นที่ความเร็ว 13,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

5.4 คุณเฉพาะส่วนที่เป็นสารละลายใสไม่มีตะกอนมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

5.5 นำค่าความเข้มข้นที่ได้ไปเขียนกราฟ โดยแกน y เป็นค่าความเข้มข้นสีที่อยู่ในตัวกลาง และแกน x เป็นค่าความเข้มข้นในสารละลาย

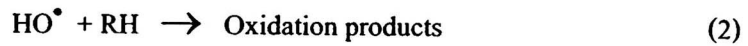
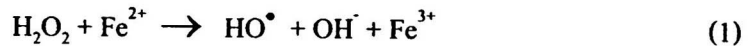
หมายเหตุ สำหรับตัวกลางอินทรีย์ในการทำการทดลองครั้งแรกไม่ได้มีการบดตัวกลางให้มีขนาดเท่ากันค่าที่ได้จึงไม่ดีพอ จึงเกิดเป็นข้อผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้นจึงต้องบดตัวกลางทั้ง 3 ชนิด ให้มีขนาดเท่ากันก่อนการทดลอง

ส่วนของกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

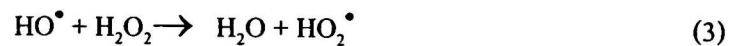
ผู้วิจัยได้เข้าเยี่ยมชมโรงงาน นันยางอุตสาหกรรมการทอ จำกัด ศึกษาในส่วนของกระบวนการผลิต และเข้าร่วมปรึกษาหารือกับทางโรงงานซึ่งมีความร่วมมือกันเป็นอย่างดี โดยได้รับข้อมูลของทางโรงงานเบื้องต้นในส่วนของกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ รวมถึงปริมาณสารเคมีที่ใช้ และตกค้างในน้ำเสียจากขั้นตอนการฟอกและย้อม โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากขั้นตอนการฟอกและย้อมมาทำการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ

ปัญหาหลักที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ คือ สีปริมาณมากปนเปื้อนลงในน้ำเสีย วิธีการทั่วไปที่นิยมใช้ในการกำจัดสีออกจากน้ำเสีย อาทิเช่น การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation), การดูดซับ (adsorption), การเติมโอโซน (ozonation), กระบวนการฟenton (fenton's oxidation), กระบวนการโฟโต้ฟenton (photo-fenton oxidation), การใช้ยูวีและไททาเนียมออกไซด์ (UV/TiO₂, การออกซิเดชันของอากาศแบบเปียก (wet-air oxidation) และการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี (electrochemical precipitation) แต่เนื่องจากน้ำเสียในกระบวนการฟอกของโรงงานนันยางการทอนั้นมีปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ค่อนข้างสูงและอาจเพียงพอต่อการนำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation processes, AOP) และเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีออกจากน้ำเสียโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เฟอร์รัสไอออน (Fe²⁺), คอปเปอร์ไอออน (Cu²⁺) และ

อื่นๆทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) สลายตัวกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ดังปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 :



ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) เป็นสารออกซิไดส์ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ไฮดรอกซิลเรดิคัลยังสามารถย่อยสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็น HO₂[•] ดังสมการที่ 3



จากนั้น HO₂[•] จะทำปฏิกิริยากับ HO₂[•] ได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) และ ออกซิเจน (O₂) ดังสมการที่ 4



ไฮดรอกซิลเรดิคัลจะทำลายโมเลกุลสีที่ไม่อิ่มตัวและพันธะอะโซ (Azo bond, N=N) ที่เป็นองค์ประกอบของส่วนให้สี (Chromophore) ซึ่งเป็นการกำจัดสีในน้ำเสีย

อัตราของการออกซิเดชันสีโดยไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•]) อธิบายได้ด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 2 ดังสมการ

$$-\frac{d[C]}{dt} = k_{\text{HO}} [C][\text{HO}^\bullet]$$

[C] = ความเข้มข้นของสี

[HO[•]] = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH[•])

k_{HO}[•] = ค่าคงที่ของ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่ 2

อัตราของกลไกการลดสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮดรอกซิลเรดิคัล(OH[•]) รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่าง

กระบวนการฟentonออกซิเดชันเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้โดยทั่วไป เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุที่มีมากตามธรรมชาติและมีความเป็นพิษค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น เช่น Cu²⁺ หรือ Zn²⁺ และผลจากการออกซิเดชันของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้น้ำและออกซิเจนซึ่งไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

โรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีกระบวนการฟอกเพื่อจะทำให้เส้นใยเป็นสีขาวก่อนที่จะนำไปย้อมสี สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบของคลอรีน (Chlorine), ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite) หรือ H₂O₂ ซึ่ง H₂O₂ เป็นสารเคมีหลักของกระบวนการฟentonออกซิเดชัน นอกจากนี้ น้ำเสียจากการฟอกมีความเป็นกรด-ด่างสูงมีค่าอยู่ระหว่าง 10-12 และอุณหภูมิสูง (40-60 องศาเซลเซียส) และมีการปนเปื้อนของสารฟอกและสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดออกมาจากเส้นใย

โดยปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ยังคงอยู่ในน้ำเสียนั้นขึ้นอยู่กับสูตรที่ใช้ในการฟอกโดยดูจากอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ น้ำเสียในกระบวนการฟอกของโรงงานนันทนาการทอ พบว่ามีค่าความเข้มข้นของธาตุบางตัวในปริมาณที่เกินกว่ามาตรฐานน้ำที่ใช้สำหรับการฟอกและมีความเข้มข้นของ H_2O_2 ในปริมาณค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะสมที่จะนำน้ำจากกระบวนการฟอกกลับมาใช้ฟอกอีกครั้ง แต่เนื่องจากมีความเข้มข้นของ H_2O_2 ในปริมาณที่สูง จึงมีความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ เฟนตอนออกซิเดชัน เพื่อการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมได้

วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อชี้ให้เห็นถึงสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันในการลดสีและความเป็นไปได้ที่จะนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กลับมาใช้ใหม่โดยวิธีเฟนตอนออกซิเดชัน

คุณลักษณะของน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการฟอกและย้อมแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 โดยในกระบวนการฟอกขาวจะมี ความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 11.75, 59.31 องศาเซลเซียส, 6200 กรัมต่อลิตรและ 2.5 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ส่วนน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการย้อมสีจะมี ความเป็นกรด- ด่าง, อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ความเข้มข้นของสี 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดง และ สีเหลือง เท่ากับ 11.96, 40.35 องศาเซลเซียส 59400 กรัมต่อลิตร 493 กรัมต่อลิตร 500 กรัมต่อลิตรและ 498 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Khusaurat (2002)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกขาวและย้อมสี

