

การกำจัดสี่ด้วยไอโซนจากสารละลายลิกนินในท่อแนวระนาบ



นาย รวิศ เจียสกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2596-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OZONE DISCOLORATION OF LIGNIN SOLUTION IN HORIZONTAL PIPE



Mr. Rawit Cheasagul

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

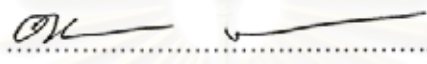
Academic Year 2005

ISBN 974-53-2596-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การกำจัดสีด้วยโอโซนจากสารละลายลิกนินในท่อแวนระนาบ  
โดย    นาย รวิศ เจียสกุล  
สาขาวิชา                                      วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษา                              อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์

---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

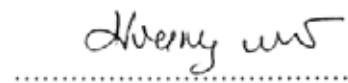
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ท้าวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา นิตศิริเวช)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ กว้านต์)

รวิศ เจียสกุล : การกำจัดสีด้วยโอโซนจากสารละลายลิกนินในท่อแนวระนาบ (OZONE DISCOLORATION OF LIGNIN SOLUTION IN HORIZONTAL PIPE) อ. ที่ปรึกษา :  
อ. ดร. วิทย์ สุนทรนันท์, 124 หน้า. ISBN 974-53-2596-1

การศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นงานทดลองเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ พบว่าในช่วงต้นของปฏิกิริยากับโอโซน สารละลายลิกนินจะมีความเข้มสีสูงขึ้น แล้วจึงค่อยๆ าลง เนื่องจากโอโซนจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในโครงสร้างของลิกนิน ตามปฏิกิริยา Darkin เกิดเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะแบบควิโนโนน ซึ่งมีสีน้ำตาล และทำให้ค่า chromophore index สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสีที่วัดได้จากสารละลายมีค่ามากขึ้น และเมื่อโครงสร้างควิโนโนนถูกออกซิไดซ์ความเข้มสีของสารละลายจึงเริ่มลดลง ในขณะที่ค่าซีไอดีมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเป็นการยืนยันถึงการสลายตัวของโครงสร้างโมเลกุลลิกนิน และในการพิจารณาถึงโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันพบว่าหมู่โครงสร้างที่ก่อให้เกิดสีของลิกนินจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงส่งผลให้ปริมาณการลดของสีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการลดสีของกระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทมวลสารระหว่างเฟส ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมระหว่างของไหลทั้งสองเฟส และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส โดย static mixer เป็นอุปกรณ์สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการลดสีในระบบท่อแนวระนาบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา...วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา..2548.....

## 4570500521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: OZONE/ LIGNIN / COLOR REMOVAL/ OZONATION/ HORIZONTAL PIPE

RAWIT CHEASAGUL : OZONE DISCOLORATION OF LIGNIN SOLUTION IN  
HORIZONTAL PIPE. THESIS ADVISOR : WIT SOONTARANUN, Ph. D, 124 pp. ISBN  
974-53-2596 -1

The study of discoloration of lignin solution by ozone in horizontal pipe was carried out in this research. It was found that, at the early state of ozonation, color of lignin solution increased as a result of quinonial structure formation by Darkin reaction. When the quinone was further oxidized, the color became decreased. COD of solution, on the other hand, was found to decrease progressively with time confirming the continual degradation of lignin molecules. It was also found that the lignin color functional groups were sensitive to ozonation and, thus, a direct proportionality of the amount of color removed on lignin concentration was observed. In addition, the efficiency of lignin solution discoloration was largely affected by interphase mass transfer which was governed by the intense of mixing and the extent of interfacial area. Consequently, in order to achieve higher lignin discoloration efficiency an application of static mixer is considered essential.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....  
Field of study.....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....  
Academic year...2005.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางในการทำวิจัย แนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างการทำวิจัย ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับปัจจุบันเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เดชา นัทรศิริเวช และ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่มีคุณค่า ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อน้ำ DI จำนวนมากที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณ กฤษณี ลิตติการตกุล และสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย สำหรับคำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชาคริต ทองอุไร และ อาจารย์ พัทธิญา แก้วแพง สำหรับข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา รวมถึงสมาชิกในครอบครัวที่เป็นกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไอโซน.....	4
2.1.1 คุณลักษณะของไอโซน.....	4
2.1.2 เสถียรภาพของไอโซน.....	6
2.1.3 การใช้ประโยชน์จากไอโซน.....	6
2.1.4 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการใช้งาน ไอโซน.....	6
2.1.5 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับไอโซน.....	7
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลิกนิน.....	9
2.2.1 โครงสร้างของลิกนิน.....	10
2.2.2 แนวคิดในการเปรียบเทียบโครงสร้างลิกนินในรูปแบบโครงสร้าง ฟีนิลโพรเพน โพลิเมอร์.....	10
2.2.3 ลักษณะการรวมตัวกันของพันธะระหว่างโมโนเมอร์ ในลิกนิน.....	12
2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของลิกนิน.....	14
2.3 ปฏิกริยาระหว่างไอโซน และลิกนิน.....	18
2.3.1 การเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันระหว่างไอโซนกับสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนในกลุ่ม- ฟีนอล.....	18



	หน้า
2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนในสารประกอบประเภทแอลดีไฮด์และแอลกอฮอล์.....	19
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาค.....	21
2.4.1 Two-Film theory.....	21
2.4.2 Henry's Law.....	22
2.5 การวิเคราะห์ลิกนิน.....	24
2.5.1 การวัดปริมาณสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยการใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี ( NCSI Method color 71.01,1999).....	24
2.5.2 การวิเคราะห์ Chemical oxygen Demand (COD).....	24
2.5.3 การวัดปริมาณ โอโซนในน้ำ.....	25
2.5.4 การวัดปริมาณ โอโซนในอากาศ.....	25
2.6 การกำจัดสีของลิกนินที่ละลายน้ำ.....	26
3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.3 สารเคมี.....	29
3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	33
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
4.1 มาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเทียบวัด.....	35
4.1.1 กระบวนการวัดสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยการใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (NCSI Method color 71.01,1999).....	35
4.1.2 การวิเคราะห์ Chemical Oxygen Demand (COD).....	36
4.2 กระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนิน โดยโอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor).....	39
4.2.1 ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน.....	40
4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายลิกนินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน.....	46
4.2.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซโอโซนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน.....	51



4.2.4 ผลของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายลิกนิน และก๊าซโอโซนต่อ ประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน.....	57
4.3 กระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวนาน (horizontal pipe).....	63
4.3.1 การศึกษาถึงการลดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อ แนวนานที่มี static mixer.....	63
4.3.2 การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของสารละลายลิกนินต่อการเปลี่ยน- แปลงสีของสารละลายลิกนิน.....	67
4.4 การนำไปประยุกต์.....	72
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ซีไอดี(COD).....	82
ภาคผนวก ค. การวัดปริมาณสีของน้ำเสียโรงงานกระดาษโดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโต มิเตอร์ (NCASI METHOD COLOR 71.01).....	97
ภาคผนวก ง. การวัดโอโซนในน้ำด้วยวิธี Indigo colorimetric.....	100
ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซ.....	105
ภาคผนวก ฉ. ผลการทดลอง.....	108
ภาคผนวก ช. ภาพอุปกรณ์ทดลอง.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โมเลกุลไอโซน.....	4
รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ภายในโมเลกุลไอโซน.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของโมเลกุลไอโซน.....	5
รูปที่ 2.4 กลไกการแตกตัวของไอโซนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน.....	9
รูปที่ 2.6 <i>Phenylpropane unit</i> .....	10
รูปที่ 2.7 อนุพันธ์ในกลุ่มของ <i>phenylpropane</i> จากการสลายตัวของลิกนิน .....	11
รูปที่ 2.8 อนุพันธ์ของลิกนินจากการสกัดเนื้อไม้ชนิดต่างๆ.....	12
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อระหว่างโมโนเมอร์ในลิกนินในลักษณะ <i>Ether linkages</i> .....	13
รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อระหว่างโมโนเมอร์ในลิกนินในลักษณะ <i>Carbon-to-Carbon Linkages</i> .....	13
รูปที่ 2.11 การดูดซึมแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตของ <i>Björkman</i> ลิกนินจาก <i>Thuja plicata</i> (เส้นทึบ) และ <i>Pice abies</i> (เส้นประ) ใน <i>methyl cellosolve</i> .....	15
รูปที่ 2.12 <i>Infrared absorption spectra of Brauns native and enzymically – liberated white Scots pine lignin</i> .....	16
รูปที่ 2.13 ผลของ <i>solubility parameter</i> และ <i>hydrogen-bonding capacity</i> ของ <i>kraft lignin</i> ที่สามารถละลายได้ในระบบตัวทำละลาย .....	17
รูปที่ 2.14 การออกซิเดชันโดยไอโซนของฟีนอล.....	19
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาของการออกซิเดชันของแอลดีไฮด์และคีโตน โดยไอโซน.....	20
รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงความเข้มข้น ( <i>Concentration Profile</i> ) ของการถ่ายเทมวลจาก ภูมิภาคก๊าซ ไปยังภูมิภาคของเหลวตามทฤษฎี <i>Two-Film</i> .....	21
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดคลอรีน, AOX, COD และ TOC กับ การใช้ไอโซน.....	27
รูปที่ 2.18 การลดปริมาณสีจากน้ำเสียโรงผลิตเยื่อ โดยใช้ไอโซน .....	28
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆในระบบท่อแนวระนาบที่ใช้ในการทดลอง.....	31
รูปที่ 3.2 ระบบท่อแนวระนาบที่ใช้ในการทดลอง.....	32
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงแนวทางในการทดลอง.....	34
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ( <i>absorbance</i> ) กับปริมาณสีที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตรในหน่วย PCU.....	36

รูปที่ 4.2	ลักษณะสีของสารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตหลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์ COD โดยเรียงจาก ความเข้มข้น COD จากน้อยไปมาก.....	37
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ COD.....	38
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากอากาศอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	40
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากอากาศอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	41
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	42
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	42
รูปที่ 4.8	การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนและ โครงสร้างอะโรมาติกแบบฟีนอลเกิดเป็นควิโนน.....	43
รูปที่ 4.9	<i>Lignin derived chromophoric and leucochromophoric structures and their associated absorbances.....</i>	43
รูปที่ 4.10	<i>UV-VIS spectra of the LCC model compound ozonated on the preparative scale for different times: curve 1, 0 min; curve 2, 10 min; curve 3, 30 min; curve 4, 5 h. The ozonated aqueous solutions were flushed with argon gas before UV analysis</i>	44
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง (absorbance) และความยาวคลื่น (wavelength) ของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนความเข้มข้น $9.016 \times 10^4$ ppm ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	45
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที.....	47

รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการใช้ 13.56 ลิตรต่อนาที.....	47
รูปที่ 4.14	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอดีที่ลดลงของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการใช้ 13.56 ลิตรต่อนาที.....	48
รูปที่ 4.15	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของค่าซีโอดีที่ลดลงของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการใช้ 13.56 ลิตรต่อนาที.....	48
รูปที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการใช้โอโซนของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการใช้ 13.56 ลิตรต่อนาที.....	50
รูปที่ 4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการใช้ต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการใช้ต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการใช้ต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการใช้ต่างๆ.....	53
รูปที่ 4.21	ลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการใช้ต่างๆ กัน.....	54
รูปที่ 4.22	ลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการใช้ต่างๆ กัน.....	55
รูปที่ 4.23	รูปแบบการไหลสองเฟสแบบต่างๆ ในท่อแนวตั้ง.....	55
รูปที่ 4.24	ขนาด และลักษณะของท่อ Teflon ที่นำมาใช้เป็น static mixer.....	57

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการป้อน 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer.....	58
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอคียของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการป้อน 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer.....	58
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่ลดได้ของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer.....	59
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอคียที่ลดได้ของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer.....	59
รูปที่ 4.29 ลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในคอลัมน์ที่ไม่บรรจุ static mixer และบรรจุ static mixer ที่อัตราการไหลก๊าซ 13.56 ลิตรต่อนาที.....	60
รูปที่ 4.30 ลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในคอลัมน์ที่มีการบรรจุ static mixer.....	61
รูปที่ 4.31 ลักษณะ static mixer ที่ใช้ในระบบท่อแนวระนาบ.....	63
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในน้ำกับระยะทางของท่อแนวระนาบ (ไม่คิดระยะทางท่อหมุนเวียน).....	64
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนในสารละลายลิกนินที่ทางเข้า และทางออกของระบบท่อแนวระนาบกับจำนวนรอบของการไหลวนของสารละลายลิกนิน.....	64
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินกับระยะทางของท่อแนวระนาบ (ไม่คิดระยะทางท่อหมุนเวียน).....	65
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งและแนวระนาบกับเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบ.....	66
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินที่อัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างก๊าซโอโซนต่อสารละลายลิกนินต่าง ๆ กัน กับจำนวนรอบของการไหลวนเข้าสู่ระบบ.....	68



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนินที่อัตรา ส่วนของอัตราการไหลระหว่างก๊าซไอโซนต่อสารละลายลิกนินต่างๆกัน กับ จำนวนรอบของการไหลวนเข้าสู่ระบบ.....	68
รูปที่ 4.38 ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนในระบบท่อแนวระนาบหลังผ่าน <i>static mixer</i> ที่สัดส่วนอัตราการไหลระหว่างก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.42, 0.52 และ 0.64.....	69
รูปที่ 4.39 ลักษณะของ <i>Lightnin static mixer</i> ที่ใช้ในการทดสอบ.....	70
รูปที่ 4.40 อิทธิพลอัตราการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง พองก๊าซ.....	71
รูปที่ 4.41 อิทธิพลอัตราการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล	71
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งและแนว ระนาบกับเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบ.....	72
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการลดสีในระบบท่อแนว ระนาบและระบบท่อแนวตั้ง กับปริมาณสี.....	73
รูปที่ ข. 1 เครื่องผลิตไอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	119
รูปที่ ข.2 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณไอโซนในอากาศ.....	119
รูปที่ ข.3 ระบบท่อแนวตั้งที่ใช้ในการทดลอง.....	120
รูปที่ ข.4 ระบบท่อแนวตั้งที่มีการบรรจุ <i>static mixer</i> .....	121
รูปที่ ข.5 <i>static mixer</i> ที่ใช้บรรจุในระบบท่อแนวตั้ง.....	122
รูปที่ ข.6 <i>static mixer</i> ที่ใช้บรรจุในระบบท่อแนวระนาบ.....	122
รูปที่ ข.7 ระบบท่อแนวระนาบที่ใช้ในการทดลอง.....	123

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อนุพันธ์ในกลุ่มของ <i>phenylpropane</i> จากการสลายตัวของลิกนิน.....	11
ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันในลิกนินที่พบในไม้ธรรมชาติ (per 100 C <sub>6</sub> C <sub>3</sub> units) .....	14
ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนและโอโซนตามกฎของเฮนรี.....	23
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KHP ปริมาณความเข้มข้น COD และค่า absorbance ที่ 600 nm.....	37
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารละลายลิกนินที่ใช้ในการทดลอง.....	46
ตารางที่ 4.3 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันหลักของลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน.....	50
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติและอัตราการป้อน โอโซนที่ใช้ในการทดลอง.....	51
ตารางที่ 4.5 อัตราการป้อนโอโซนและสารละลายลิกนินที่ใช้ในการทดลอง.....	67
ตารางที่ ข.1 ขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสม.....	91
ตารางที่ ข.2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม.....	92
ตารางที่ ฉ.1 ปริมาณสีและซีไอของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	109
ตารางที่ ฉ.2 ปริมาณสีและซีไอของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	109
ตารางที่ ฉ.3 ปริมาณสีและซีไอของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	110
ตารางที่ ฉ.4 ปริมาณสีและซีไอของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	110
ตารางที่ ฉ.5 ปริมาณสีและซีไอของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 4.9 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	111



## สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ จ.6	ปริมาณสีและซีไอคิของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	112
ตารางที่ จ.7	ปริมาณสีและซีไอคิของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 23.75 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง.....	113
ตารางที่ จ.8	ปริมาณสีและซีไอคิของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน ก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบ ท่อแนวตั้งที่ติดตั้ง stactic mixer.....	114
ตารางที่ จ.9	ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่ทางเข้า (A) และทางออก (B) ของระบบท่อแนว ระนาบ.....	115
ตารางที่ จ.10	ความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทางเข้า (A) และทางออก (B) ของระบบท่อแนวระนาบ.....	115
ตารางที่ จ.11	ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน โอโซน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ทางเข้า และทางออกของระบบท่อแนวระนาบ.....	116
ตารางที่ จ.12	ความเร็วในแต่ละเฟสและสัดส่วนของอัตราการไหลก๊าซต่อของเหลว.....	117
ตารางที่ จ.13	ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน โอโซน ที่อัตราการไหลก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.42.....	117
ตารางที่ จ.14	ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน โอโซน ที่อัตราการไหลก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.52.....	117
ตารางที่ จ.15	ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน โอโซน ที่อัตราการไหลก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.64.....	118