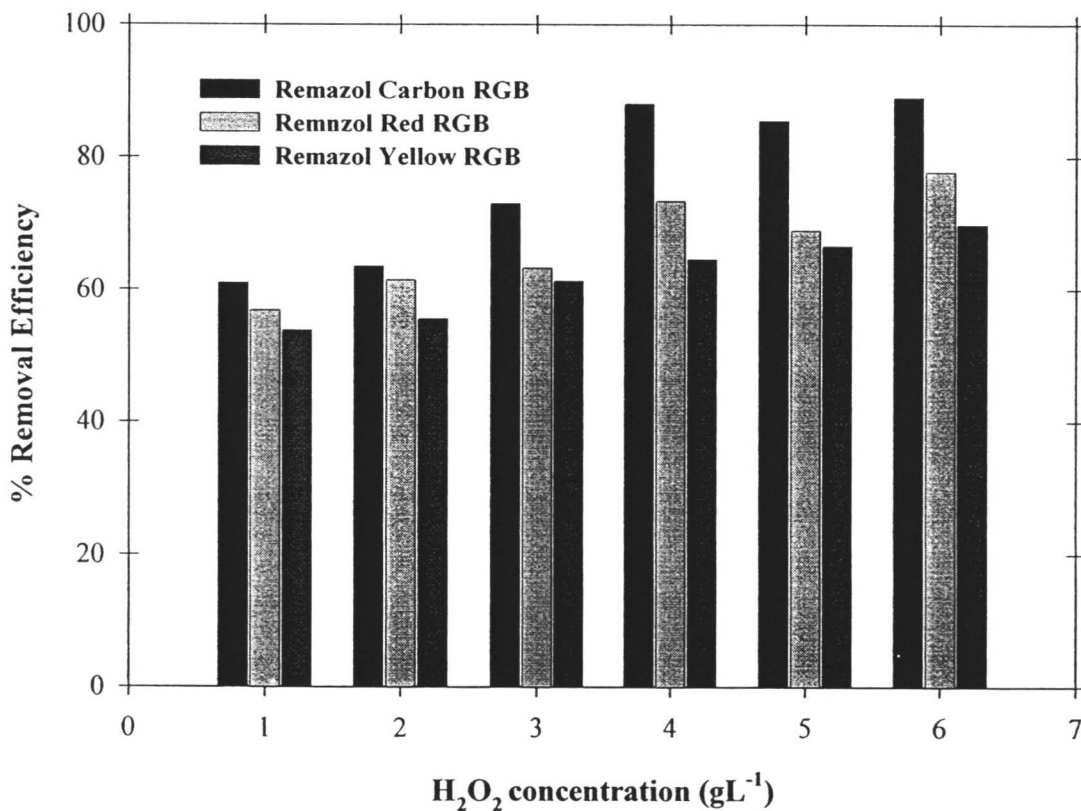
Process	Wastewater characteristics					
	pH	Temperature °C	TDS mgL ⁻¹	RC mgL ⁻¹	RR mgL ⁻¹	RY mgL ⁻¹
Bleaching	11.73	59.31	6200	0	0	0
Dyeing	11.96	40.35	59400	493	500	498

ตารางที่ 3 ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ pH ของน้ำเสียจากกระบวนการฟอกขาวและย้อมสี

Bleaching Formular	H_2O_2 Concentration gL ⁻¹		pH
	Average	SD	
H_2O_2 , NaOH			
3,3	1.73	0.14	10.47
4,4	2.51	0.16	9.92
6,6	3.64	0.11	11.32

ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 4 กรัมต่อลิตรโดยให้อัตราส่วนของเฟอรัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คือ 1 : 5 โดยน้ำหนัก ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟ ทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดง และสีเหลือง ได้ร้อยละ 88, 73 และ 64 ตามลำดับ ดังภาพที่ 6 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีก็มากขึ้นตามไปด้วย โดยปกติเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้ไฮดรอกซิลเรดิคอลลเพิ่มขึ้น และจะมีผลทำให้อัตราของการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับผลการศึกษานี้ Swaminathan และคณะ (2003) และ Bossmann และคณะ (1998) จากรายงานของ Kang และคณะ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 57 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 10 เป็น 100 กรัมต่อลิตร



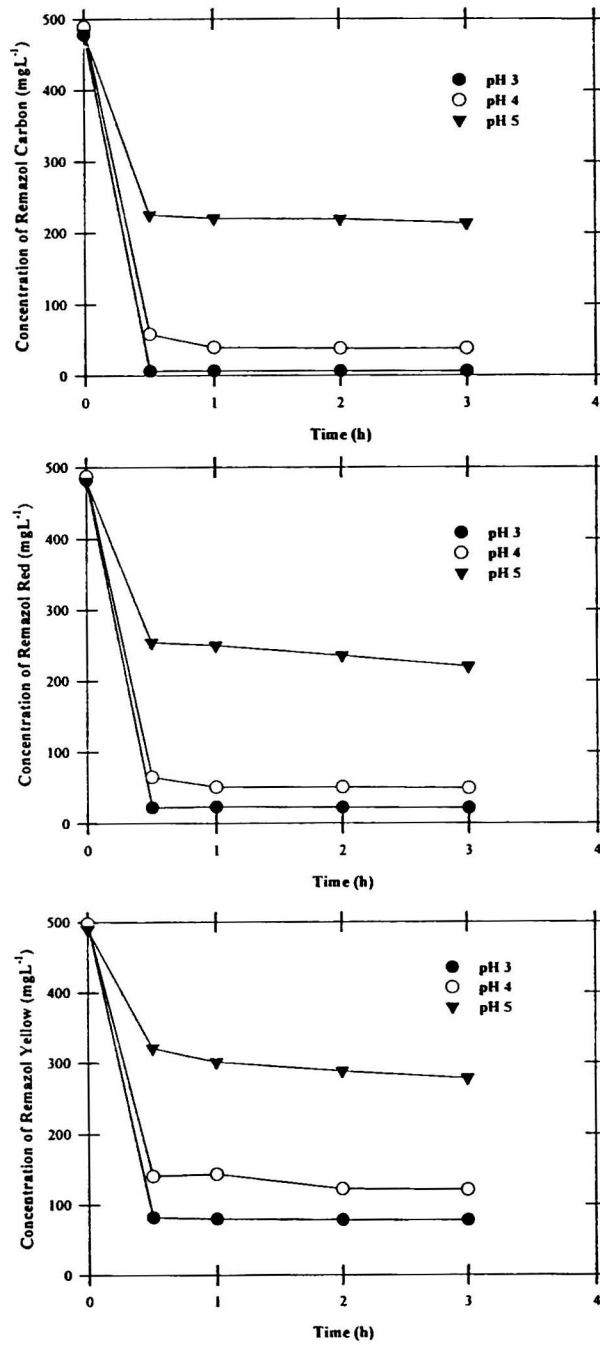
ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ 3 ชนิดโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 4 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดสีไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าจะมีตัวขัดขวางการทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคอลลเพิ่ม ในขณะที่เราเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้สูงขึ้น Meric และคณะ (2004)

ผลของความเป็นกรด-ด่าง

ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสีโดยกระบวนการเฟ้นตอนออกซิเดชันมีค่าเท่ากับ 3 แสดงได้ดังภาพที่ 7 ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดสีรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดง และสีเหลืองได้ร้อยละ 98, 93 และ 80 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีกว่าความเป็นกรด-ด่างสูง Swaminathan และคณะ (2003) พบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น จะมีผลทำให้ความเข้มข้นของสีในสารละลายและค่าการดูดกลืนแสงมากขึ้นด้วย ซึ่งให้เห็นว่ามีโมเลกุลของสีในน้ำเสียนั้นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะที่เป็นด่างจะมีผลทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เสถียรและสูญเสียความสามารถในการออกซิไดส์ และยืนยันว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการกำจัดสีทั้งหมด คือ ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3

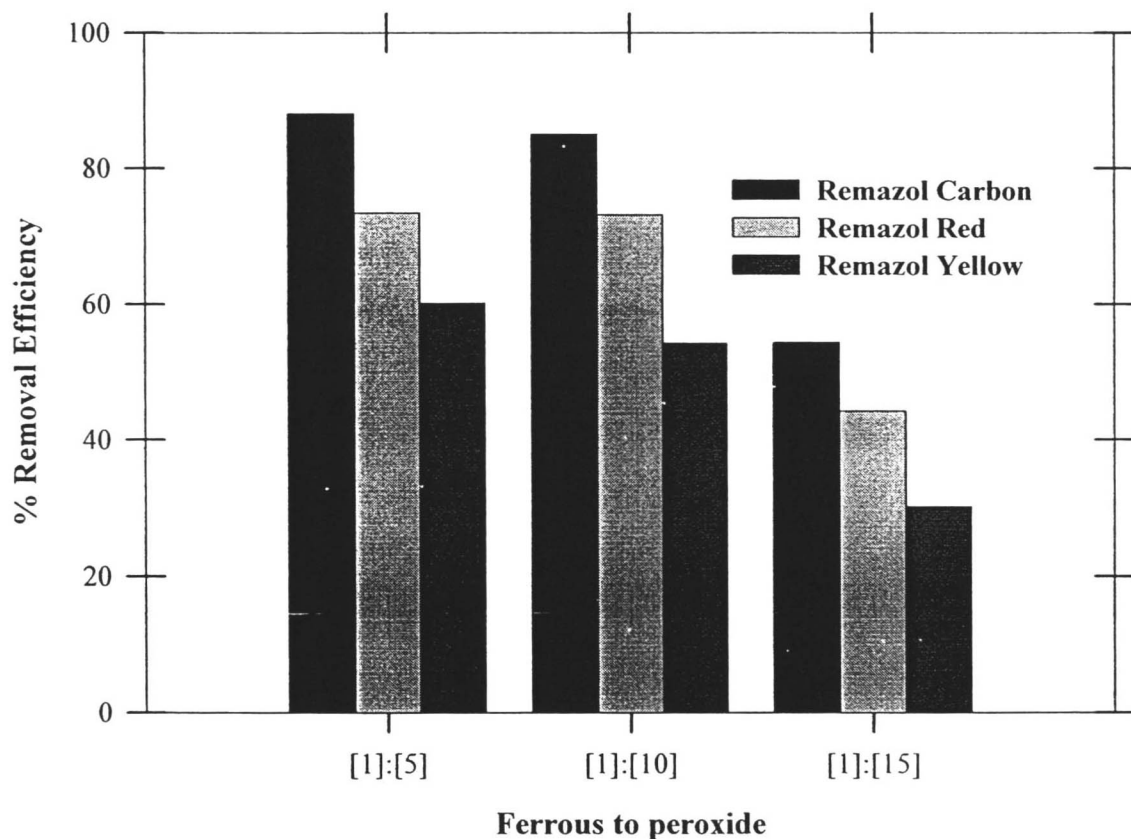
Lin และ Lo (1997) พบว่าเมื่อความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 4 จะมีผลทำให้เฟอร์รัสไอออนอิสระในสารละลายลดลง และทำให้เฟอร์รัสไอออนอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดอื่นซึ่งขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์รัสไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และจะทำให้เฟอร์ริกออกไซด์ไฮดรอกไซด์ตกตะกอน การศึกษาของ Tang และ Chem (1996) เรื่องการลดสี โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และผงเหล็ก พบว่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลของสีและอัตราการละลายน้ำของผงเหล็ก



ภาพที่ 7 การลดสีแอกทฟทั้ง 3 ชนิด ที่ความเป็นกรดต่างๆ ด้วยกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

ผลของอัตราส่วนของเฟอร์รัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

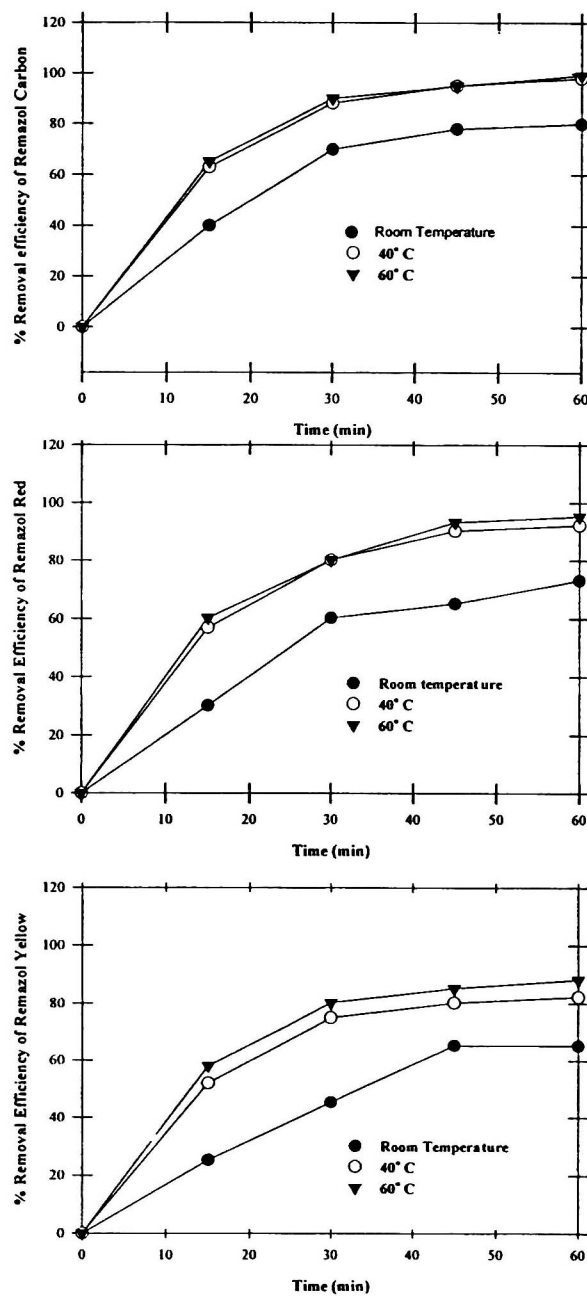
ประสิทธิภาพในการกำจัดสีซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง อัตราส่วนของเฟอร์รัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 : 5 และ 1 : 10 ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงดังภาพที่ 8 และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 : 15 มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำที่สุด Brgda (1995) ซึ่งให้เห็นว่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการฟentonออกซิเดชันอยู่ในช่วง 3 และ 4 และอัตราส่วนของเฟอร์รัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 : 5 ซึ่งเมื่อเพิ่มเฟอร์รัสจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสี แต่ถ้าหากมีปริมาณของเฟอร์รัสมากเกินไปไม่เหมาะสมกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเฟอร์รัสซัลเฟตจะขัดขวางการทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคัล Meric และคณะ (2004) ในทางตรงกันข้าม ถ้าความเข้มข้นของเฟอร์รัสน้อยเกินไปก็จะไม่สามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ เช่นเดียวกับผลการทดลองซึ่งใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 : 15 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำที่สุด