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา

เชื้อกระดาษ เป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมกระดาษ และเส้นใยเรยอน ซึ่งในระหว่างการผลิตเชื้อกระดาษในอุตสาหกรรมปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะใช้ไม้เป็นวัตถุดิบ โดยทำการกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยเซลลูโลสโดยการใช้สารเคมี การผลิตเชื้อกระดาษด้วยกรรมวิธีดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านก๊าซเสีย กากของเสีย และน้ำเสีย โดยเฉพาะทางด้านน้ำเสีย เนื่องจากในกระบวนการผลิตได้มีการใช้น้ำ และสารเคมีเป็นจำนวนมาก องค์ประกอบหลักของน้ำเสียจึงประกอบด้วยสารเคมี สารอินทรีย์ และสี ในขั้นตอนการผลิตสารเคมีส่วนหนึ่งจากการต้มเยื่อได้ถูกแยกและนำกลับไปใช้ใหม่ น้ำเสียที่เหลือโดยมากจากการล้างและฟอกเยื่อได้เข้าสู่กระบวนการบำบัด สิ่งที่เป็นปัญหาคือสีซึ่งมีองค์ประกอบหลักจากลิกนินที่เหลืออยู่ เนื่องจากวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัดสีในน้ำทิ้ง ยกตัวอย่างเช่น การกำจัดสีด้วยกระบวนการทางกายภาพโดยการกรองในระดับอัลตราฟิลเตรชัน แต่เนื่องจากโมเลกุลของสารมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้ประสิทธิภาพของการกรองต่ำ การใช้สารส้มในการตกตะกอน โมเลกุลของสี เป็นวิธีการที่ทำให้โมเลกุลของสีรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และสามารถแยกออกจากน้ำทิ้งได้ง่าย แต่การตกตะกอนที่ได้จะต้องนำมาผ่านการบำบัดด้วยวิธีจำเพาะและจำเป็นต้องใช้สารช่วยการตกตะกอนจำนวนมาก กระบวนการทางชีวภาพเป็นการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายโมเลกุลของสี โดยนำจุลินทรีย์มาตรึงในถังบำบัด แต่กระบวนการนี้มีข้อเสียคือ จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ในภาวะที่เหมาะสมเท่านั้น นอกจากนี้เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินมีความซับซ้อน และมีองค์ประกอบของโครงสร้างส่วนหนึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มอะโรมาติก ซึ่งยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และกระบวนการทางเคมีซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดโมเลกุลของสี การออกซิเดชันเป็นเทคนิคหนึ่ง que เริ่มนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดโมเลกุลของสีในน้ำทิ้ง เนื่องจากมีข้อดีคือหลังจากทำปฏิกิริยาแล้วสารที่นำมาทำการออกซิไดซ์จะกลายเป็นก๊าซออกซิเจนซึ่งสามารถปล่อยออกสู่บรรยากาศได้โดยไม่ต้องผ่านระบบบำบัดอีก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถแก้ปัญหาคือข้อจำกัดของกระบวนการอื่นๆที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะต้องคำนึงถึงสารที่จะนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยทั่วไปสารที่นิยมนำมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันมีหลายชนิดได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และก๊าซโอโซน การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีข้อเสียคือความยุ่งยากในการผลิตที่ต้องใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณมาก ก๊าซโอโซนสามารถผลิตได้ง่ายจากก๊าซ

ออกซิเจนที่มีในบรรยากาศ อีกทั้งยังสามารถใช้ได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านคุณภาพน้ำ ดังนั้นโอโซนจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อกำจัดสีที่ของลิกนินจากน้ำเสียโรงงานกระดาษ ซึ่งโอโซนมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับส่วนประกอบที่เป็นสี (color) และส่วนประกอบ AOX (absorbable organic halides) ในน้ำเสีย แต่มีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนักสำหรับการลดปริมาณ COD (chemical oxygen demand) และ TOC (total organic carbon) ซึ่งประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายประการเช่น ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ในกระบวนการ พื้นที่ผิวการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนและน้ำเสีย อัตราการไหลระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำเสีย และการไหลผสมย้อนกลับ (Backmixing) ของน้ำเสีย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีอื่นๆที่ป้อนมาในแต่ละครั้ง (batch) อีกด้วย [Hongde and Daniel, 1997]

ระบบท่อขนส่งในกระบวนการผลิต และค่าเสียของโรงผลิตเชื้อส่วนใหญ่จะมีลักษณะการติดตั้งท่อในแนวระนาบ ในการนำโอโซนไปประยุกต์ใช้กับระบบท่อขนส่งน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตเชื้อกระดาษเพื่อกำจัดสีในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อ จึงจำเป็นต้องพิจารณาระบบการไหลในแนวระนาบ ซึ่งยังไม่พบการศึกษาการใช้งานโอโซนเพื่อใช้ในกระบวนการกำจัดสีจากลิกนินในระบบการไหลลักษณะนี้ การศึกษาลักษณะการแพร่ของโอโซน และกระบวนการกำจัดสีจากในแนวระนาบจึงเป็นระบบที่น่าสนใจศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำโอโซนไปประยุกต์ใช้กำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเชื้อต่อไป

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีของสารละลายลิกนิน โดยใช้โอโซนในท่อแนวระนาบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการกำจัดสีของสารละลายลิกนินด้วยโอโซนในท่อแนวระนาบภายในห้องปฏิบัติการวิจัยโดยพิจารณาการไหลในท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.27 เซนติเมตร ในช่วงระยะทางการไหลไม่เกิน 5.2 เมตร โดยปรับเปลี่ยนสภาวะของการศึกษา ดังนี้

1. อัตราการไหลของน้ำระหว่าง 20 ถึง 32 ลิตรต่อนาที
2. สัดส่วนอัตราการไหลของน้ำต่อก๊าซระหว่างร้อยละ 42 ถึง 64
3. ความเข้มข้นของโอโซนในก๊าซระหว่างร้อยละ 0.1 ถึง 10
4. ความเข้มข้นของลิกนินในสารละลายระหว่าง 100-200 มิลลิกรัมต่อลิตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสีจากสารละลายลิกนิน โดยการใช้โอโซน
2. เข้าใจประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสารละลายลิกนิน โดยการใช้โอโซนในระบบท่อแนวระนาบ
3. ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิจัยเชิงประยุกต์ในการใช้โอโซนเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบในน้ำ

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานของโอโซนและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. วิเคราะห์หาวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณลิกนินที่ละลายอยู่ในน้ำ
3. วิเคราะห์หาวิธีการที่เหมาะสมในวิเคราะห์ปริมาณสีของสารละลาย
4. ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเกิดปฏิกิริยากำจัดสีจากสารละลายลิกนิน โดยการใช้โอโซนในระบบท่อแนวระนาบ
5. วิเคราะห์ผลการวิจัย
6. สรุปผลงานวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โอโซน (ozone)

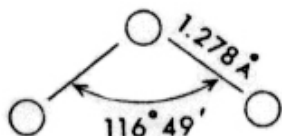
โอโซน ( $O_3$ ) ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนซึ่งถูกปรับโครงสร้างให้มีพลังงานสูงขึ้น เมื่อก๊าซโอโซนถูกอัดให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นจะเป็นก๊าซที่มีสีน้ำเงินสามารถมองเห็นได้ชัดเจน โอโซนมีแนวโน้มจะสลายตัวเองกลายเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน ทำให้ไม่สามารถผลิตก๊าซโอโซนให้มีความหนาแน่นสูงหรือเก็บไว้นาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องทำการผลิต ก๊าซโอโซน ณ แหล่งที่จะใช้งานนั้นเลย

โอโซนเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดี เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาทีฟออกซิเดชันโพเทนเชียล (electronegative oxidation potential) ที่สูงมาก โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลสารอื่นๆ ได้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นกลุ่มฟังก์ชันของสารอินทรีย์เช่น โอลิฟินิก (olefinic) อะซิทิลเลนิค (acetylenic) พันธะคู่หรือพันธะสามระหว่างอะตอมคาร์บอน พันธะระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน พันธะระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนในโมเลกุลแอลกอฮอล์ (alcohols) อีเทอร์ (ethers) อัลดีไฮด์ (aldehydes) เอมีน (amines) หรือโมเลกุลสารจำพวกซัลไฟด์ (sulfides) ซัลโฟไซด์ (sulfoxides) ฟอสไฟด์ (phosphines) ฟอสไฟท์ (phosphites) รวมถึงพันธะระหว่างคาร์บอนกับโลหะต่างๆ [Evans, 1972]

นอกจากนี้แล้วโอโซนไม่เพียงแต่เป็นสารออกซิไดซ์ที่ดีเท่านั้น โอโซนยังถูกใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆ นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ในจุดประสงค์ที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การกำจัดสี การกำจัดกลิ่น การกำจัดคราบ การลดความขุ่น การกำจัดสารอินทรีย์ เป็นต้น [Gottschalk, 2000]

##### 2.1.1 คุณลักษณะของโอโซน

โอโซนคือก๊าซสีน้ำเงินอ่อนที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนสามอะตอมต่อเชื่อมกัน โดยมีมุมระหว่างพันธะทั้งสองข้าง  $116^{\circ}49'$  116 องศา 49 ลิปดา พันธะระหว่างอะตอมออกซิเจนมีความยาว 1.278 อังสตรอม และแสดงคุณสมบัติมีขั้วอ่อนๆ ดังรูปที่ 2.1



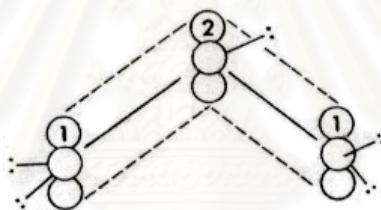
รูปที่ 2.1 โมเลกุลโอโซน [Gottschalk และคณะ, 2000]



อะตอมออกซิเจนสามอะตอมภายในโมเลกุลโอโซนจะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เรโซแนนซ์ (resonance) ดังรูปที่ 2.2 และสามารถเขียนภาพแสดงโครงสร้างโมเลกุลอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ภายใน โมเลกุล โอโซน [Gottschalk และคณะ, 2000]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของโมเลกุลโอโซน [Gottschalk และคณะ, 2000]

จากโครงสร้างโมเลกุลของโอโซนแสดงให้เห็นถึงความไม่มีเสถียรภาพ ดังจะเห็นได้จากค่าพลังงานการก่อเกิด (Energy of formation) ของโอโซนมีค่า 38.86 กิโลแคลอรี ต่อโมลเทียบกับก๊าซออกซิเจนที่มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่อุณหภูมิห้องโมเลกุลโอโซนสองโมเลกุลสามารถทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นก๊าซออกซิเจน

โอโซนบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวที่  $-192.5 \pm 0.4$  องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่  $-111.9 \pm 0.3$  องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ  $-112$  องศาเซลเซียส โอโซนจะควบแน่นเป็นของเหลวสีน้ำเงินเข้มที่มีคุณสมบัติระเบิดได้ง่าย ของผสมระหว่างโอโซนกับออกซิเจนทั้งในสภาวะของเหลว และก๊าซที่มีความเข้มข้นของโอโซนมากกว่าร้อยละ 20 ก็มีคุณสมบัติระเบิดได้เช่นเดียวกันเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยา แรงกระแทก ประกายไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน

### 2.1.2 เสถียรภาพของโอโซน

โอโซนในสถานะก๊าซจะมีครึ่งชีวิต (half life) ก่อนข้างนาน กล่าวคือประมาณ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อละลายอยู่ในของเหลวเวลาครึ่งชีวิตจะสั้นลงอย่างมาก มีการทดลองพบว่า โอโซนที่ละลายในน้ำกลั่นมีเวลาครึ่งชีวิตเพียงประมาณ 20 นาทีเท่านั้น และเมื่อความบริสุทธิ์ของน้ำลดลง เวลาครึ่งชีวิตของโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำก็จะยิ่งลดน้อยลง สาเหตุจากคุณสมบัติความไม่เสถียรของโอโซนที่ละลายในน้ำนี้เอง จึงทำให้ในการผลิตโอโซนไม่สามารถผลิตโอโซนแล้วเก็บไว้เป็นเวลานานๆ ได้ ต้องทำการผลิตและใช้งานในทันที

### 2.1.3 การใช้ประโยชน์จากโอโซน

โอโซนไม่เพียงแต่เป็นสารออกซิไดส์ที่ดีเท่านั้น โอโซนยังถูกใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆ นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้ในจุดประสงค์ที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น การกำจัดสี การกำจัดกลิ่น การกำจัดคราบ การลดความขุ่น การกำจัดสารอินทรีย์ เป็นต้น

#### ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ก๊าซโอโซนกระบวนการต่างๆ

- บำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ
- บำบัดน้ำดื่มและน้ำที่ใช้งานในระบบต่างๆ
- บำบัดน้ำแร่
- บำบัดน้ำเสีย
- ควบคุมกลิ่นเหม็น
- ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันในอุตสาหกรรมเคมี
- การบำบัดน้ำสำหรับฟาร์มเลี้ยงปลา
- การบำบัดน้ำในอ่างเก็บน้ำ

### 2.1.4 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการใช้งานโอโซน

ในกระบวนการผลิตโอโซน จะมีปฏิกิริยาอื่น ๆ นอกเหนือจากปฏิกิริยาหลักเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น

- ก. ก๊าซไนโตรเจนจะสามารถทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนพลังงานสูงเกิดเป็นออกไซด์ของไนโตรเจน ดังนั้นเพื่อให้ได้โอโซนความเข้มข้นสูง จึงควรใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ป้อนให้กับเครื่องผลิตโอโซน
- ข. ไอน้ำในอากาศจะรบกวนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงควรทำให้ก๊าซที่ป้อนเข้าเครื่องผลิตโอโซนปราศจากความชื้น



ข้อจำกัดที่สำคัญของการใช้งานโอโซนก็คือในการใช้งานโอโซนต้องทำการผลิตเพื่อนำมาใช้งานในทันที ไม่สามารถผลิตมาเก็บไว้ได้เป็นเวลานาน เนื่องจากโอโซนสามารถสลายตัวได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการสลายตัวของโอโซน ดังนี้

- ก. โอโซนจะมีอัตราการสลายตัวเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงควรใช้ก๊าซเย็นป้อนเข้าระบบเพื่อช่วยควบคุมระบบไม่ให้มีอุณหภูมิสูงเมื่อเกิดปฏิกิริยา
- ข. โอโซนจะสามารถสลายตัวได้เมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอน ดังนั้นในการผลิตโอโซนด้วยวิธีอิเล็กโตรไลติกจึงต้องจำกัดพลังงานที่ให้กับขั้วไฟฟ้า
- ค. จากปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน นอกเหนือจากโอโซนจะสลายตัวเมื่อโมเลกุลโอโซนชนกันเองแล้ว โอโซนยังอาจสลายตัวเมื่อชนกับอะตอมออกซิเจน ซึ่งส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตได้มีค่าจำกัด
- ง. เนื่องจากโอโซนเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ดังนั้นโอโซนอาจออกซิไดซ์กับสารใดๆที่อยู่ในระบบ ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุจึงต้องเลือกวัสดุที่มีความสามารถทนต่อการถูกออกซิไดซ์ได้ดี

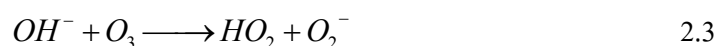
### 2.1.5 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับโอโซน

การผลิตโอโซนด้วยวิธีโฟโตเคมีคอลเป็นการปล่อยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศที่มีก๊าซออกซิเจนผ่านแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ตเปรียบเหมือนการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์มายังโลกซึ่งก่อให้เกิดโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโทเฟียร์ ปฏิกิริยาแสดงการเกิดโอโซนสามารถแสดงได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



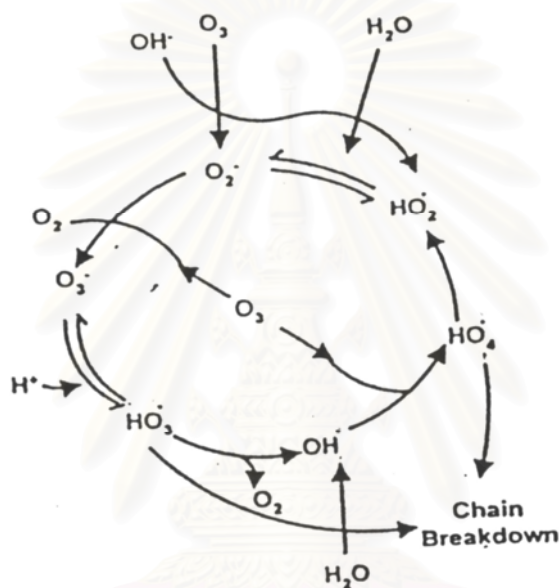
โอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำมีความไม่เสถียรอย่างยิ่ง โอโซนส่วนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารที่อยู่ในน้ำ และอีกส่วนหนึ่งจะสลายตัว การสลายตัวของโอโซนเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องที่มีความซับซ้อนที่ก่อให้เกิดสารประกอบอีกหลายชนิด การสลายตัวอาจเกิดขึ้นจากสารที่อยู่ในน้ำ เช่น ไฮดรอกซิลของไฮดรอกไซด์ เกิดจากปฏิกิริยาการเติมโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือการถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

การสลายตัวของโอโซนที่มีสาเหตุจากการมีไฮดรอกซิล (อันเนื่องมาจากความเป็นด่างสูง) มีกลไกดังสมการ





ปฏิกิริยาดังกล่าวประกอบด้วยกลไกที่ต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่อันเนื่องมาจาก ไฮโดรเปอร์ออกซิลเรดิคัล (hydroperoxyl radical, HO<sub>2</sub>) และซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเริ่มต้นในสมการ 2.3



รูปที่ 2.4 กลไกการแตกตัวของโอโซนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ อัตราการสลายตัวของโอโซนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ปริมาณสารอินทรีย์ รวมถึงความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต (bicarbonate) และคาร์บอเนต (carbonate) ไบคาร์บอเนตและคาร์บอเนตจะเพิ่มช่วงอายุ (life time) ของโอโซนโดยการเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical, OH) ดังสมการ

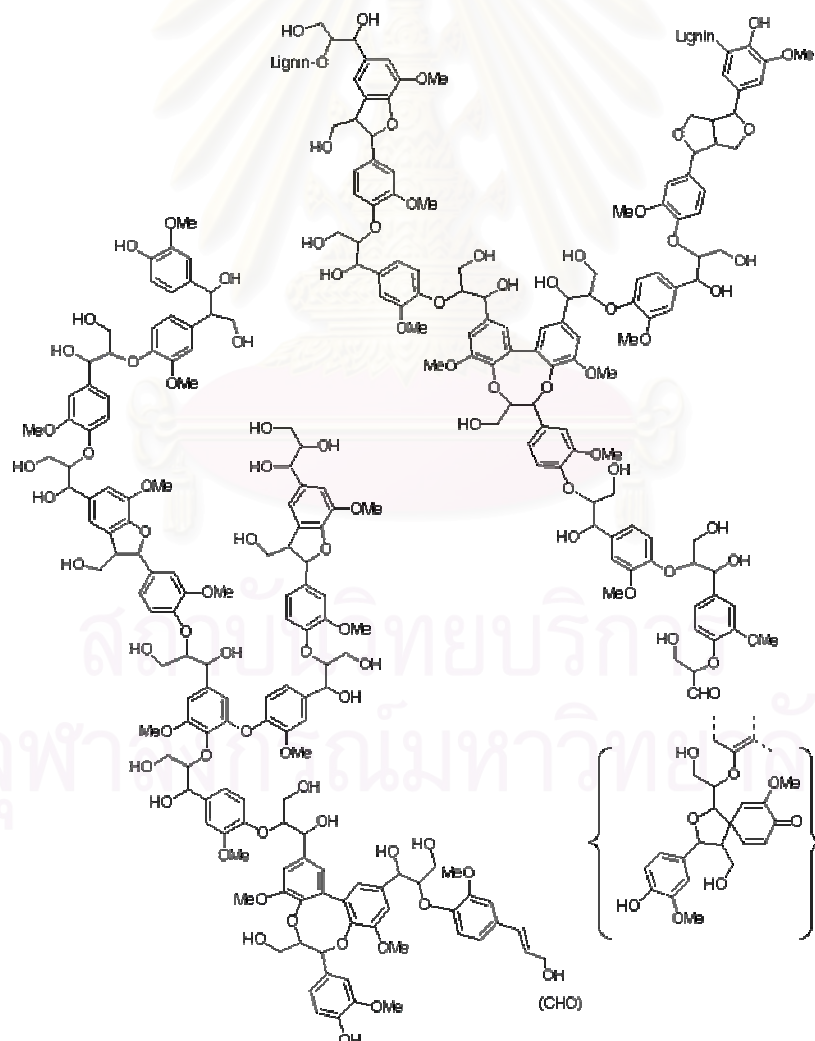


ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกลไกลูกโซ่ในสมการ 2.3 ถึง 2.4

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลิกนิน (Lignin)

เนื้อไม้แห้งจะประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน ฮีมิเซลลูโลส (hemicelluloses) เป็นองค์ประกอบหลัก และจะมีส่วนประกอบย่อยเป็นแร่ธาตุ และอื่น อีกร้อยละ 5 ถึง 10 เซลลูโลสจะมีองค์ประกอบอยู่ในปริมาณประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักไม้ ในระหว่างการเจริญเติบโตของต้นไม้ เซลลูโลสจะมีการเรียงตัวในลักษณะที่เรียกว่า fibrils ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นเป็นลักษณะผนังเซลล์ของเส้นใยเนื้อไม้ เซลลูโลสมีคุณค่าทางการค้าสูงสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นกระดาษ โดยต้องมีการนำเนื้อไม้มาผ่านกระบวนการขจัดลิกนินออกเพื่อให้มีการแผ่กระจายตัวของเส้นใย และทำให้กระดาษที่ได้มีสีอ่อนลง

ในไม้เนื้ออ่อนจะมีองค์ประกอบของลิกนินประมาณร้อยละ 23 ถึง 33 ของน้ำหนัก ส่วนในไม้เนื้อแข็งจะมีประมาณร้อยละ 16 ถึง 25 ของน้ำหนัก โดยลิกนินจะมีการกระจายอยู่ทั่วไป บริเวณผนังเซลล์ และบริเวณระหว่างเซลล์



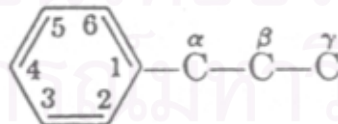
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนินในไม้เนื้ออ่อน [Sarkanen และคณะ, 1971]

### 2.2.1 โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินธรรมชาติซึ่งสกัดได้จากพืชชนิดต่างๆ ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายอนุพันธ์มารวมกันเป็นลักษณะโครงสร้างโพลีเมอร์แบบไม่มีผลึก ในการศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของลิกนินนั้นพบว่า ลิกนินจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดเท่านั้น และลิกนินจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และโครงสร้างเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากคุณสมบัติของลิกนินข้างต้น ส่งผลให้การศึกษาโครงสร้างของลิกนินเป็นไปอย่างยากลำบาก นอกจากนี้ในการทำวิเคราะห์โครงสร้างของลิกนิน ลิกนินอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิม และจากความแตกต่างของพฤติกรรมเคมีของลิกนิน และสารที่นำมาใช้เป็นแบบจำลองในการเปรียบเทียบโครงสร้าง ทำให้การศึกษาโครงสร้างของลิกนินจึงทำได้เพียงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างในเบื้องต้นเท่านั้น

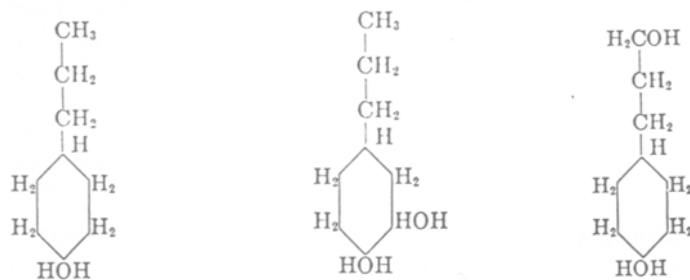
### 2.2.2 แนวคิดในการเปรียบเทียบโครงสร้างลิกนินในรูปแบบโครงสร้างฟีนิลโพรเพนโพลีเมอร์ (phenylpropane polymer)

ลิกนินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกโดยธรรมชาติ ซึ่งได้มีการยืนยันแนวคิดจากงานวิจัยของ Lang [Adler และคณะ, 1956] จากการทดลองโดยการนำลิกนินที่ได้จากการสกัดต้นสนชนิด Spruce มาทำการตรวจสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นระดับอัลตราไวโอเลต พบว่ามีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่เหมือนกับแบบจำลองโครงสร้างเคมีของ guaiacylpropane และนอกจากนั้น จากงานวิจัยของ Purves และคณะ [Ritchie และคณะ, 1947] ได้มีการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบเคมีจากลิกนินที่ได้จากการสกัดจากเนื้อไม้ และ holocellulose ของสับปะรด และไม้สนชนิด Spruce องค์ประกอบที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 67.5 และ 6 ตามลำดับซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในสารประกอบอะโรมาติก

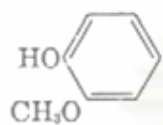


รูปที่ 2.6 Phenylpropane unit [Lin และ Dence, 1992]

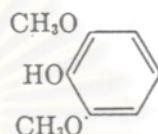
ในการศึกษาโครงสร้างลิกนินในรูปแบบ phenylpropane polymer (รูปที่ 2.6) นั้น ได้มีงานวิจัยการแยกอนุพันธ์องค์ประกอบภายในลิกนินจากหลายวิธี โดยมีผู้ให้ความสนใจ และมีผลงานวิจัยออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งได้มีแบบจำลองโครงสร้างอนุพันธ์เป็นจำนวนมากดังรูป 2.7



propylcyclohexane derivatives



guaiacylpropane



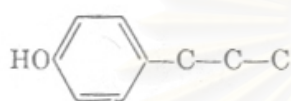
syringylpropane

รูปที่ 2.7 อนุพันธ์ในกลุ่มของ *phenylpropane* จากการสลายตัวของลิกนิน [Harris และคณะ, 1938]

ตารางที่ 2.1 อนุพันธ์ในกลุ่มของ *phenylpropane* จากการสลายตัวของลิกนิน

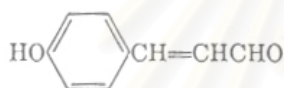
โครงสร้าง	งานวิจัย
Guaiacyl-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> OH Syringyl-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> OH Syringyl-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	[Brewer และคณะ, 1948]
Guaiacyl-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -CH <sub>3</sub>	[Phillips และคณะ, 1932]
Guaiacyl-CH <sub>2</sub> -CHOH-CH <sub>3</sub>	[Shorygina , 1955]
Guaiacyl-CO-CH(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )-CH <sub>3</sub> Guaiacyl-CH(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )-CO-CH <sub>3</sub> Guaiacyl-CO-CO-CH <sub>3</sub> Guaiacyl-CH <sub>2</sub> -CO-CH <sub>3</sub>	[West และคณะ, 1943]
Syringyl-CO-CH(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )-CH <sub>3</sub> Syringyl-CO-CO-CH <sub>3</sub> Syringyl-CH <sub>2</sub> -CO-CH <sub>3</sub>	[Macinnes และคณะ, 1943]

จากงานวิจัยลิกนินที่สกัดได้จากไม้เนื้อแข็ง (angiosperm) จะมีองค์ประกอบของอนุพันธ์ที่ประกอบด้วยโครงสร้างทั้ง guaiacylpropane และ syringylpropane ซึ่งมีความน่าสนใจมากสำหรับกลไกการรวมโครงสร้างขึ้นเป็นโครงสร้างของลิกนิน และได้มีการตั้งสมมุติฐานขึ้นว่าลิกนินที่ได้จากการสกัดไม้เนื้อแข็งอาจประกอบด้วยโครงสร้างของทั้ง guaiacylpropane และ syringylpropane monomers แต่ในทางกลับกันได้มีการตั้งสมมุติฐานแย้งว่า monomers ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างลิกนิน ได้รวมตัวกันเป็นโครงสร้าง guaiacylpropane และ syringylpropane นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยในการหาอนุพันธ์ของลิกนินจากการสกัดเนื้อไม้ชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 2.8



p – Hydroxyphenylpropane unit

[Lin และ Dence, 1992]



p – coumaraldehyde [Goldschmid, 1955]



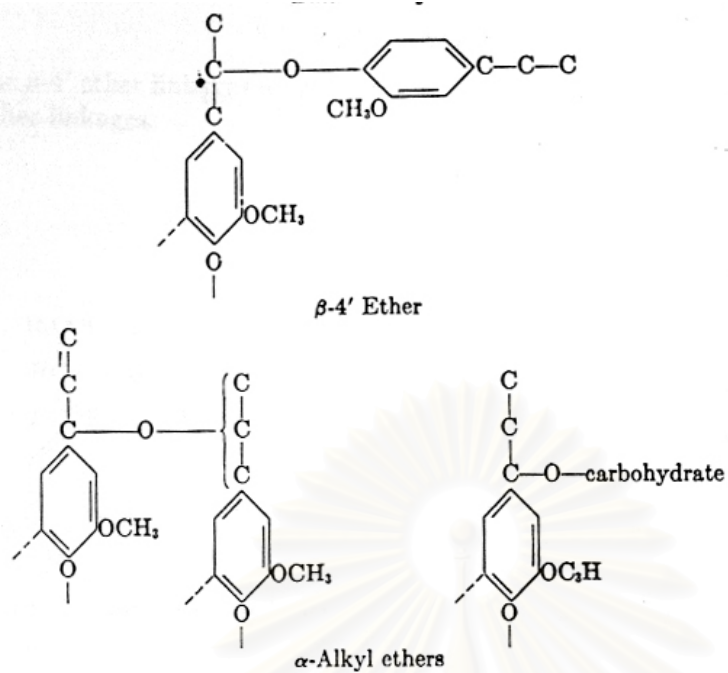
p – hydroxybenzaldehyde [Leopold, 1952]

รูปที่ 2.8 อนุพันธ์ของลิกนินจากการสกัดเนื้อไม้ชนิดต่างๆ

### 2.2.3 ลักษณะการรวมตัวกันของพันธะระหว่างโมโนเมอร์ (monomer) ในลิกนิน

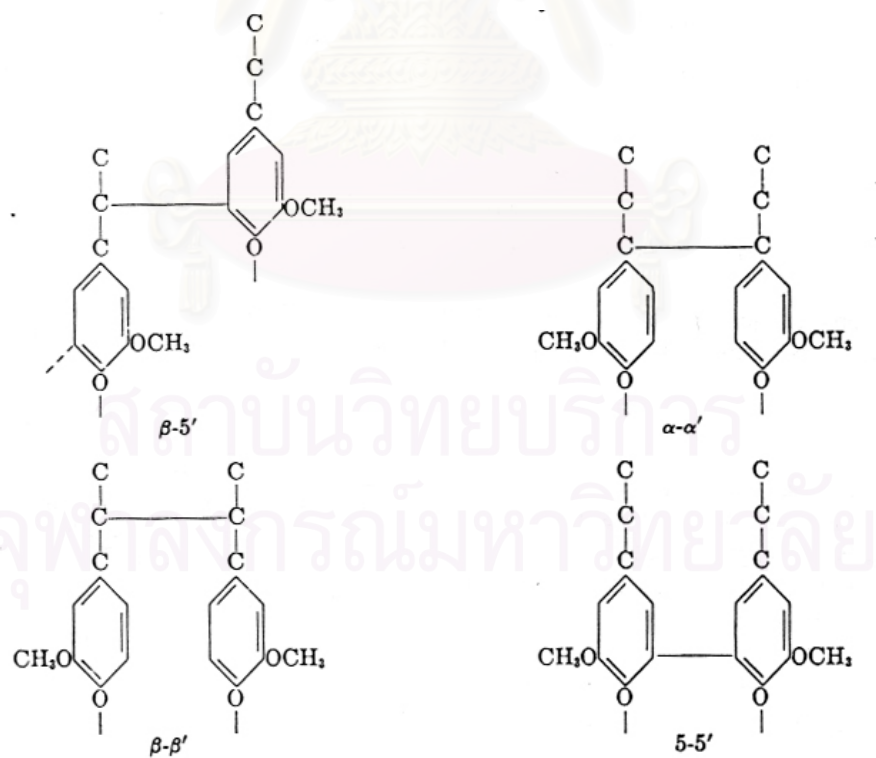
ในโมเลกุลของลิกนิน โมโนเมอร์ริกของฟีนิลโพรเพนจะมีการเชื่อมต่อระหว่างหน่วยในรูปแบบอีเทอร์ (ether) และคาร์บอน-คาร์บอน (carbon-to-carbon linkages) ส่งผลให้เป็นอุปสรรคในกระบวนการย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงจากระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและการย่อยสลายทางเคมี จากรูป 2.9 และรูป 2.10 แสดงให้เห็นถึงธรรมชาติของการเชื่อมต่อโครงสร้างโมโนเมอร์ภายในลิกนิน





รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อระหว่างโมโนเมอร์ในลิกนินในลักษณะ Ether linkages

[Lin และ Dence, 1992]



รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อระหว่างโมโนเมอร์ในลิกนินในลักษณะ Carbon-to-Carbon linkages

[Lin และ Dence, 1992]



ในลิกนินจะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบอยู่อย่างหลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด และสายพันธุ์ของต้นไม้ที่ใช้ในการทดสอบ (โดยทั่วไปจะมีปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พบมากดังแสดงในตารางที่ 2.2) ในลิกนินพอลิเมอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยวงกลุ่มฟีนอลิกไฮดรอกซิลจับตัวกับกลุ่มฟีนิล โพร-เพนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างลิกนิน กลุ่มแอลิฟาติกไฮดรอกซิลซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นลิกนินได้จากกระบวนการ biosynthesis และกลุ่มเมทอกซิลกับกลุ่มคาร์บอนิล ส่วนใหญ่จะเชื่อมต่ออยู่บริเวณรอบๆ ลิกนินพอลิเมอร์

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของหมู่ฟังก์ชันในลิกนินที่พบในไม้ธรรมชาติ (per 100 C<sub>6</sub>C<sub>3</sub> units)

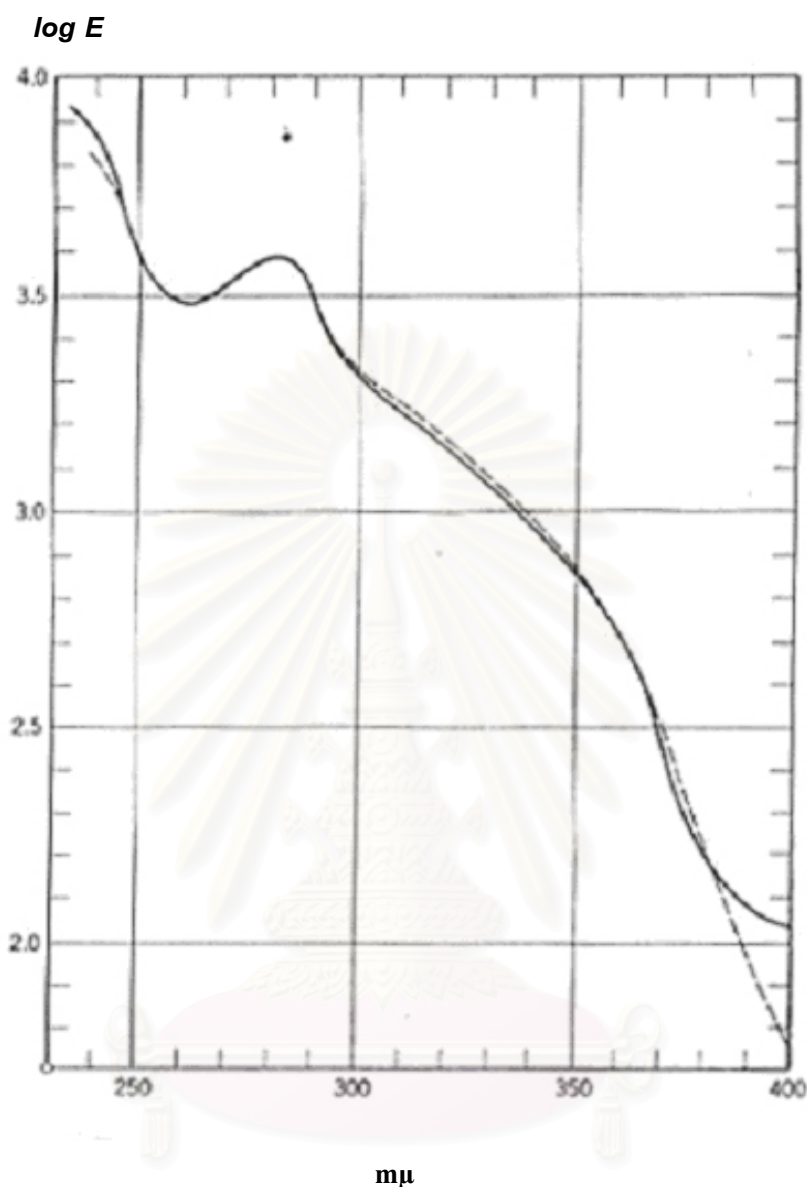
[Tappi, 2000]

Functional group	Softwood lignin	Hardwood lignin
Phenolic hydroxyl	20-30	10-20
Aliphatic hydroxyl	115-120	110-115
Methoxyl	90-95	140-160
Carbonyl	20	15