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราส่วนต่างๆของเฟอร์รัส : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

ผลของอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีแสดงดังภาพที่ 9 ซึ่งได้ทำการทดลอง ดังนี้คือ เพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วซึ่งจะมีผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ Meric และคณะ (2004) เปิดเผยว่า การใช้กระบวนการฟentonออกซิเดชันที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส นั้นไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 60 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มเฟอร์รัสไอออน โดยจะไปขัดขวางการทำงานของไฮดรอกซิลเรดิคัล Benitez และคณะ (2001)



ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

การนำเฟอร์สกลับมาใช้ใหม่

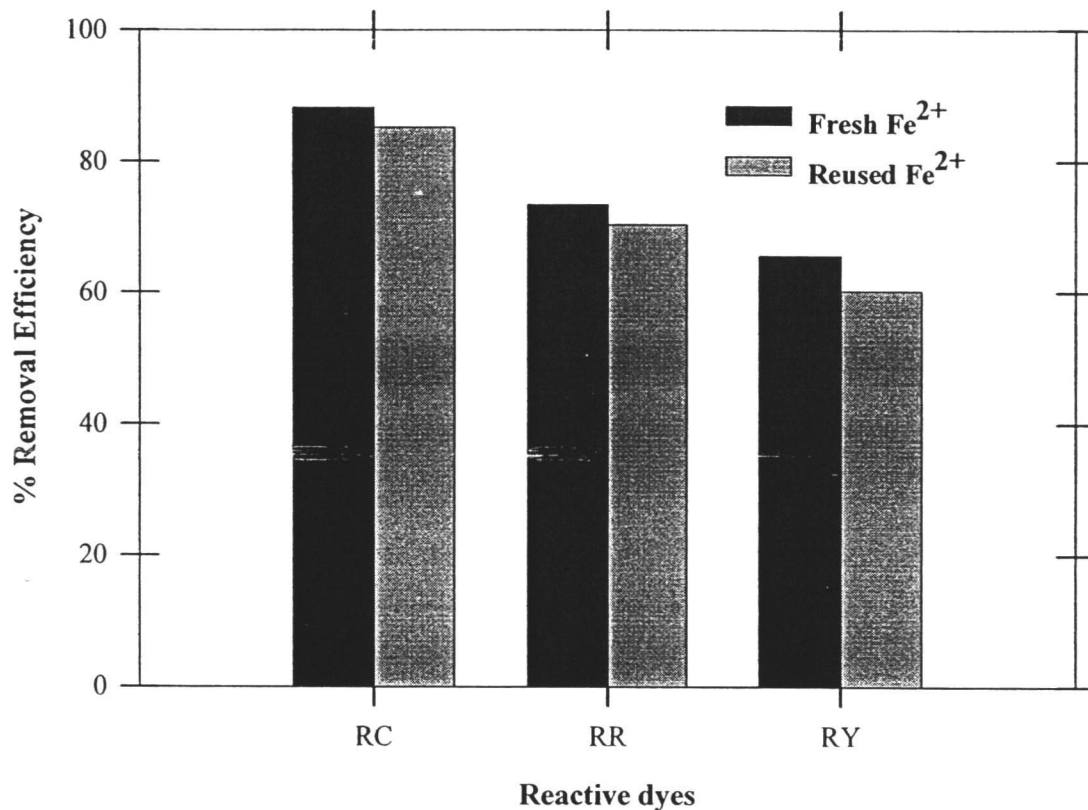
กระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันต้องการเฟอร์สไอออนในการทำปฏิกิริยา ซึ่งขณะเฟอร์สไอออนนั้นเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไอออนได้อย่างรวดเร็ว และตกตะกอนเมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจากการปรับเสถียรของน้ำเสียเป็นกลางก่อนที่จะปล่อยน้ำออกไป ซึ่งแสดงได้ดังปฏิกิริยาที่ 5



เนื่องจากตะกอนของเหล็กต้องนำออกมาก่อนที่จะถูกปล่อยออกไป ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นที่ความเป็นไปได้ในการนำเหล็กซึ่งเป็นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่กลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วและประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมี

ในการศึกษาครั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ ทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดงและสีเหลือง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในภาพที่ 6 ประสิทธิภาพในการบำบัดซึ่งใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนของเฟอร์สใหม่ : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1: 10 ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 และ อุณหภูมิ สามารถลดสีรีแอกทีฟ ทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดงและสีเหลือง ลงได้ร้อยละ 88.25, 73.42 และ 65.58 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการทดลองโดยใช้เฟอร์สที่ผ่านการใช้แล้วในสภาวะเดียวกันพบว่าสามารถลดสีต่างๆ ลงได้ร้อยละ 85.21, 70.32 และ 60.21 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม Kavitha and Palanivelu (2004) พบว่าเมื่อมีการนำเหล็กที่ผ่านการใช้น้ำเสียมาใช้ในกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นต่ำ (<0.5 มิลลิโมล เฟอร์สไอออน(Fe^{2+})) จะลดประสิทธิภาพในการบำบัดลงไปร้อยละ 12 ซึ่งเป็นไปได้ว่าเหล็กไม่สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการนี้ได้ หรือกล่าวได้ว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 25 เท่านั้น

การนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่สามารถลดความเป็นพิษของเหล็กในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยออกไปได้ นอกจากนี้การใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูง (กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริกหรือกรดไนตริก) ในการเตรียมเหล็กเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จะช่วยในการลดความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียก่อนเข้าสู่กระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน โดยไม่ต้องใช้กรดปริมาณมากในการปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย



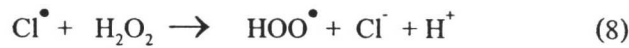
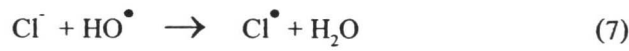
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ระหว่างเฟอร์รัสใหม่กับเฟอร์รัสที่นำกลับมาใช้ใหม่ ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

การนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฟอกมาใช้ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน

ความเข้มข้นเฉลี่ยของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฟอกก่อนกระบวนการฟentonออกซิเดชัน มีค่า 2.56 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดง และสีเหลือง ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สังเคราะห์ในสภาวะที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 73.42, 63.14 และ 60.14 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฟอกในสภาวะที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 50.14, 39.12 และ 25.14 ตามลำดับ แสดงได้ดังภาพที่ 7 ซึ่งการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ในน้ำฟอกในการทำปฏิกิริยานั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สังเคราะห์ในทุกๆ สีข้อม

ในกระบวนการย้อมสี โขเดียมคลอไรด์ถูกใส่ลงไปตามสัดส่วนของสีที่ใช้ ซึ่งช่วงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จะอยู่ระหว่าง 10 – 90 กรัมต่อลิตร ไอออนบางชนิด เช่น คลอไรด์ไอออน อาจลดประสิทธิภาพในการออกซิไดส์ของไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ และประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงเมื่อคลอไรด์ไอออนไปจับกับไฮดรอกซิลเรดิคัล กลายเป็นกรดไฮโปคลอรัสซึ่งแสดงได้ดังปฏิกิริยาที่ 6 อย่างไรก็ตามไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งมีคลอไรด์ไอออนจะทำ

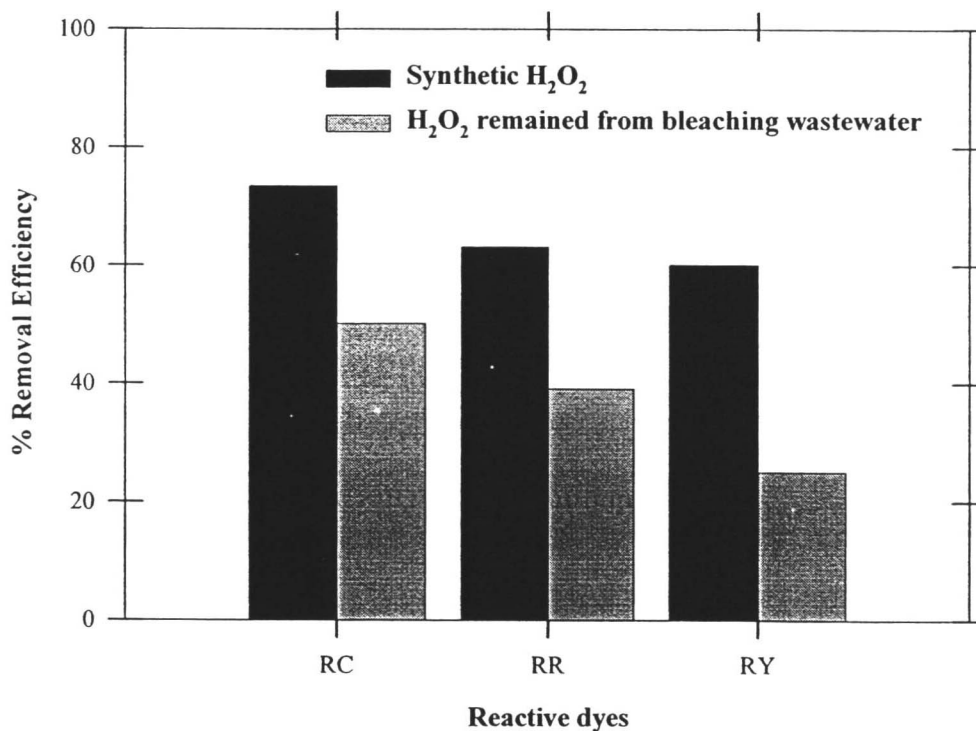
ปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กลายเป็น HO_2^\bullet ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลงดังปฏิกิริยาที่ 7 และ 8



นอกจากนี้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TDS) ดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีเกลืออยู่ในปริมาณมากซึ่งเกลืออาจจะไปขัดขวางการเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้

นอกจากพวกเกลือแล้วปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำสูง (SS) ยังสามารถลดประสิทธิภาพในการบำบัดในกระบวนการฟentonออกซิเดชันได้อีกด้วย จากรายงานของ Khusakulrat (2002) พบว่าปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำที่ผ่านกระบวนการฟอกของโรงงานสิ่งทอมีค่าอยู่ระหว่าง 16-411.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของผ้าและเส้นใย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เอง แสดงให้เห็นว่าเพราะเหตุใดประสิทธิภาพในการกำจัดสีจึงต่ำเมื่อนำน้ำที่ผ่านกระบวนการฟอกมาใช้ในกระบวนการฟentonออกซิเดชัน



ภาพที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีทั้ง 3 ชนิด ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สังเคราะห์กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ในน้ำฟอก โดยใช้กระบวนการฟentonออกซิเดชัน

สรุปผล

จุดมุ่งหมายของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ก็เพื่อที่จะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันและความเป็นไปได้ในการนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฟอกกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนของเฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 : 10 ที่ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 และ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ ทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดงและ สีเหลือง ได้ร้อยละ 88, 73 และ 64 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อทำการทดลองโดยใช้เฟอร์รัสไอออนที่ผ่านการใช้แล้วในสภาวะเดียวกัน พบว่าสามารถลดสีต่างๆ ลงได้ร้อยละ 85.21, 70.32 และ 60.21 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟ ทั้ง 3 ชนิด คือ สีดำ สีแดง และ สีเหลือง ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สังเคราะห์ในสภาวะที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 73.42, 63.14 และ 60.14 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำฟอกในสภาวะที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 50.14, 39.12 และ 25.14 ตามลำดับ

เฟนตอนออกซิเดชันเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการบำบัดสีแต่หากใช้เฟนตอนออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวในการกำจัดสีจากกระบวนการฟอกเป็นเทคโนโลยีที่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ตัวอย่างเช่น ความเป็นกรด-ด่าง (11 -12) ที่สูงของน้ำเสียของโรงงานสิ่งทอซึ่งต้องทำการปรับความเป็นกรด-ด่างให้ลดลงเหลือ 3 ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมีเพิ่มขึ้น ดังนั้นวิธีการนี้จะมีความเหมาะสมหากมีการปรับใช้ควบคู่ไปกับที่ประหยัดกว่า เช่น การดูดซับหรือการบำบัดด้วยวิธีการทางชีววิทยา