#### 2.2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของลิกนิน

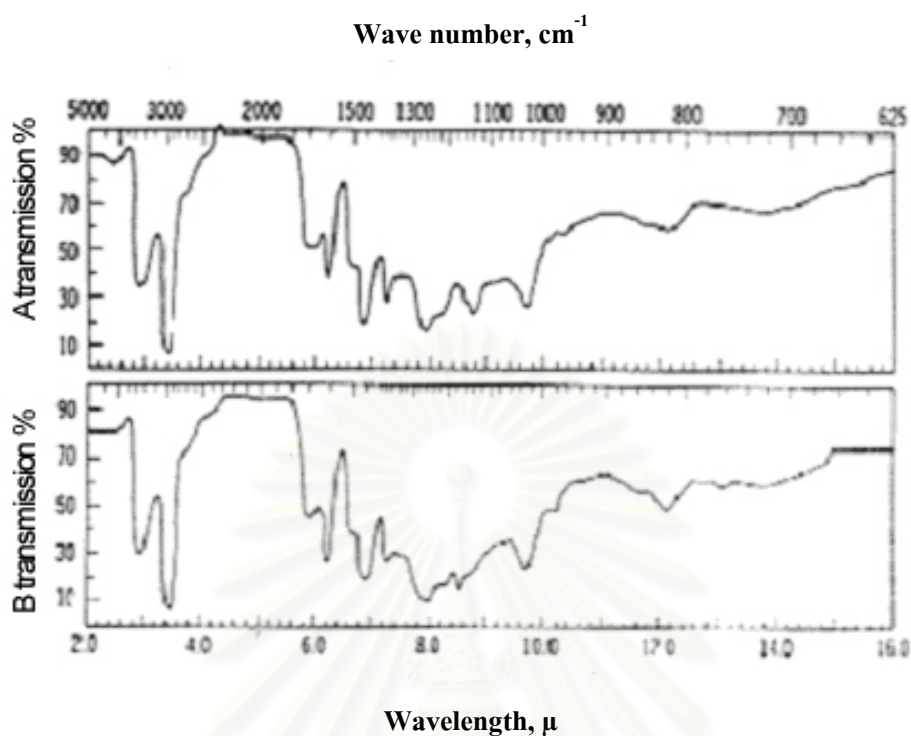
ลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่ภายในเนื้อไม้ในชั้น middle lamella และจะค่อยๆ ลดปริมาณลงเรื่อยๆ ตามชั้น lumina ภายในเซลล์ จากงานวิจัย [Baliey, 1936] พบว่าในส่วน middle lamella ของเนื้อไม้สนชนิด Douglas-fir มีปริมาณลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 71 และมีปริมาณ pentosans ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 14 จากการตรวจสอบการวัดค่าดัชนีการหักเห (refractive index) โดยพิจารณาการดูดกลืนของแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) พบว่าภายในลิกนินจะประกอบด้วยโครงสร้างแบบอะโรมาติกโดยธรรมชาติ และจากการตรวจสอบโดยใช้การ X-ray พบว่าลิกนินมีรูปแบบโครงสร้างเป็นแบบไม่มีผลึก (amorphous) โครงสร้างของลิกนินจะมีลักษณะของการยึดพันธะคาร์บอนอะตอมแบบไม่สมมาตร (asymmetric carbon atoms)

การดูดกลืนแสงของลิกนินและอนุพันธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 โครงสร้างต่างๆ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงซึ่งกันและกัน การพิจารณาการจำแนกช่วงแถบความยาวคลื่นแสงที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันของลิกนินกับอนุพันธ์ pyrocatechol ฟังก์ชันจะมีการค้นพบในเวลาที่ผ่านไปไม่นานนัก [Herzog และ Hillmer, 1932] เช่น การแยกลิกนินในไม้เนื้อแข็งกับส่วนประกอบ pyrogallol การแยกช่วงแถบความยาวคลื่นแสงของลิกนินและอนุพันธ์ กับส่วนประกอบที่มีรูปแบบ guaiacyl model ได้มีการค้นพบโดย Aulin-Erdtman [1949]



รูปที่ 2.11 การดูดซึมแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตของ Björkman ลิกนินจาก *Thuja plicata* (เส้นทึบ) และ *Pice abies* (เส้นประ) ใน methyl cellosolve [Herzog และ Hillmer, 1932]

เมื่อลิกนินเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของการดูดกลืนแสงในระดับโมลาร์ (molar absorptivities on a methoxy basis) และสามารถสร้างความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นได้เป็น difference spectrum ซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญในการบ่งชี้ถึงธรรมชาติ และขอบเขตในการเกิดปฏิกิริยาของลิกนิน การแลกเปลี่ยนไอออนของกลุ่ม phenolic ในสารละลาย alkaline จะเปลี่ยนรูปแบบของคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกหมู่อนุพันธ์ต่างๆ ในลิกนินได้ [Aulin-Erdtman, 1956]

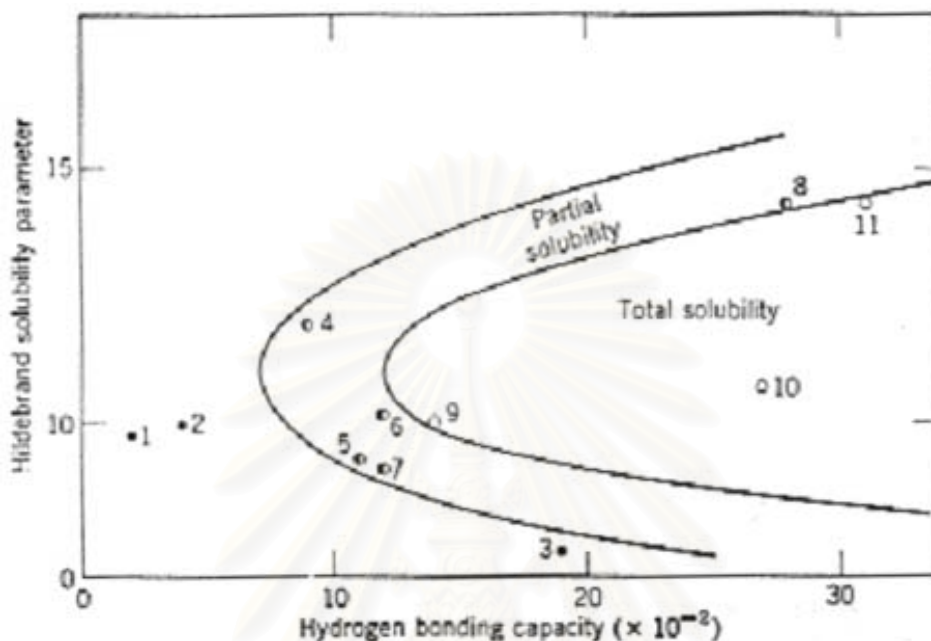


รูปที่ 2.12 Infrared absorption spectra of Brauns native and enzymically – liberated white Scots pine lignin [Nord และคณะ, 1957]

คุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดของลิกนินได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์จำแนกองค์ประกอบที่ปรากฏอยู่ในส่วนของโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก หมู่อะลิฟาติกอิ่มตัว (saturated aliphatic groups) หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และ กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl groups) [Jones, 1984] และจากคุณสมบัติได้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างการเตรียมลิกนิน และโครงสร้างของลิกนิน (รูปที่ 2.12)

คุณสมบัติการพองตัวและคุณสมบัติการละลายของลิกนินและอนุพันธ์ สามารถสร้างเป็นความสัมพันธ์ได้จากงานวิจัยของ Schuerch [1952] ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์จากการใช้คุณสมบัติเบื้องต้นของสารละลาย ในการดำเนินการจะมีปัจจัยที่สำคัญต่อระบบ 2 อย่างคือ solubility parameter [Hildebrand และคณะ, 1951] และ basic strength, hydrogen bonding capacity [Gordy, 1941] การเพิ่มความสามารถในการละลายหรือการพองตัวของลิกนินจะพิจารณาได้จาก basic strength เป็นอันดับแรก และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.13 จากกราฟของระบบสารละลายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Solubility parameter และ hydrogen bonding capacity ระบบสารละลายที่แสดงอยู่ในพื้นที่ parabolic จะสามารถละลายลิกนินที่ได้จากการเตรียมได้อย่างสมบูรณ์ โดยปกติลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะสามารถละลายใน

ตัวทำละลายได้ในช่วง Solubility parameter และ hydrogen bonding capacity กว้างกว่าลิกนินที่มีส่วนประกอบมวลโมเลกุลที่สูงกว่า



รูปที่ 2.13 ผลของ solubility parameter และ hydrogen-bonding capacity ของ kraft lignin ที่สามารถละลายได้ในระบบตัวทำละลาย [Schuerch, et al., 1952]

จากตัวอย่างที่สอดคล้องกับแนวคิดเบื้องต้น อะซิโตน (acetone) ไดออกเซน (dioxane) และพิริดีน (pyridine) ซึ่งตัวทำละลายที่ดีสำหรับลิกนินจะมีค่า  $\delta$ -value ระหว่าง 10.0 และ 10.7 และมี hydrogen bonding capacity สูง การใช้สารละลายไดออกเซน [Wedekine, 1933] หรือสารละลาย ฟีนอล [Clark และคณะ, 1944] เป็นตัวทำละลาย จะให้ค่าผลได้จากการละลาย organosolv lignin ที่สูง สำหรับตัวทำละลายอื่นๆนั้น เมทานอลและเอทานอลจะให้ค่าผลได้จากการใช้เป็นตัวทำละลายลิกนินที่ไม่สูงนักและไม่สามารถละลายลิกนินที่มีมวลโมเลกุลสูงๆได้ [Schuerch, 1951]

## 2.3 ปฏิกริยาระหว่างโอโซน และลิกนิน

### 2.3.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มฟีนอล (Phenol)

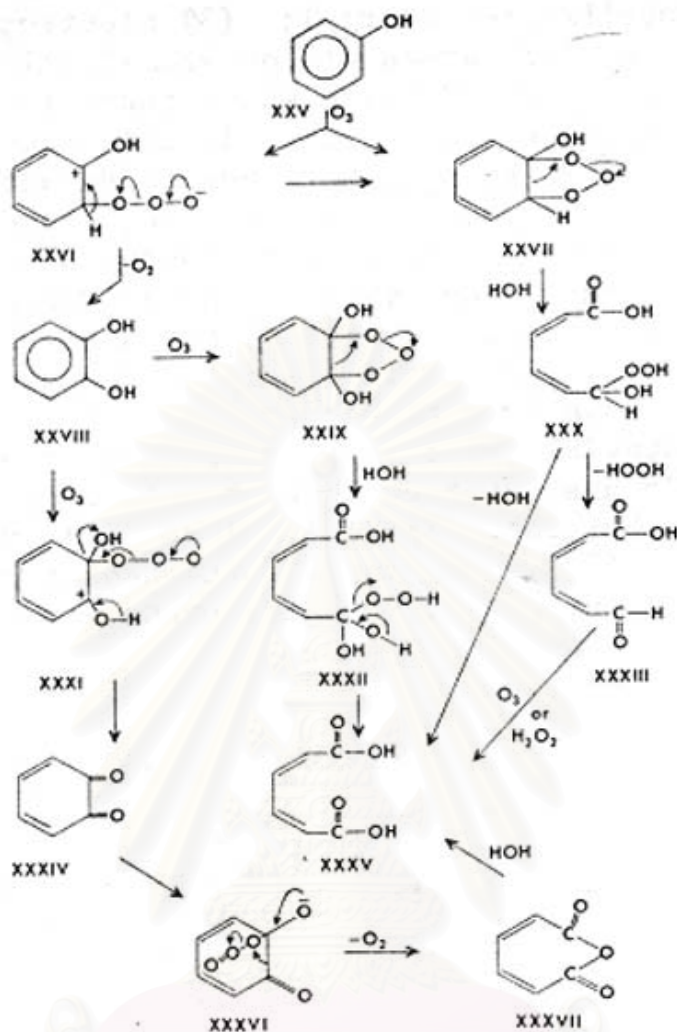
ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซโอโซนกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic) นั้น ฟีนอลสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโอโซนได้ดีกว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีส่วนประกอบของโครงสร้างพันธะอะโรมาติกชนิดอื่นๆ โดยฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก (formic acid) ไกลออกซอล (glyoxal) และกรดออกซาลิก (oxalic acid) [Bernatek, *et. al.*, 1961]

จากงานวิจัยของ Eisenhaure ในการศึกษาถึงรายละเอียดของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารละลายฟีนอลในน้ำ พบว่ามีสารเคทีโคล (catechol, XXVIII) และโอควินโนน (o-quinone, XXXIV) เกิดขึ้น ในระหว่างการทำปฏิกิริยา นอกจากนั้นยังอาจเกิด muconic acid, XXXV ซึ่งเป็นผลระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโอโซนที่ไม่เสถียรอีกด้วย

จากการศึกษาการสรุปผลงานวิจัย [Evans, 1972] พบว่าปฏิกิริยาหลักของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับฟีนอล (Phenol, XXV) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประเภทเคทีโคล (catechol, XXVIII) การเกิดปฏิกิริยาของอิเล็กโตรฟิลิกโอโซน (electrophilic ozone, XXVI) จะเกิดขึ้นดีกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะแบบวง (cyclic) [Eisenhaure, 01971] 1,3-Dipolar cycloaddition (XXVII) จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารเปอร์ออกซิดิก (peroxidic, XXX) จากนั้นก็จะเปลี่ยนโครงสร้างเป็น muconic acid, XXXV ได้โดยตรง หรืออาจมีการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกรดอัลดีไฮด์ (aldehydic acid, XXXIII) ก่อน แล้วจึงเปลี่ยนโครงสร้างเป็น muconic acid, XXXV

สำหรับปฏิกิริยาซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนของเคทีโคล (catechol, XXVIII) เป็น muconic acid, XXXV โดยผ่านการเปลี่ยนโครงสร้างจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นอโอควินโนน (o-quinone, XXXIV) จากปฏิกิริยานี้การเปลี่ยนโครงสร้างจากอโอควินโนน (o-quinone, XXXIV) เป็น muconic acid, XXXV มีขั้นตอนโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยา nucleophilic ozone attack (XXXVI) และการจัดเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Baeyer-Villiger type (XXXVI – XXXVII) ซึ่งเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของพันธะคู่ของควินโนน (quinone, XXXIV) ดังนั้นปฏิกิริยาการเปลี่ยนโครงสร้างจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนของเคทีโคล (catechol, XXVIII) เป็น muconic acid, XXXV โดยผ่านการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นอโอควินโนน (o-quinone, XXXIV) จึงถือเป็นปฏิกิริยารอง เมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนของเคทีโคล (catechol, XXVIII) เป็น muconic acid, XXXV ซึ่งมีลำดับคือ XXVIII – XXIX – XXXII – XXXV





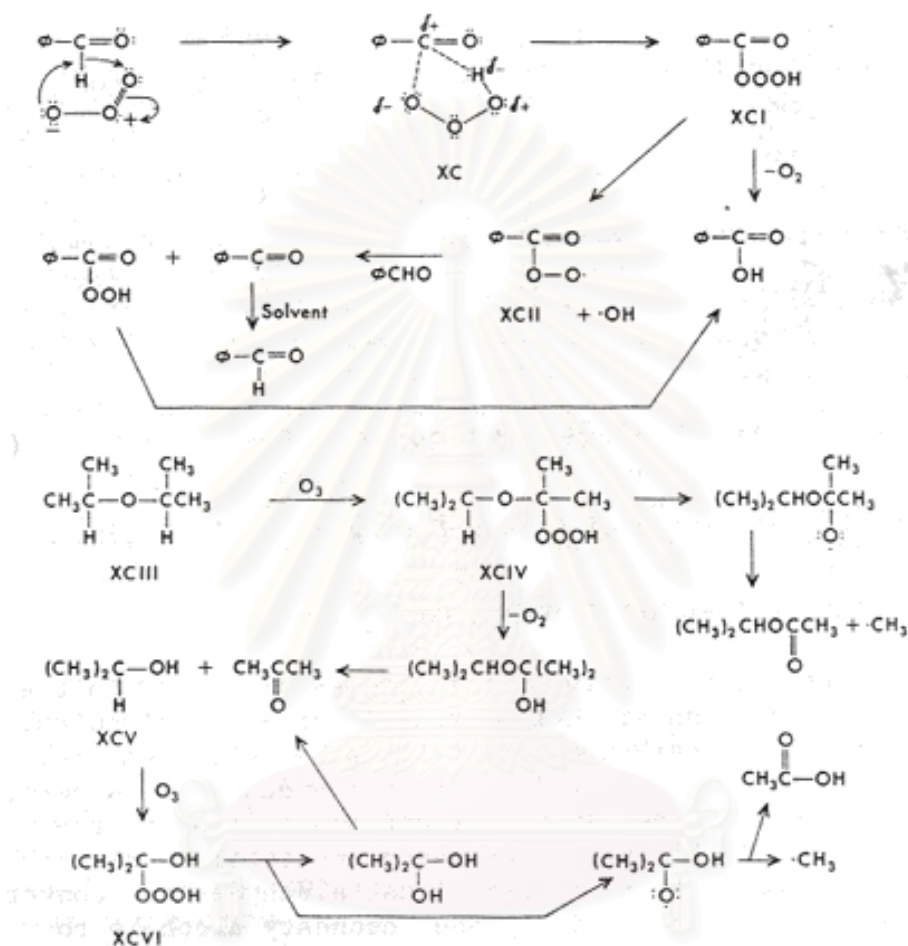
รูปที่ 2.14 การออกซิเดชันโดยโอโซนของฟีนอล

### 2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน

(carbon-hydrogen bond) ในสารประกอบประเภทแอลดีไฮด์ และแอลกอฮอล์

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซน กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบ จะเกิดขึ้นภายหลังการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอนในหมู่โครงสร้างอื่นๆ โดยสารประกอบในกลุ่มพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโอโซนได้แก่ สารประกอบในหมู่ แอลดีไฮด์ (aldehyde) [White และคณะ, 1968] [Erickson, และคณะ, 1966] [Syrov, และคณะ, 1970] แอลกอฮอล์ (alcohols) [White และคณะ, 1968] และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มี secondary และ tertiary carbon-hydrogen bond [Schubert และคณะ, 1956] [Hamilton และคณะ, 1968]

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนนั้น แอลดีไฮด์จะถูกออกซิไดซ์เป็นกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) primary และ secondary alcohols จะถูกออกซิไดซ์เป็นกรดคาร์บอกซิลิก แอลดีไฮด์ และคีโตน (ketone) นอกจากนี้ยังอาจออกซิไดซ์ได้เป็นแอลกอฮอล์และเอสเทอร์ (esters)



รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาของการออกซิเดชันของแอลดีไฮด์ และคีโตนโดยโอโซน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



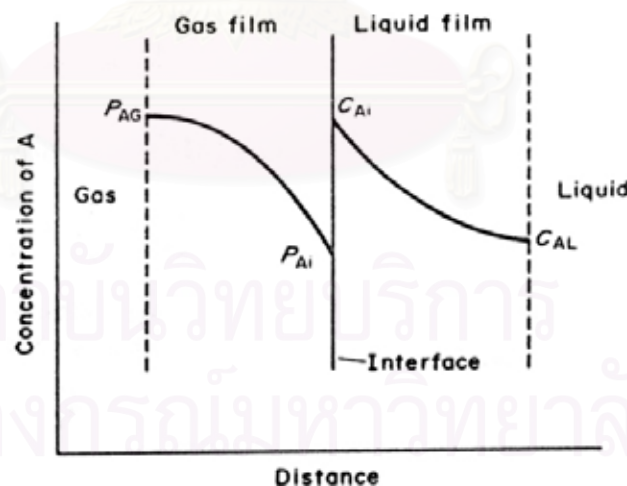
## 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสารระหว่างวัฏภาค