ความเป็นไปได้ในการนำวิธีเฟนตอนออกซิเดชันมาใช้ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ

ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชัน และการดูดซับสีด้วยถ่านหุงต้มร่วมกับกระบวนการเฟนตอนออกซิเดชันนั้นมีรายละเอียดด้านค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 4 และ 5 โดยเรียงจากน้อยไปมาก ดังนี้ ลำดับแรก คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้านสารเคมีและวัสดุต่อ 3 รอบการบำบัด 52.4 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ลำดับที่สอง คือ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4.0 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้านสารเคมีและวัสดุต่อ 3 รอบการบำบัด 82.03 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และลำดับสุดท้าย คือ การกำจัดสีโดยผ่านถ่านบดละเอียด 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำไปกำจัดสีด้วยเฟนตอนออกซิเดชันโดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 และความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้านสารเคมีและวัสดุต่อ 3 รอบการบำบัด 247.45 บาทต่อลูกบาศก์เมตร แสดงได้ดังตารางที่ 6 ต้นทุนในการบำบัดรอบแรกนั้นค่อนข้างสูง แต่สามารถนำเฟอร์รัสไอออนและถ่านหุงต้มกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเฟอร์รัส

ไอออนนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 2 ครั้ง แต่อาจต้องมีการเติมสารลงไปอีกเล็กน้อยเพื่อให้ปฏิกิริยาสมดุลกัน ส่วนถ่านหุงต้มสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 4 ครั้ง โดยการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดรอบต่อไปจะต่ำลง แสดงได้ดังภาพที่ 12 หากเทียบกับค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและค่าน้ำบาดาลของทางโรงงาน ซึ่งมีค่าใช้จ่าย 15.71 บาทต่อลบ.ม. วิธีต่าง ๆ ที่ทางทีมวิจัยได้ทำการศึกษาทดลองก็น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งในการพิจารณาเพื่อแก้ไขปัญหของทางโรงงานต่อไป

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการบำบัดโดยเฟนตอนออกซิเดชันเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออนและถ่านใหม่

ชนิดสารเคมี	$H_2O_2 = 2.5$ กรัมต่อลิตร	$H_2O_2 = 4$ กรัมต่อลิตร	ดูดซับด้วยถ่านหุงต้ม+เฟนตอน
	$Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$	$Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$	$H_2O_2 = 2.5$ กรัมต่อลิตร
	pH = 3		$Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$ และ pH = 3
	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.
HCl	12.75	12.75	12.75
NaOH	3.38	3.38	3.38
$FeSO_4$	4.06	6.50	4.06
H_2O_2	-	9.38	-
ถ่านหุงต้ม	-	-	195.00
รวม	20.19 บาท	32.01 บาท	215.19 บาท

ตารางที่ 5 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการบำบัดโดยฟentonออกซิเดชันเมื่อนำเฟอร์รัสไอออน
และถ่านกลับมาใช้ใหม่

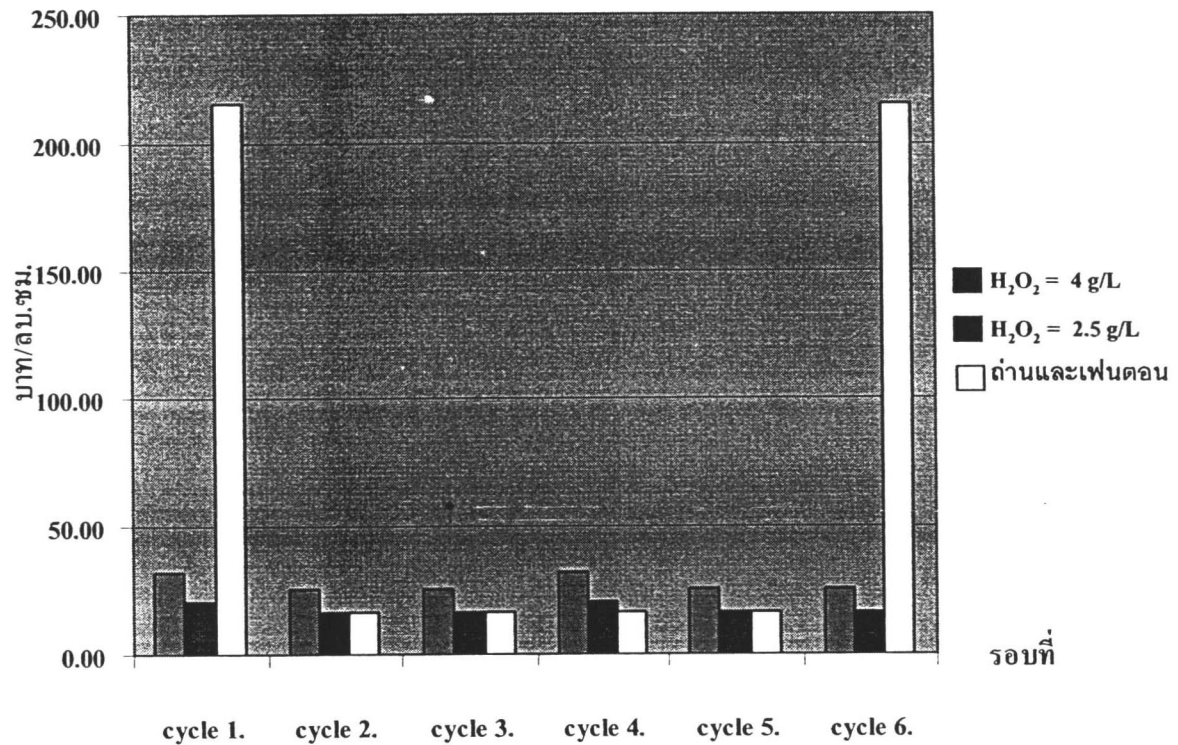
ชนิด สารเคมี	H ₂ O ₂ = 2.5 กรัมต่อลิตร	H ₂ O ₂ = 4 กรัมต่อลิตร	ดูดซับด้วยถ่านหุงต้ม+ฟenton
	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10	H ₂ O ₂ = 2.5 กรัมต่อลิตร
	pH = 3	pH = 3	Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10 และ pH = 3
	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.	ราคาสารเคมีต่อลบ.ม.
HCl	12.75	12.75	12.75
NaOH	3.38	3.38	3.38
FeSO ₄	-	-	-
H ₂ O ₂	-	9.38	-
ถ่านหุงต้ม	-	-	-
รวม	16.13 บาท	25.51 บาท	16.13 บาท