### 2.4.1 Two-Film theory

Two-Film หรือ Two-resistance เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลระหว่างวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลว การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวประกอบไปด้วยสามขั้นตอนหลักได้แก่ การถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังพื้นผิวสัมผัสระหว่างก๊าซ-ของเหลว การถ่ายเทข้ามวัฏภาคจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลว และการถ่ายเทจากพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคไปยังของเหลว ทฤษฎี Two-Film อยู่บนสมมุติฐานที่ว่า

- มีพื้นผิวบางๆ (ที่ต่อไปนี้จะเรียกพื้นผิวนี้อีกว่าแผ่นฟิล์ม) อยู่ระหว่างสองข้างของพื้นผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค (แผ่นฟิล์มก๊าซอยู่ในวัฏภาคก๊าซและแผ่นฟิล์มของเหลวอยู่ในวัฏภาคของเหลว) และอัตราการถ่ายเทมวลถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านแผ่นฟิล์มก๊าซและของเหลวดังกล่าว
- ความต้านทานของอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างพื้นผิวสัมผัสมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของอัตราการถ่ายเทมวลภายในแผ่นฟิล์ม

รูปที่ 2.16 แสดงการถ่ายเทมวลของสาร A จากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวโดยการแพร่ผ่านแผ่นฟิล์ม โดยอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าไม่มีความต้านทานระหว่างพื้นผิวสัมผัส  $P_{Ai}$  และ  $C_{Ai}$  คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของระบบ



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงความเข้มข้น (Concentration Profile) ของการถ่ายเทมวลจากวัฏภาคก๊าซไปยังวัฏภาคของเหลวตามทฤษฎี Two-Film

ที่สภาวะคงที่ (steady-state) ของการถ่ายเทของสาร A จากภายในวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลวสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$N_A = k_G(P_{AG} - P_{Ai}) \quad 2.11$$

$$N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) \quad 2.12$$

โดย  $k_G$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคก๊าซ  
 $k_L$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในวัฏภาคของเหลว  
 $P_{AG}$  = Partial Pressure ของก๊าซ A ในวัฏภาคก๊าซ  
 $C_{AL}$  = ความเข้มข้นของสาร A ในวัฏภาคของเหลว  
 $N_A$  = อัตราการถ่ายเทมวลของสาร A ต่อหน่วยพื้นที่

ซึ่งอัตราการถ่ายเทมวลของสาร A ผ่านชั้นฟิล์มก๊าซจะเท่ากับอัตราการถ่ายเทมวลผ่านชั้นฟิล์มของเหลว

$$N_A = k_G(P_{AG} - P_{Ai}) = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) \quad 2.13$$

สำหรับสารละลายเจือจาง (dilute liquid solution) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นในวัฏภาคก๊าซและวัฏภาคของเหลวที่ผิวสัมผัส ณ สภาวะสมดุลได้ด้วยกฎของเฮนรี

#### 2.4.2 Henry's Law

กฎของเฮนรีกล่าวว่า ที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณของก๊าซใดๆที่จะละลายลงในของเหลว ปริมาตรหนึ่งขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันไอ (partial pressure) ของก๊าซเหนือของเหลวนั้น ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$y = hx \quad 2.14$$

โดย  $y$  = ความดันไอ (partial pressure) ของก๊าซเหนือของเหลว (มิลลิเมตรปรอท)

$x$  = ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่สภาวะสมดุล

[โมลก๊าซต่อ(โมลก๊าซ+โมลของเหลว)]

$h$  = ค่าคงที่ของเฮนรี ซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ (มิลลิเมตรปรอทต่อสัดส่วน โมล)

จากกฎของเฮนรีสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลว กับความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลว ค่าคงที่ของเฮนรีที่น้อยแสดงถึงว่าก๊าซนั้นละลายลงในของเหลวได้มาก

ตัวแปรทั้งสามตัวดังกล่าวสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของความเข้มข้นได้ดังนี้

$Y$  = ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวที่สภาวะสมดุลกับก๊าซ  
ที่ละลายอยู่ในของเหลว (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$X$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลวที่สภาวะสมดุล  
กับก๊าซเหนือของเหลว (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$H$  = (มิลลิกรัมก๊าซต่อลิตรก๊าซ)/(มิลลิกรัมก๊าซต่อลิตรของเหลว)

เมื่อเปลี่ยนหน่วยค่าคงที่ของเฮนรีไปเป็นหน่วยของความเข้มข้น Venosa และ Opatken (1983) ได้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายในน้ำของออกซิเจนกับไอโซนที่อุณหภูมิ 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสามารถในการละลายน้ำของออกซิเจนและไอโซน ตามกฎของเฮนรี

[Rice และคณะ, 1986]

ก๊าซ	อุณหภูมิ (C°)	$H$ (มก.ก๊าซต่อลิตร อากาศ)/(มก.ก๊าซต่อ ลิตรน้ำ)	$Y$ (มก.ก๊าซต่อลิตร อากาศ)	$X$ (มก.ก๊าซต่อลิตร น้ำ)
ออกซิเจน (อากาศ)	0	20.4	299	14.6
	10	25.4	289	11.4
	20	29.9	279	9.3
	30	34.2	270	7.9
ไอโซน (ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก)	0	1.56	12.9	8.3
	10	1.86	12.5	6.7
	20	2.59	12.1	4.7
	30	3.80	11.7	3.1

ค่าคงที่ของเฮนรีเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น เพราะฉะนั้นค่าคงที่ของเฮนรีสำหรับก๊าซออกซิเจนในไม่ว่าจะมีความเข้มข้นร้อยละ 21 (ในอากาศ) ดังในตารางหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ก็จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากตารางที่ 2.3 จึงสรุปได้ว่าไอโซนมีความสามารถในการละลายในน้ำได้ดีกว่าออกซิเจนถึง 13 เท่า ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

## 2.5 การวิเคราะห์ลิกนิน

### 2.5.1 การวัดปริมาณสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรี (NCSI Method color 71.01,1999)

การวัดปริมาณสีของสารละลายลิกนิน (lignin) พิจารณาได้จากการวัดค่าการดูดกลืนของแสง (absorbance) ที่สามารถผ่านทะลุออกจากสารตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนของแสงที่ผ่านทะลุออกของสารละลายสี (colored solution) ที่ทราบค่าความเข้มข้นโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ซึ่งในการเตรียมตัวอย่างที่ทำการวัดนั้น ต้องมีการกรองตะกอนสารแขวนลอยที่เจือปนอยู่ออก เพื่อป้องกันการรบกวนการส่องผ่านของแสง และต้องมีการควบคุม pH ของสารตัวอย่างให้คงที่เท่ากันทุกครั้งก่อนการวัด เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของสารที่ทำการวัดในแต่ละตัวอย่าง

จากมาตรฐาน NCSI method color 71.01 ได้มีการใช้สารละลายแพลททินัมโคบอลต์ (Platinum cobalt stocks solution) เป็นตัวเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของสี โดยหน่วยที่ใช้คือ PCU ซึ่งมีค่าเท่ากับ ปริมาณ 1 มิลลิกรัมของแพลททินัมต่อสารละลายปริมาตร 1 ลิตร ในรูปแบบของคลอโรแพลททินเตไอออน (chloroplatinate ion)

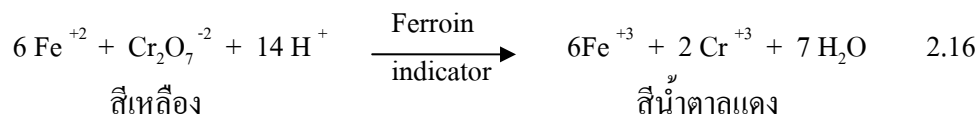
### 2.5.2 การวิเคราะห์ Chemical oxygen Demand (COD)

การวิเคราะห์หาซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสิ่งเจือปนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ในน้ำ ในกรณีที่สิ่งเจือปนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide, CO<sub>2</sub>) และน้ำ ส่วนกรดอะมิโนในโตรเจนก็จะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียในโตรเจน เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดีคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing Agent) อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง โดยมีสมการปฏิกิริยา คือ

1. เมื่อรีฟลักซ์ด้วย  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



## 2. หาปริมาณ $Cr^{+2}$ ที่เหลือโดยการไตเตรตด้วย FAS มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$Cr_2O_7^{-2}$  ที่เหลือจากการออกซิไดซ์ จะทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{+2}$  (FAS) ได้โครมิก ( $Cr^{+3}$ ) จนหมดแล้ว  $Fe^{+2}$  จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอิน ได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไตเตรต แล้วนำมาคำนวณเพื่อหาค่า COD ดังสมการ

$$\text{ซีไอดี, มิลลิกรัม } O_2 / \text{ลิตร} = \frac{(A-B) * N * 8000}{\text{มล. ตัวอย่างที่ใช้}} \quad 2.17$$

เมื่อ

$A =$  มล. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตแบลงค์

$B =$  มล. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง

$N =$  ความเข้มข้นของ FAS เป็นนอร์มัลลิตี

### 2.5.3 การวัดปริมาณโอโซนในน้ำ

การวัดปริมาณ โอโซนในน้ำทำได้โดยวิธีอินดิโก คาเลอริเมตริก (Indigo Colorimetric) โดยใช้หลักการที่ว่าในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด โอโซนจะทำให้สีของสารละลาย indigo หายไป โดยสีที่หายไปสามารถวัดได้ในรูปค่าการดูดกลืน (absorbance) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซน

### 2.5.4 การวัดปริมาณโอโซนในอากาศ

วิธีนี้จะวัดปริมาณความเข้มข้นของสารที่มีความสามารถออกซิไดซ์ทั้งหมด (total oxidant concentration) ในก๊าซตัวอย่างโดยการใส่สารละลายเป็นตัวดูดซึมและทำปฏิกิริยาสารละลายที่ใช้ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์

ในการวิเคราะห์จะผ่านก๊าซตัวอย่างเข้าไปสัมผัสกับสารละลายด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจะวัดปริมาณไอโอไดด์ (iodide) ที่เหลือในสารละลายเพื่อนำไปหาปริมาณสารที่ถูกออกซิไดซ์ได้ทั้งหมดในก๊าซตัวอย่าง

## 2.6 การกำจัดสีของลิกนินที่ละลายน้ำ

กระบวนการกำจัดสีของลิกนินที่ละลายน้ำมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี ในกระบวนการกำจัดสีทางกายภาพนั้นได้มีการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ลักษณะคือกระบวนการกำจัดสีโดยอาศัยการตกตะกอน และกระบวนการกำจัดสีโดยอาศัยการกรอง

จากงานวิจัยของ Dilek และ Bese [2001] ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการกำจัดสีจากโรงเยื่อโดยอาศัยการตกตะกอนจากการใช้สารส้ม (alum) และดินเหนียว (clay) โดยแบ่งตัวแปรในการทดลองคือ ชนิดของดิน (beige-sepiolites, brown-sepiolites, calcium-bentonites และ sodium-bentonites) ขนาดของเม็ดดิน และสัดส่วนระหว่างปริมาณของสารส้มกับปริมาณของดินเหนียว ซึ่งผลการทดลองพบว่ากระบวนการกำจัดสีจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีการสัดส่วนใช้สารส้มเป็นจำนวนมาก แต่จะมีตะกอนเกิดขึ้นในระบบเป็นจำนวนมากอีกด้วย จึงจำเป็นจะต้องมีกระบวนการแยก และกำจัดกากตะกอนเพิ่มขึ้น การใช้กระบวนการกำจัดสีโดยอาศัยการกรองนั้นจำเป็นต้องอาศัยแผ่นกรองที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและต้องมีการเพิ่มความดันให้แก่ระบบจึงอาจเกิดปัญหาการอุดตันของเยื่อกรองได้ [Wagner, 1981] โดยปกติจะทำการกรองในระดับอัลตราฟิวเตรชัน (ultrafiltration) ซึ่งในระหว่างการดำเนินกระบวนการจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและ pH ของน้ำเสียให้เหมาะสมกับชนิดของเยื่อกรองที่เลือกใช้

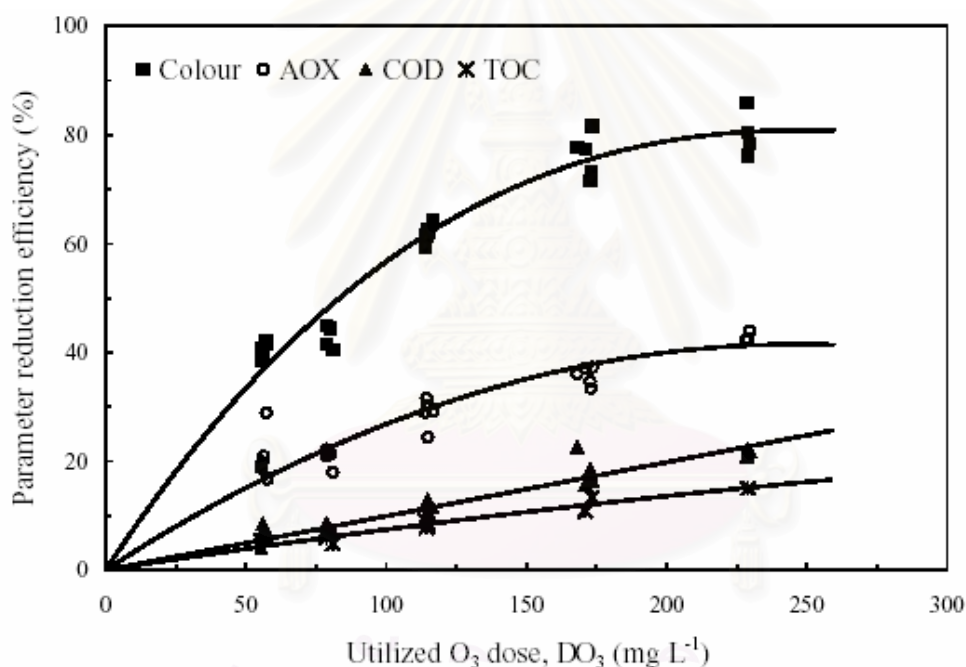
ในการกำจัดสีของลิกนินทางโดยอาศัยกระบวนการชีวภาพจะอาศัยแบคทีเรียและจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายโมเลกุลของสี ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องลดความเข้มข้น และปรับสภาพของน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดเพื่อป้องกันการเกิด shock load ซึ่งระบบกำจัดสีของลิกนินทางชีวภาพนั้นจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาและพื้นที่เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ระบบยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ต่ำอีกด้วย [Bryant และ Sierka, 1993]

จากงานวิจัยข้างต้น เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของลิกนิน [Browning, 1981] จึงส่งผลให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางกายภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อที่ไม่สูงนัก ดังนั้นการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาประยุกต์ใช้ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในที่นี่

จากงานวิจัยของ Zhou และ Smith [Hongde และ Daniel, 1997] ได้มีการนำน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศ aerated lagoon ของโรงผลิตเยื่อกระดาษมาผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยากับโอโซนทั้งในระดับ bench scale และ pilot scale โดยให้มีการสัมผัสกับฟองก๊าซละเอียด โดยพิจารณาถึงผลกระทบจากการขยายขนาดของ contactor ที่มีต่อประสิทธิภาพต่อกระบวนการใช้โอโซน แสดงได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดสี AOX (absorbable organic halides) และลักษณะคุณสมบัติอื่นๆของน้ำเสีย (รูปที่ 2.17) ประสิทธิภาพเนื่องจากการดูดซับโอโซนสามารถ

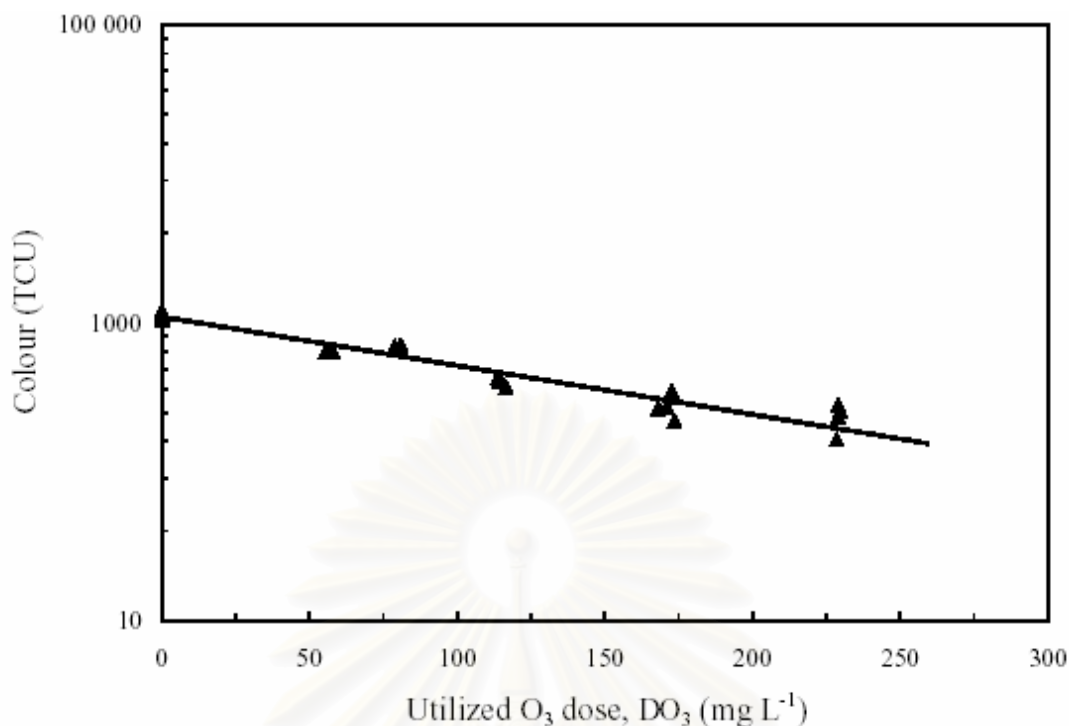


สังเกตได้จากปริมาณของโอโซนที่เหลือจากสถานะกระบวนการดำเนินการ (รูปที่ 2.18) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารทั้งหมด ( $K_L a$ ) และตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อการสลายตัวของโอโซนในการทำปฏิกิริยา (E) จากตามทฤษฎีนั้น สามารถประมาณได้จากการประยุกต์ตาม Two-film theory สำหรับ Irreversible Gas-Liquid reactor ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า โอโซนมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับส่วนประกอบที่เป็นสี (color) และส่วนประกอบ AOX ในน้ำเสียจากโรงผลิตเยื่อกระดาษ แต่มีประสิทธิภาพที่ไม่สูงนักสำหรับการลดปริมาณ COD และ TOC ซึ่งประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ พื้นที่ผิวการสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนและน้ำเสียจากโรงผลิตเยื่อกระดาษ อัตราการไหลของก๊าซโอโซนและน้ำเสีย และ Backmixing



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการลดสี, AOX, COD และ TOC กับการใช้โอโซน [El-Din และ Smith, 2002]

นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยากับโอโซนยังขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนประกอบที่อยู่ภายในน้ำเสียจากโรงผลิตเยื่อกระดาษ หากในการทดลองได้มีการเปลี่ยนส่วนประกอบของน้ำเสียจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารทั้งหมด ( $K_L a$ ) ในปฏิกิริยา [Zhou และ Smith, 1997]



รูปที่ 2.18 การลดปริมาณสีจากน้ำเสียโรงผลิตเยื่อโดยใช้โอโซน [El-Din and Smith, 2002]

ปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซนจะเปลี่ยนหมู่ฟีนิล (Phenyl groups) ในลิกนินที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียเป็นสารประกอบจำพวกคีโตน กรดอินทรีย์ และอัลดีไฮด์ เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ต่อไป [Hostachy และคณะ, 1997] จากงานวิจัยของ Freire [2001] ได้แบ่งการศึกษาถึงกระบวนการย่อยสลายของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อโดยใช้โอโซนออกเป็น 4 ระบบ ได้แก่ O<sub>3</sub>/pH3, O<sub>3</sub>/pH11, O<sub>3</sub>/pH11/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ O<sub>3</sub>/pH11/UV ซึ่งพิจารณาประสิทธิภาพของแต่ละระบบจากการลด Total Organic Carbon (TOC) ปริมาณฟีนอล ปริมาณสี และปริมาณสารพิษทั้งหมด จากการทดลองที่เวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน 90 นาที O<sub>3</sub>/pH11/UV จะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสีได้สูงที่สุด (ร้อยละ 45) ปฏิกิริยาที่ใช้ O<sub>3</sub>/pH11, O<sub>3</sub>/pH11/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ O<sub>3</sub>/pH11/UV จะสามารถลดปริมาณฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ร้อยละ 90) O<sub>3</sub>/pH11 และ O<sub>3</sub>/pH11/UV จะมีประสิทธิภาพในการลดสารพิษที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย แต่โอโซนจะมีประสิทธิภาพต่ำในกระบวนการลด TOC นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมสูงกว่าการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง และสำหรับการศึกษาโดยยึดตามหลักเศรษฐศาสตร์สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการบำบัดโดยอาศัยโอโซนในสถานะที่เป็นเบส (O<sub>3</sub>/pH11) นั้นจะมีประสิทธิผลสูงที่สุด

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายลิกนิน สารละลายลิกนินที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากลิกนินชนิด lignosulfonic acid sodium salt ละลายในน้ำกลั่น
2. ก๊าซโอโซน ซึ่งเตรียมโดยผ่านอากาศหรือก๊าซออกซิเจนไปยังเครื่องผลิตโอโซน
3. ก๊าซออกซิเจน
4. ก๊าซไนโตรเจน
5. น้ำกลั่น

##### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.27 เซนติเมตร ความยาวรวม 5.2 เมตร
2. เครื่องผลิตโอโซนชนิดโฟโตเคมีคอล (Photochemical Ozone Generator) พร้อมปั๊มอากาศ
3. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ที่สามารถวัดค่าได้ในช่วงความยาวคลื่น Ultraviolet และ Visible
4. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (Digital pH meter)
5. ปั๊มน้ำ
6. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ
7. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

##### 3.3 สารเคมี

1. สารเคมีที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณสีโดยวิธี NCSI Method color 71.01, 1999
  - 1.1 Metrepack phydron buffer capsules
  - 1.2 Platinum cobalt color standard (Fisher)
  - 1.3 Potassium hexachloroplatinate,  $K_2 PtCl_6$  (Aldrich)
  - 1.4 crystallized cobalt(II)chloride hexahydrate,  $CoCl_2 \cdot 6H_2O$  (Aldrich)
  - 1.5 Hydrochloric acid
  - 1.6 Sodium hydroxide, ACS reagent grade
  - 1.7 Hydrochloric acid, ACS reagent grade

2. สารเคมีที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณ chemical oxygen demand (COD)

2.1 *Standard Potassium Dichromate Solution*

- 2.1.1 Sulfamic acid
- 2.1.2 Silversulfate
- 2.1.3 Sulfuric acid
- 2.1.4 Ferroin indicator solution
- 2.1.5 1,10-Phenanthroline monohydrate ( $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ )
- 2.1.6 Ferrous sulfate ( $FeSO_4 \cdot 7 H_2 O$ )

2.2 *Standard FAS*

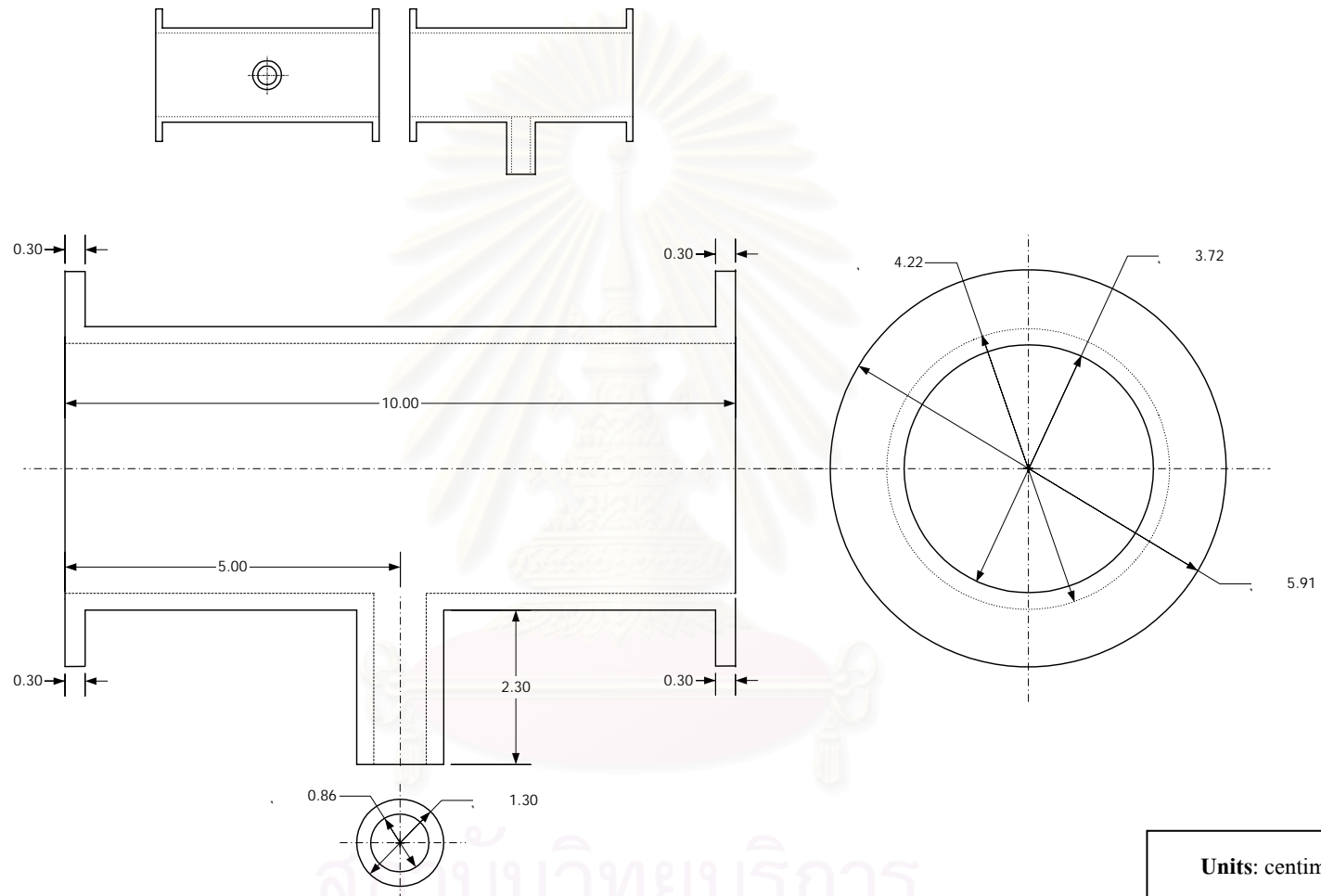
- 2.2.1 Ferrous ammoniumsulfate ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6 H_2 O$ )

3. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นไอโชนในน้ำ

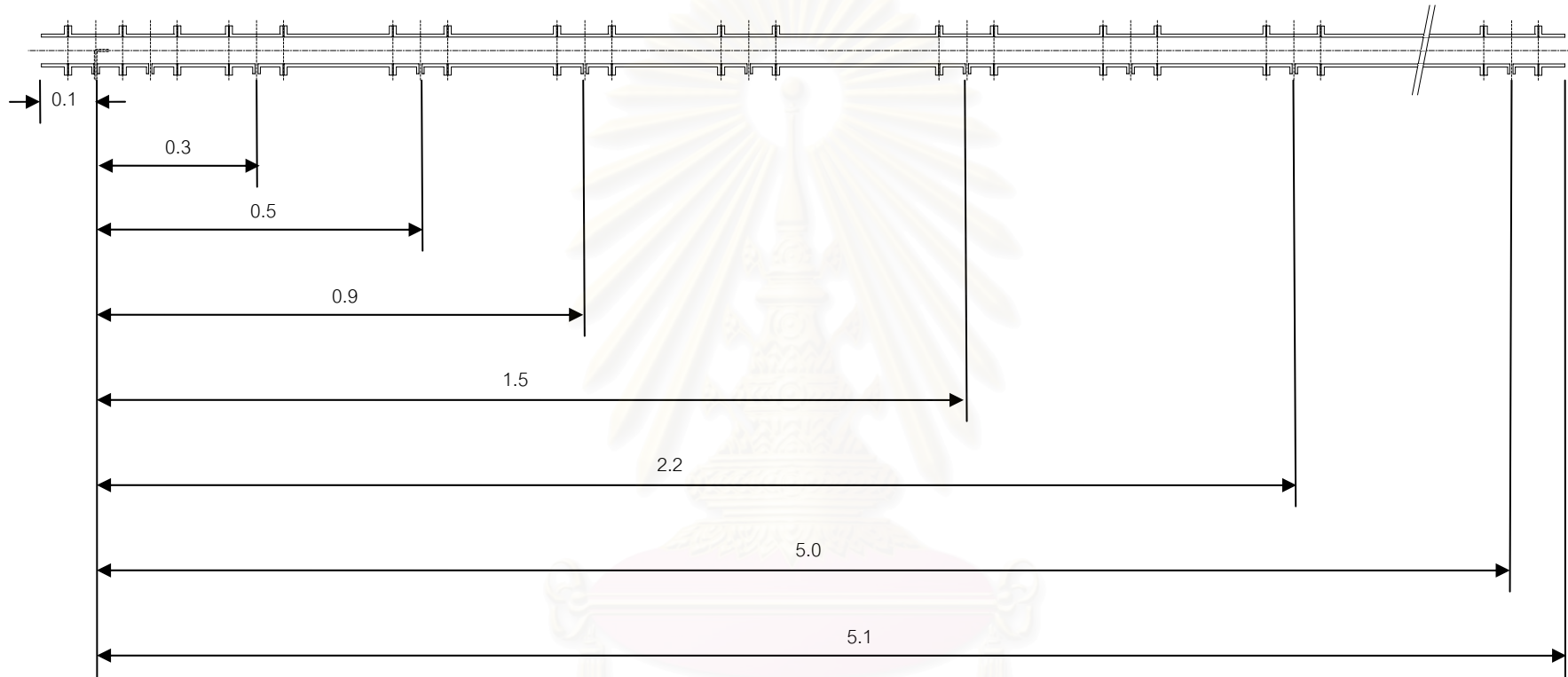
- 3.1 Phosphoric acid
- 3.2 Potassium indigo trisulfonate ( $C_{15}H_7N_2O_{11}S_3K_3$ )
- 3.3 Malonic acid
- 3.4 Glycine
- 3.5 Double distilled water



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบต่างๆในระบบท่อแวนรอนาที่ใช้ในการทดลอง



Units: meter

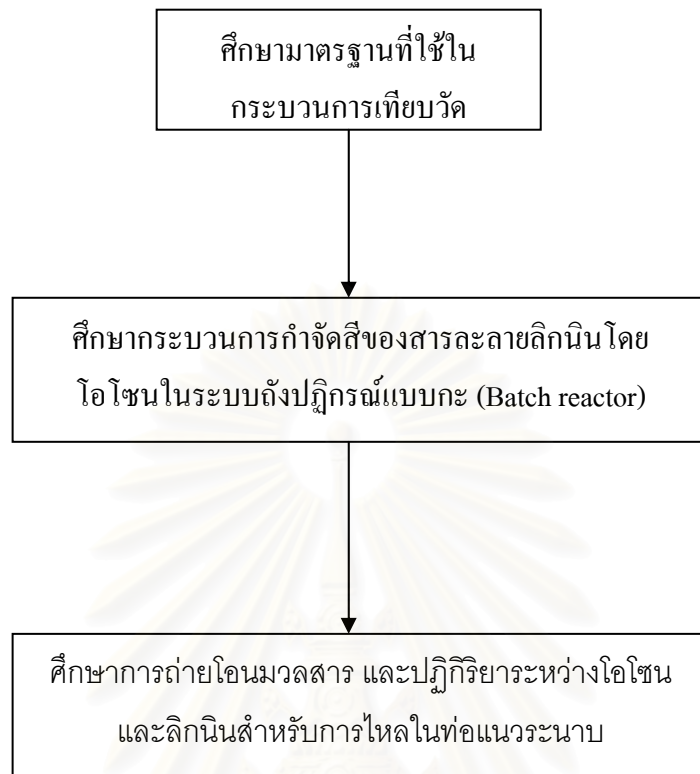
รูปที่ 3.2 ระบบท่อแนวระนาบที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเทียบวัด
  - 1.1 การวิเคราะห์ปริมาณสีโดยใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (NCSI Method color 71.01,1999)
  - 1.2 การวิเคราะห์ปริมาณ Chemical oxygen demand (COD)
  
2. ศึกษากระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) แบ่งเป็น
  - 2.1 การศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการลดสีของสารละลายลิกนิน
  - 2.2 การศึกษาถึงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสี
  - 2.3 การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของก๊าซโอโซนที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน
  - 2.4 การศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการลดสี เมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายลิกนิน และก๊าซโอโซน
  
3. ศึกษาการถ่ายโอนมวลสาร และปฏิกิริยาระหว่างโอโซน และลิกนินสำหรับการไหลในท่อแนวระนาบ แบ่งเป็น
  - 3.1 การศึกษาถึงการลดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบที่มี static mixer
  - 3.2 การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของสารละลายลิกนินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงแนวทางในการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกเป็นการศึกษาถึงมาตรฐานต่างๆ ที่นำมาใช้ในการเทียบวัดคุณสมบัติของสารละลายลิกนิน (lignosulfonic acid sodium salt) ส่วนที่สองเป็นการศึกษากระบวนการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการลดสี และส่วนที่สามเป็นการศึกษากระบวนการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ (horizontal pipeline)

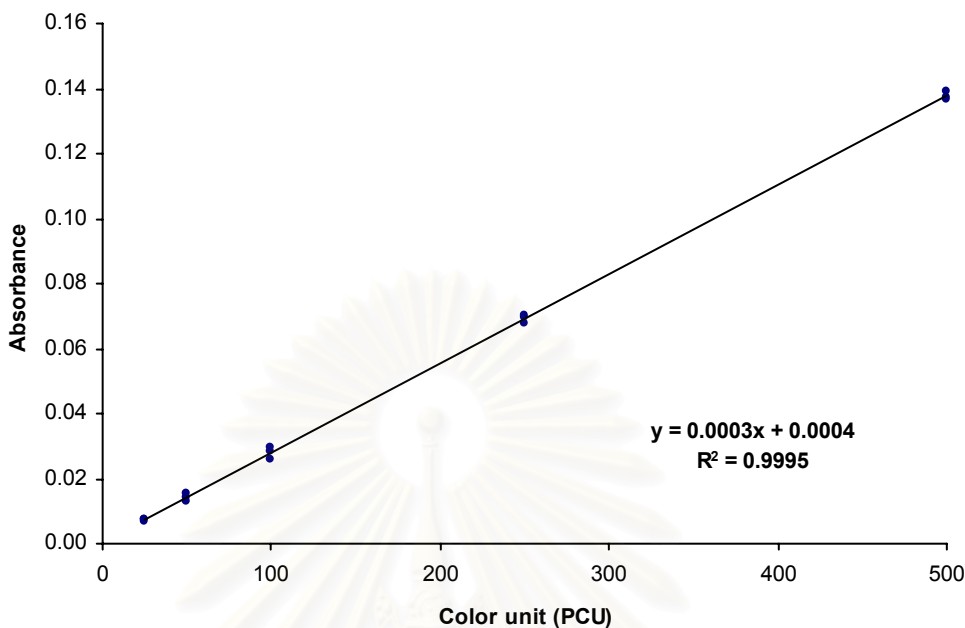
#### 4.1 มาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเทียบวัด

##### 4.1.1 กระบวนการวัดสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยการใช้เทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรี

(NCSI Method color 71.01,1999)

การวัดปริมาณสีของสารละลายลิกนิน (lignin) พิจารณาได้จากการวัดค่าการดูดกลืนของแสง (absorbance) ที่สามารถผ่านทะลุออกจากสารตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนของแสงที่ผ่านทะลุออกของสารละลายมาตรฐานแพลททินัมโคบอลต์ (Platinum cobalt stocks solution) ที่ทราบค่าความเข้มข้นโดยการใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ในการเปรียบเทียบหน่วยที่ใช้คือ PCU ซึ่งมีค่าเท่ากับ ปริมาณ 1 มิลลิกรัมของแพลททินัมต่อสารละลาย ปริมาตร 1 ลิตร ในรูปแบบของคลอโรแพลททินตไอออน (chloroplatinate ion) จากการทดลองวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ของสารละลายแพลททินัมโคบอลต์ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน (คำนวณและแสดงในหน่วย PCU) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และปริมาณสี ดังรูปที่ 4.1

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) กับปริมาณสี ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตรในหน่วย PCU

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ Chemical Oxygen Demand (COD)