หมายเหตุ : ราคาสารเคมีที่ใช้ในการคำนวณ (บาทต่อกิโลกรัม)

กรดไฮโดรคลอริก	=	3.50 บาท	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	=	5.00 บาท
โซเดียมไฮดรอกไซด์	=	6.50 บาท	(ร้อยละ 50)	=	3.90 บาท
เฟอร์รัสซัลเฟต	=	6.50 บาท	ถ่านหุงต้ม	=	3.90 บาท

ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายรวมด้านสารเคมีและวัสดุ (ต่อ 3 รอบการบำบัด)

ค่าใช้จ่ายรวมด้านสารเคมีและวัสดุ (ต่อ 3 รอบการบำบัด)		
H ₂ O ₂ = 2.5 กรัมต่อลิตร Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10 pH = 3	H ₂ O ₂ = 4 กรัมต่อลิตร Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10 pH = 3	ดูดซับด้วยถ่านหุงต้ม + ฟenton H ₂ O ₂ = 2.5 กรัมต่อลิตร Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ = 1 : 10 และ pH = 3
52.45 บาท	82.03 บาท	247.45 บาท



ภาพที่12 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีและวัสดุในการกำจัดสัด้วยวิธีต่าง ๆ

ความเป็นไปได้ทางเทคนิค

ความเป็นไปได้ในการนำน้ำฟอกกลับมาใช้ใหม่

คุณภาพน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกจะต้องมีความบริสุทธิ์เพียงพอ ดังนั้นน้ำที่นำมาใช้ในกระบวนการฟอกต้องผ่านกรรมวิธีในการบำบัดข้างต้นมาก่อน เพื่อให้น้ำมีความสะอาดยิ่งขึ้น เช่น การกรอง หรือการผ่านเรซิน เป็นต้น ถ้าในน้ำยังมีไอออนของธาตุบางชนิดที่อาจมาจากน้ำ เครื่องจักร ภาชนะบรรจุ ผ้า สารเคมี เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม หรือโลหะหนักละลายอยู่ ไอออนของธาตุเหล่านี้อาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการผลิตสิ่งทอได้

กระบวนการเตรียมสิ่งทอโดยเฉพาะในกระบวนการฟอกเป็นกระบวนการผลิตที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก น้ำจึงเป็นปัจจัยการผลิตที่มีความสำคัญ น้ำที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานควรเป็นน้ำอ่อน ใส มีเกลือละลายอยู่ไม่มาก โดยเฉพาะเกลือของ โลหะไม่ควรมีอยู่ในน้ำที่จะนำไปใช้ในกระบวนการเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกลดลง

จากการศึกษาปริมาณธาตุ จำนวน 5 ชนิด ในน้ำที่ผ่านกระบวนการฟอกขาวเป็นจำนวน 3 รอบ พบเหล็ก โครเมียม และทองแดง และธาตุที่มีผลต่อความกระด้างของน้ำ คือ แคลเซียม และแมกนีเซียม ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณของเหล็ก โครเมียม และทองแดง ในน้ำที่ผ่านการฟอกครั้งที่ 1 ,2 และ 3

ชนิดของธาตุ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น (มก./ล.)		
	น้ำที่ผ่านการฟอก ครั้งที่ 1	น้ำที่ผ่านการฟอก ครั้งที่ 2	น้ำที่ผ่านการฟอก ครั้งที่ 3
เหล็ก	0.94	1.00	1.04
โครเมียม	13.68	23.43	13.01
ทองแดง	0.12	0.22	0.01
แคลเซียม	17.66	33.88	50.25
แมกนีเซียม	30.21	38.76	77.54

จากตารางที่ 7 พบว่ามีธาตุ 3 ชนิดในน้ำที่ผ่านการฟอกทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งมีแนวโน้มดังนี้ คือ ปริมาณของเหล็กในน้ำที่ผ่านการฟอกทั้ง 3 ครั้ง ก่อนข้างคงที่ คือมีค่าประมาณ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของโครเมียมมากที่สุดในน้ำฟอกครั้งที่ 2 คือ 23.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนน้ำที่ผ่านการฟอกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 3 มีปริมาณของโครเมียมใกล้เคียงกัน คือ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณของทองแดงจะมีมากที่สุดในน้ำฟอกครั้งที่ 2 คือ 0.22 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณของทองแดงลดลงในน้ำฟอกครั้งที่ 1 คือ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณของทองแดงน้อยที่สุดในน้ำฟอกครั้งที่ 3 คือ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนธาตุที่มีผลต่อความกระด้างของน้ำ 2 ชนิดในน้ำที่ผ่านการฟอกทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งมีแนวโน้มดังนี้ คือ ปริมาณของแคลเซียมมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนครั้งของการฟอก มีค่าเรียงตามลำดับจากน้ำที่ผ่านการฟอก ครั้งที่ 1 ถึง ครั้งที่ 3 ดังนี้ 33.88 ,66.17 และ 50.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนครั้งของการฟอกเช่นเดียวกับแคลเซียม มีค่าเรียงตามลำดับจากน้ำที่ผ่านการฟอก ครั้งที่ 1 ถึง ครั้งที่ 3 ดังนี้ 38.76 ,30.21 และ 77.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์พบว่ามีธาตุทั้ง 3 ชนิด คือ เหล็ก โครเมียมและทองแดง อยู่ในน้ำที่ผ่านการฟอกทั้ง 3 ครั้ง ซึ่งน้ำที่ใช้ในการฟอกหากมีเกลือของโลหะหนัก โดยเฉพาะเกลือของเหล็ก ทองแดง แมงกานีส สามารถเร่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้สลายตัวอย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุทำให้ผ้าเปื้อน ขาดเป็นรู หรือมีสีไม่ขาวเท่าตามที่ต้องการ นอกจากนี้เกลือของเหล็กยังทำให้เกิดสนิมเหล็กเกิดเป็นจุดบนผ้าได้อีกด้วย ส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำผ่านกระบวนการฟอกหลายครั้ง มีผลทำให้น้ำมีความกระด้างเพิ่มขึ้นและอาจทำให้เกิดคราบขาวของแคลเซียมคาร์บอเนต

หรือแมกนีเซียมคาร์บอเนตเกาะติดผ้าเป็นจำๆ ทำให้บริเวณดังกล่าวของผ้าไม่ดูดซับน้ำและมีการดูดซับสารเคมีต่างๆ ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำผ้าไปซักจะทำให้สีติดไม่สม่ำเสมอตามมา

จากเหตุผลดังกล่าวที่ผ่านกระบวนการฟอกแล้วจึงไม่เหมาะสมในการนำกลับไปใช้ในกระบวนการฟอกได้ เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกและข้อมลลดลง แต่อาจจะนำมาใช้ในกระบวนการอื่นๆ ได้ เช่น การบำบัดน้ำก่อนการปล่อยทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อม