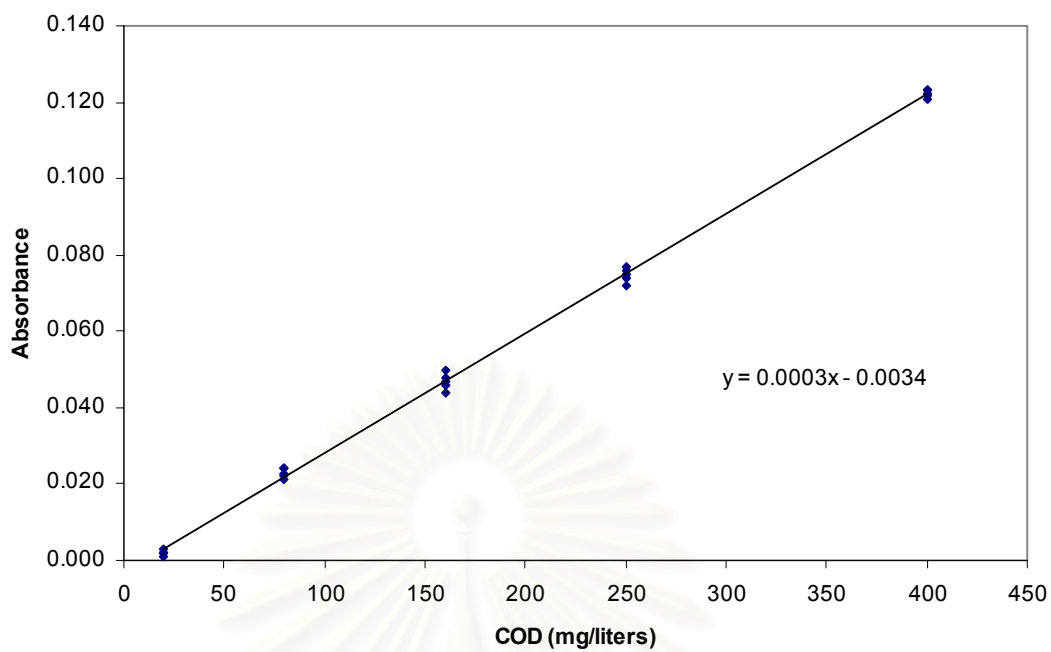
การวิเคราะห์หาซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสิ่งเจือปนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ในน้ำ โดยการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูงในระบบปิด (การวิเคราะห์ซีโอดีแบบรีฟลักซ์ปิด) ในการวิเคราะห์ได้ใช้เลือกวิธีวัดซีโอดีจากการเทียบสีโดยการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร กับปริมาณซีโอดีของสารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium Hydrogen Phthalate, KHP) ที่ความเข้มข้นต่างๆ กันดังตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยควรเลือกตัวอย่างสารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลตที่มีปริมาณความเข้มข้นเหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดส์สารอินทรีย์ กับ โปแตสเซียมไดโครเมตปริมาณมากเกินพอจากการสังเกตสีของสารละลายก่อนการนำไปรีฟลักซ์ ถ้าเป็นสีเขียวให้ทำใหม่โดยลดปริมาณตัวอย่างลง ซึ่งความเข้มข้นซีโอดีสูงสุดที่สามารถวัดได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นสารละลาย KHP (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณ COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	Absorbance ที่ 600 nm
0	0	0.000
20	20	0.002
80	80	0.023
160	160	0.047
250	250	0.075
400	400	0.107

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KHP  
ปริมาณความเข้มข้น COD และค่า absorbance ที่ 600 nm



รูปที่ 4.2 ลักษณะสีของสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโครเจนพธาเลตหลังจากผ่าน  
กระบวนการวิเคราะห์ COD โดยเรียงจาก ความเข้มข้น COD จากน้อยไปมาก (ตารางที่ 4.4)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (*absorbance*) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ COD

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



#### 4.2 กระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ

(batch reactor)

การศึกษากระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ และตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสี แบ่งการพิจารณาได้เป็น

- ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อการลดสีของสารละลายลิกนิน
- ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน
- ผลของอัตราการไหลของก๊าซโอโซนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน
- ประสิทธิภาพของกระบวนการลดสี เมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายลิกนิน และก๊าซโอโซน

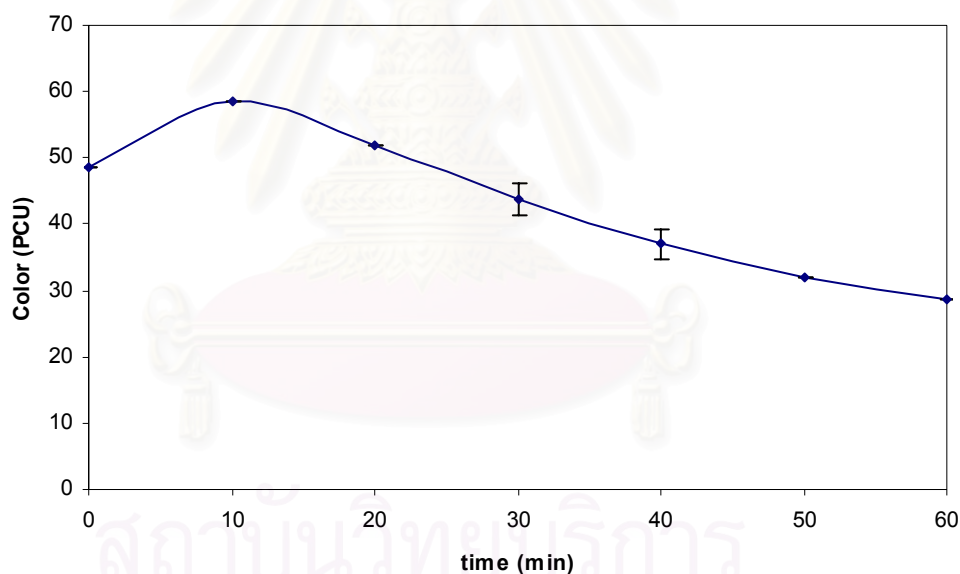


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

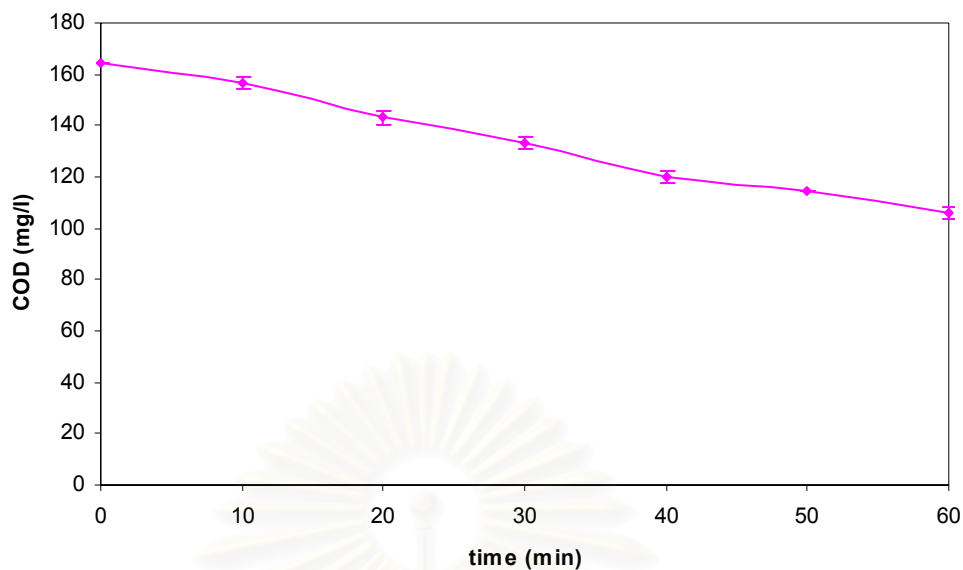
#### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสีของ สารละลายลิกนิน

การศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย ลิกนิน จากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซน และหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโครงสร้าง ของลิกนิน โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดจากโอโซนที่ความเข้มข้นต่างๆ ประกอบด้วย ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากอากาศซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ  $1.708 \times 10^4$  ppm และ ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้จากก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (high purity oxygen 99.7%) ซึ่งมี ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ  $9.016 \times 10^4$  ppm

การทดลองโดยการก๊าซโอโซนที่ผลิตจากอากาศ ในช่วงแรกของการทดลอง สีของ สารละลายจะมีลักษณะเข้มขึ้น และจะค่อยๆ จางลงเมื่อเวลาผ่านไปดังรูปที่ 4.4 ในขณะที่ค่าซีไอดีที่ วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์นั้น มีค่าค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ใช้ในการ เกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน (ดังรูปที่ 4.5)

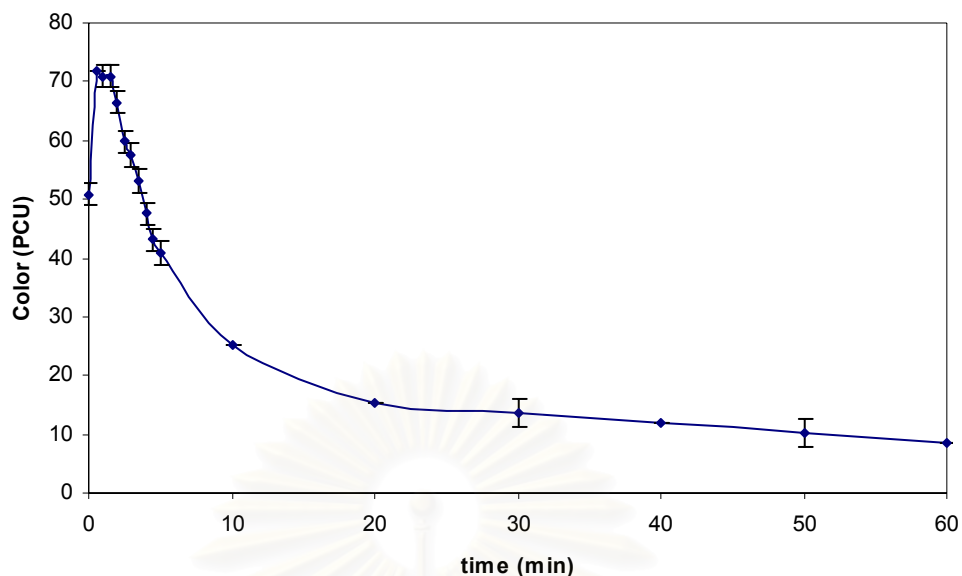


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากอากาศอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

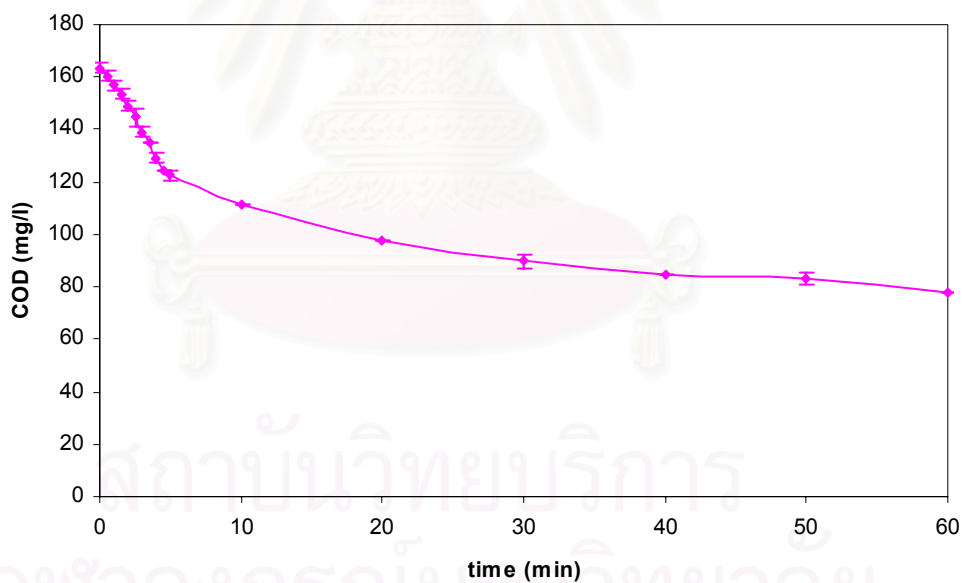


**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีของสารละลายกนินความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากอากาศ อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

การทดลองโดยใช้ก๊าซโอโซนที่ผลิตจากออกซิเจน ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาซีโอดีของสารละลายจะมีลักษณะเข้มข้นแล้วจึงค่อยๆ จางลงเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้โอโซนที่ผลิตจากอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.6 เพียงแต่ช่วงเวลาที่ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นถึงความเข้มข้นลดลงจะใช้เวลานานกว่า และค่าซีโอดีจะมีอัตราการลดเร็วกว่า (รูปที่ 4.7) เป็นผลจากความเข้มข้นของโอโซนที่มากขึ้น

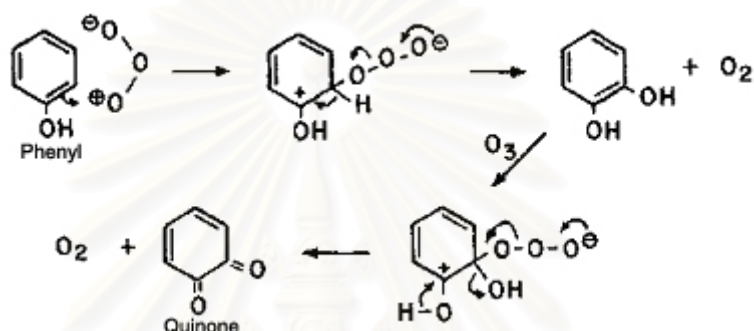


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

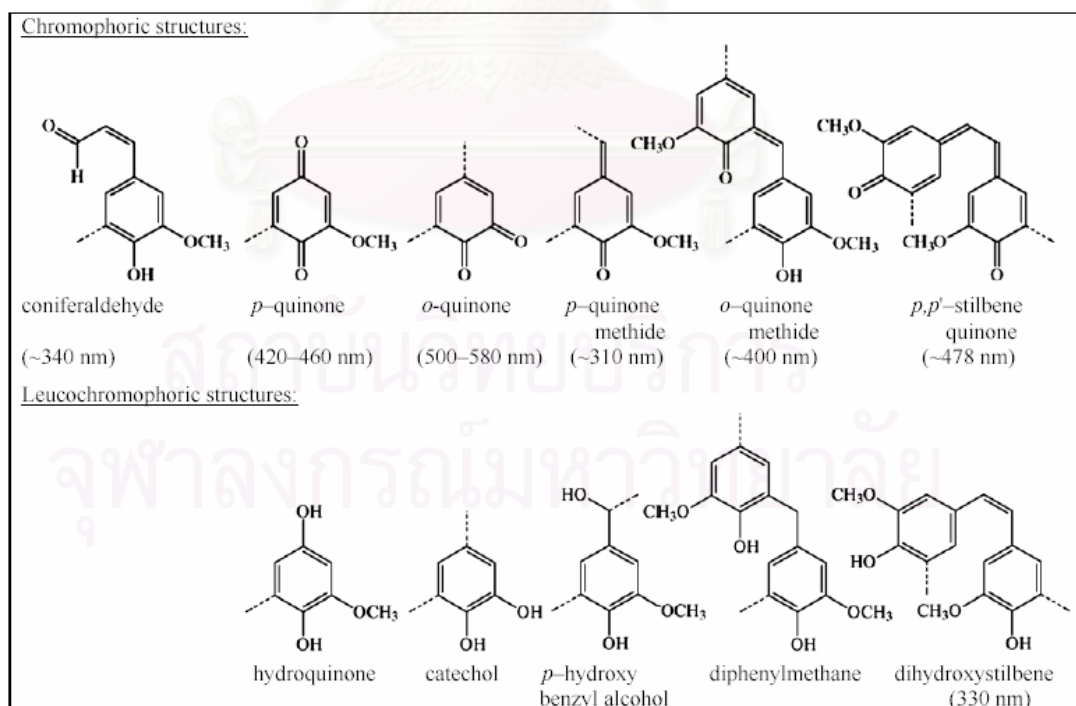


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

การเพิ่มขึ้นของสีในช่วงแรกของปฏิกิริยาระหว่างลิกนินและโอโซน สามารถอธิบายได้จากการเกิดปฏิกิริยา Dakin หรือ Dakin-like reactions ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและหมู่โครงสร้างที่มีลักษณะแบบอะโรมาติกที่เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของ lignin โดยเกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะแบบควินโนน (quinone) (ดังรูปที่ 4.8) ซึ่งมีสีน้ำตาลและส่งผลให้ค่า chromophore index (ดูรูปที่ 4.9) รวมถึงค่าการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีค่าสูงขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาสลายโครงสร้างควินโนนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างต้น ส่งผลให้ปริมาณสีและค่าการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

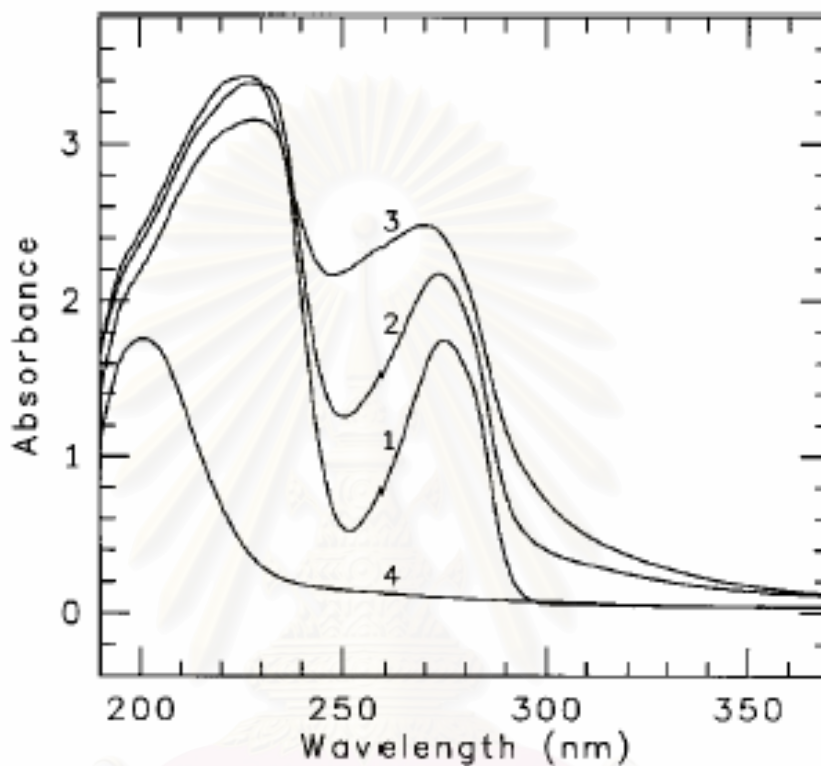


รูปที่ 4.8 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนและโครงสร้างอะโรมาติกแบบฟีนอลิก เกิดเป็นควินโนน [Eckert และ Singh, 1995]