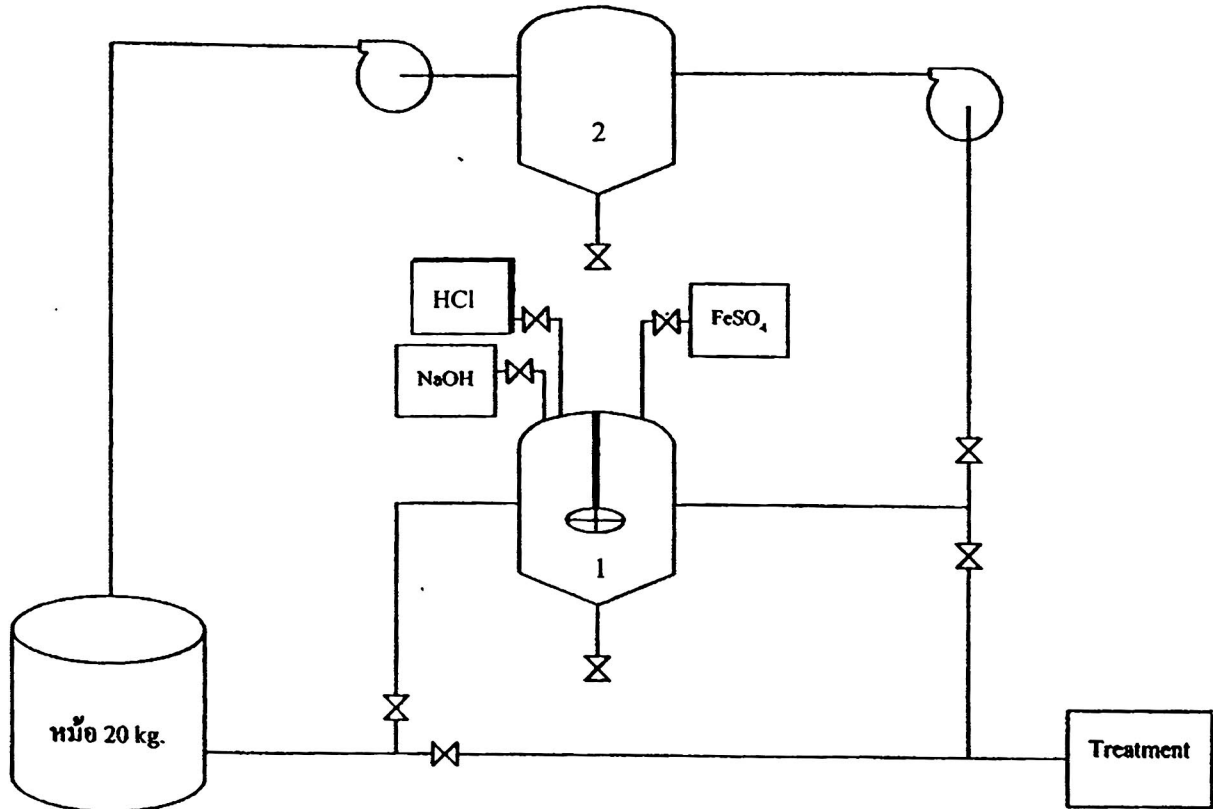
ความเป็นไปได้ของกระบวนการฟอกตอนออกซิเดชัน

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดำ สีแดง และสีเหลืองจากมากไปน้อย แสดงได้ดังตารางที่ 8 ลำดับแรก ใช้การดูดซับด้วยถ่านบดละเอียด 24 ชั่วโมง ร่วมกับเฟนตอนออกซิเดชันที่ใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 ความเป็นกรด-ด่าง 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดำ สีแดง และสีเหลือง ร้อยละ 94, 91 และ 86 ตามลำดับ ลำดับที่สอง คือใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 4 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 ความเป็นกรด-ด่าง 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดำ สีแดงและสีเหลือง ร้อยละ 88, 73 และ 64 ตามลำดับ ลำดับสุดท้ายคือความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร เฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 ต่อ 10 ความเป็นกรด-ด่าง 3 ประสิทธิภาพในการบำบัดสีดำ สีแดงและสีเหลือง ร้อยละ 73, 63 และ 60 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการกำจัดสีแบบต่าง ๆ								
$H_2O_2 = 2.5 \text{ g/L}$ $Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$ $pH = 3$			$H_2O_2 = 4 \text{ g/L}$ $Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$ $pH = 3$			ดูดซับด้วยถ่านหุงต้ม +เฟนตอน $H_2O_2 = 2.5 \text{ g/L}, Fe^{2+} : H_2O_2 = 1 : 10$ $pH = 3$		
ประสิทธิภาพในการลดสี			ประสิทธิภาพในการลดสี			ประสิทธิภาพในการลดสี		
สีดำ	สีแดง	สีเหลือง	สีดำ	สีแดง	สีเหลือง	สีดำ	สีแดง	สีเหลือง
73	63	60	88	73	64	94	91	86

ในด้านของการบำบัดจริงทางคณะผู้วิจัยได้เสนอต้นแบบของระบบบำบัดด้วยเฟนตอนออกซิเดชัน แสดงได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ต้นแบบระบบบำบัดด้วยเฟนตอนออกซิเดชัน

ต้นแบบระบบบำบัดด้วยเฟนตอนออกซิเดชัน มีวิธีการทำงานดังภาพ คือ นำน้ำสีที่ผ่านการข้อม มาไว้ในถังบำบัดหมายเลข 1 จากนั้นนำน้ำฟอกที่เพิ่งฟอกเสร็จใหม่ ๆ มาผสมรวมกัน ปรับค่าความเป็น กรด-ด่าง ของน้ำฟอกและน้ำข้อมที่ผสมกันในถังที่ 1 ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3 หลังจากนั้น เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสซัลเฟตไอออนซึ่งเตรียมจากเฟอร์รัสซัลเฟตลงไปในถังที่ 1 ด้วยอัตราส่วน เฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 1: 10 (หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร) ใช้เวลาในการบำบัดด้วย เฟนตอนออกซิเดชัน ประมาณ 30 นาที จากนั้นปรับความเป็นกรดจาก 3 ให้เป็น 7 เพื่อให้เกิดการ ตกตะกอนของเหล็กออกไซด์ แล้วไขตะกอนดังกล่าวออกทางก้นถัง ส่วนน้ำใสด้านบนจะถูกนำไปพัก ไว้ในถังตกตะกอนหมายเลข 2 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนเหล็กออกไซด์ แล้วจึงไขตะกอนดังกล่าวออก ทางก้นถัง น้ำใสด้านบนจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นต่อไป เช่น นำกลับไปล้างน้ำรอบที่ 1 เป็นต้น