รูปที่ 4.9 Lignin derived chromophoric and leucochromophoric structures and their associated absorbances [Davis, M.N., 1940]

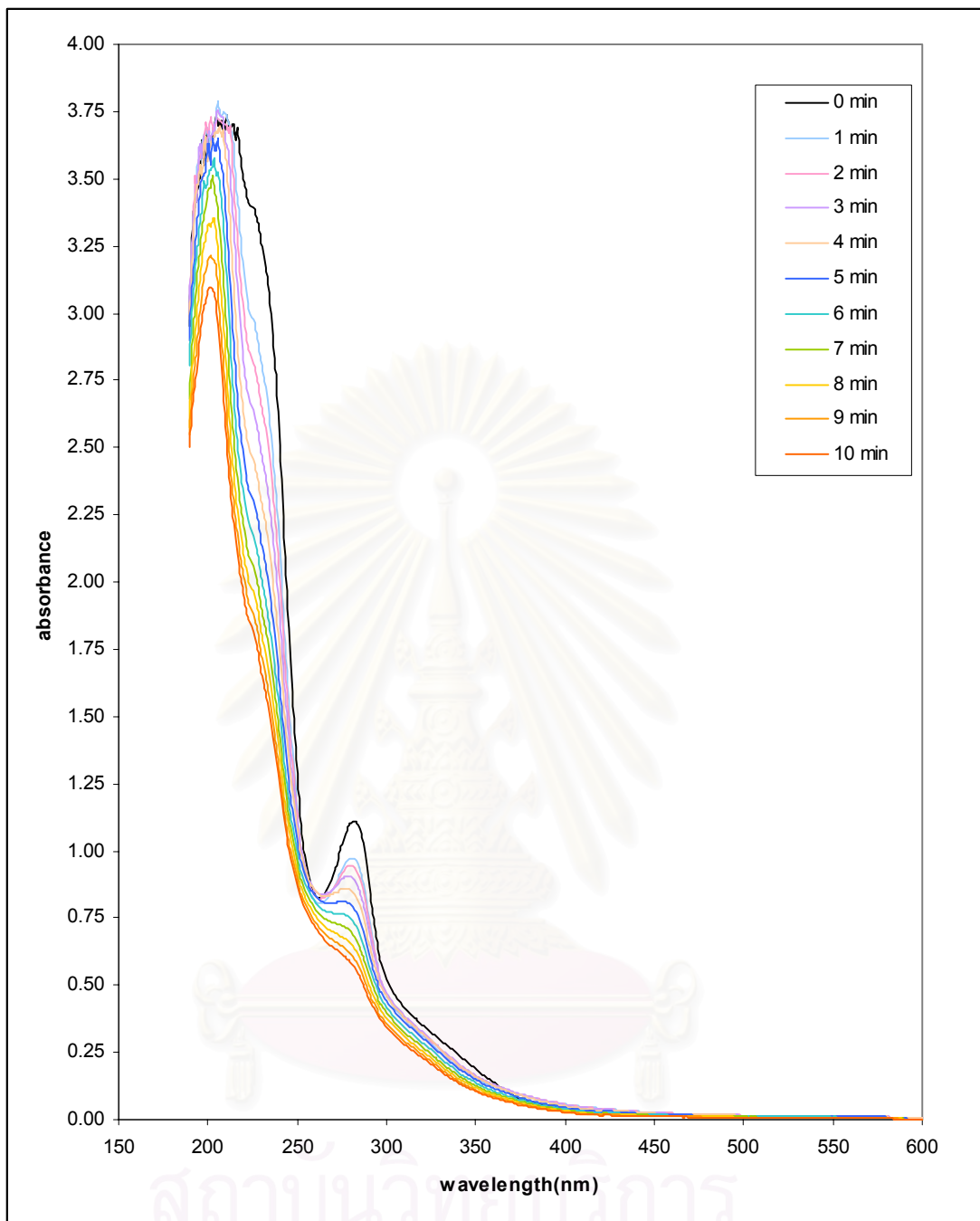
นอกจากการเกิดสีที่เข้มขึ้นจากหมู่ควิโนน ที่มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 420-580 นาโนเมตร แล้ว Olkkonen และคณะ [2000] ยังพบปรากฏการณ์ในลักษณะเดียวกันกับการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเล็ต (รูปที่ 4.10 และ 4.11) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายลิกนิน-คาร์โบไฮเดรต (lignin-carbohydrate complex, LCC) กับ โอโซน



รูปที่ 4.10 UV-VIS spectra of the LCC model compound ozonated on the preparative scale for different times: curve 1, 0 min; curve 2, 10 min; curve 3, 30 min; curve 4, 5 h. The ozonated aqueous solutions were flushed with argon gas before UV analysis. [Olkkonen และคณะ, 2000]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง (absorbance) และความยาวคลื่น (wavelength) ของสารละลายลิควินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซ โอโซนความเข้มข้น  $9.016 \times 10^4$  ppm ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

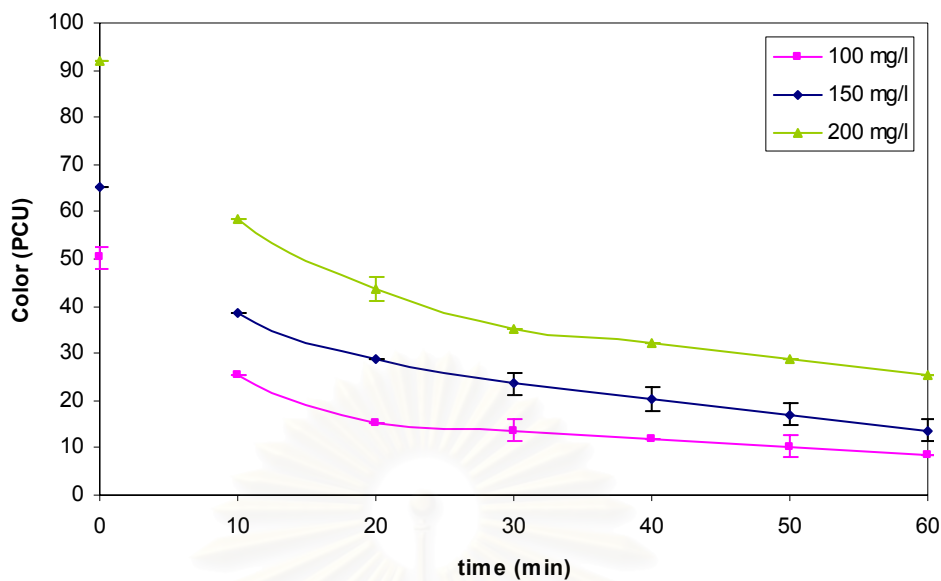
#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นของสารละลายลิกนินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน

การศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายลิกนินต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลคงที่ได้ทำการทดลองโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยกรณีศึกษาแรกใช้สารละลายลิกนินมีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และสำหรับกรณีศึกษาที่สองและสามใช้สารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ก๊าซโอโซนมีความเข้มข้นเท่ากับ  $9.016 \times 10^4$  ppm ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงที่อัตราการไหลเท่ากับ 13.56 ลิตรต่อนาที สำหรับทุกกรณีศึกษา

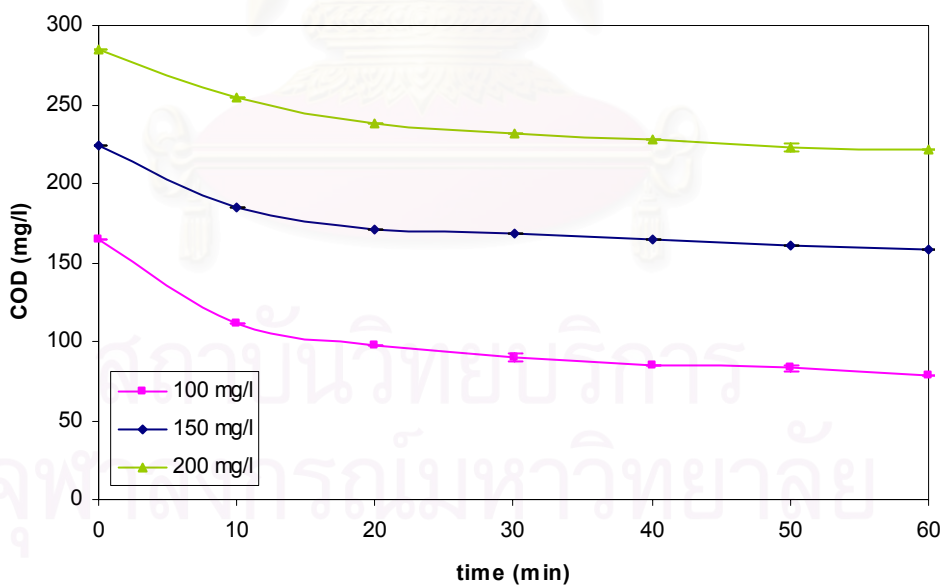
ความเข้มข้นของสารละลายลิกนิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสี (PCU)	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)
100	50.34	165
150	65.33	225
200	92.00	285

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารละลายลิกนินที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองเมื่อป้อนก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงเข้าสู่เครื่องผลิตโอโซนที่ต่อท่อปล่อยก๊าซไปยังถังปฏิกรณ์ที่บรรจุสารละลายลิกนิน ลักษณะของสารละลายลิกนินของทั้งสามกรณีในช่วงต้นของการทดลองเมื่อมีการสัมผัสกับก๊าซโอโซนจะมีสีค่อยๆ เข้มขึ้น และจะค่อยๆ จางลงไปตามระยะเวลา แต่เนื่องจากในการทดลองได้มีการเก็บตัวอย่างสารละลายทุกๆ 10 นาที ซึ่งไม่เพียงพอในการแสดงผลของสีที่เข้มขึ้นได้ (รูปที่ 4.12) ในขณะที่ค่าซีไอดีที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างสารละลายลิกนินทั้งสามความเข้มข้นขณะที่เกิดปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์นั้น มีค่าค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนดังรูปที่ 4.13

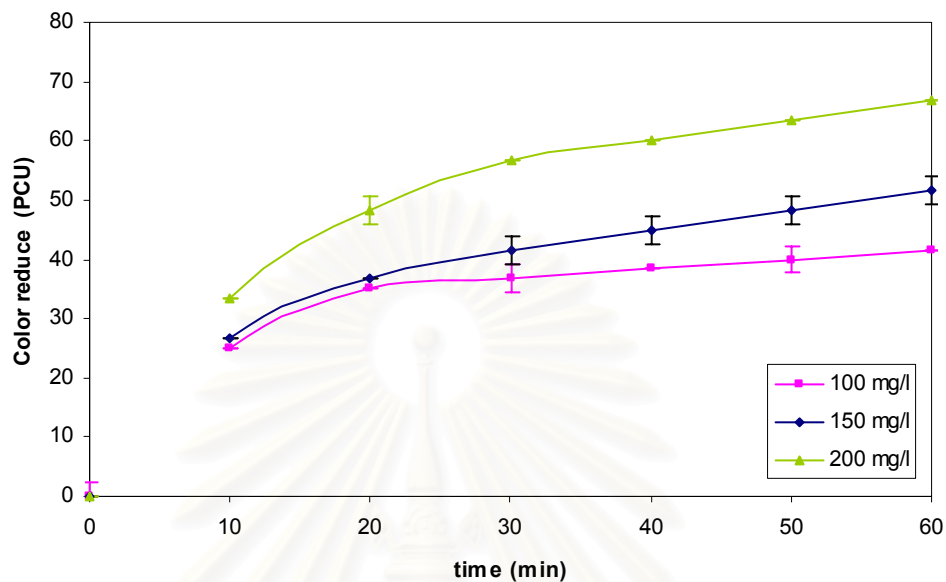


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจน อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

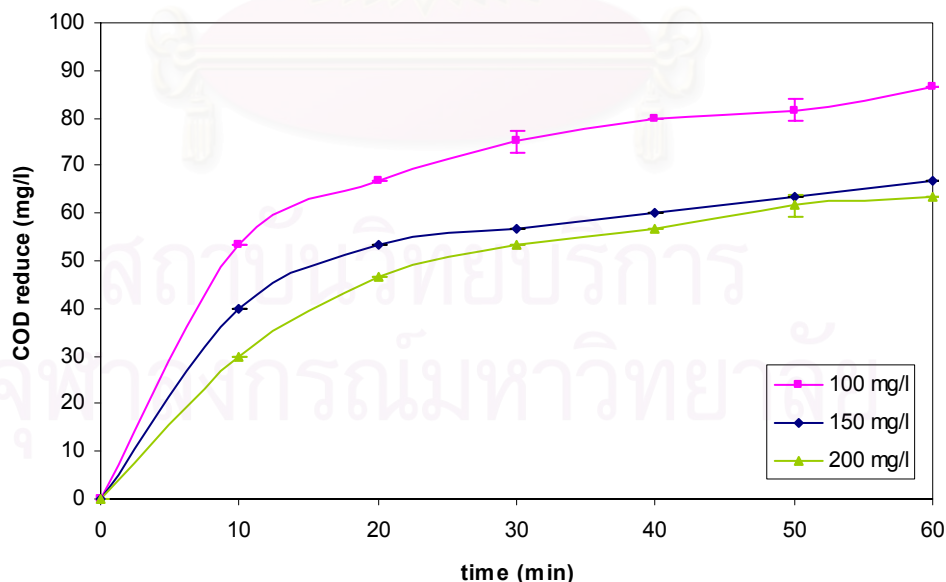


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที

เมื่อนำค่าสีและซีไอดีของตัวอย่างสารละลายลิกนินมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของปริมาณของสีและซีไอดีที่สามารถลดได้ แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่ลดลงของสารละลายลิกนิน ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับ ก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที



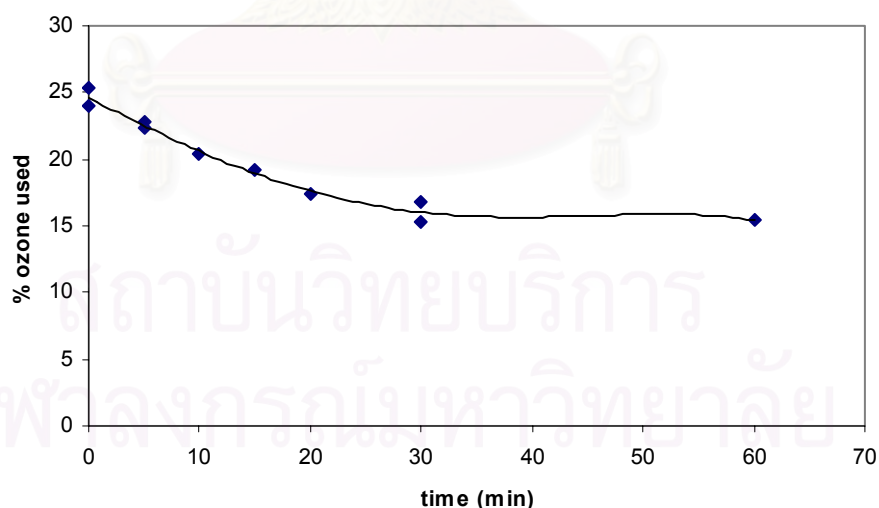
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของค่าซีไอดีที่ลดลงของสารละลายลิกนิน ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับ ก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนอัตราการไหล 13.56 ลิตรนาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการลดสีของสารละลายลิกนิน (รูปที่ 4.14) พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ในการลดสีของสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรกของทั้งสามการทดลอง อัตราการลดสีจะมีค่าสูง แล้วจึงค่อยๆ ลดลงไป หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนประมาณ 25-30 นาทีโดยปริมาณสีของสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังทำปฏิกิริยากับโอโซนจะมีปริมาณการลดสีสูงสุด ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังทำปฏิกิริยากับโอโซนจะมีปริมาณการลดสีต่ำสุด ขณะที่รูปแบบความสัมพันธ์ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ปริมาณการลดค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซีโอดีของสารละลายลิกนินทั้งสามความเข้มข้นจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับโอโซน โดยปริมาณการลดค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.15) หลังทำปฏิกิริยากับโอโซนจะมีปริมาณการลดค่าซีโอดีสูงสุด ในขณะที่ปริมาณการลดค่าซีโอดีของสารละลายลิกนิน ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังทำปฏิกิริยากับโอโซนจะมีปริมาณการลดค่าซีโอดีต่ำสุด ซึ่งผลของค่าซีโอดีที่วิเคราะห์ได้นั้นจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลของปริมาณสี ซึ่งสามารถอธิบายได้จากลำดับในการเข้าไปทำปฏิกิริยาของโอโซนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบโครงสร้างลิกนิน โดยในสารละลายลิกนินที่มีความเข้มข้นสูงกว่านั้น จะมีปริมาณโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดสี และหมู่พันธะคู่ (aliphatic double bonds) มากกว่า (ดังตารางที่ 4.3) จึงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูง [McGrouther และคณะ, 1995] [Hartler และคณะ, 1969] และปริมาณการลดของสีมีค่าสูง ในขณะที่ในสารละลายลิกนินความเข้มข้นต่ำหลังจากโอโซนทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันที่ก่อให้เกิดสี และหมู่พันธะคู่ (aliphatic double bonds) ซึ่งมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงไปแล้วนั้น โอโซนจะเริ่มทำลายโครงสร้างฟีนิล (phenyl) และหมู่โครงสร้างที่มีลักษณะแบบอะโรมาติก (aromatic rings) โดยคุณสมบัติของสารประกอบโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนที่มีความซับซ้อนของโครงสร้างมาก เช่น สารประกอบอะโรมาติก ซึ่งใช้เวลามากกว่าในการย่อยสลาย ทำให้ปริมาณสีที่ลดลงในกรณีที่มีความเข้มข้นของลิกนินต่ำมีค่าน้อยกว่า สำหรับการลดลงของซีโอดีที่มีปริมาณมากกว่าที่ความเข้มข้นของลิกนินต่ำนั้น ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุใด

Functional Group	Abundance per 100 C9 units
Carbonyl	10-15
Benzyl alcohol	15-20
Phenolic hydroxyl (free)	15-30
Methoxyl	92-96

ตารางที่ 4.3 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันหลักของลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน

จากงานวิจัยของ Olkkonen และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการทำลายโครงสร้างของ lignin-carbohydrate complex (LCC) ที่ละลายอยู่ในน้ำ (6 mg LCC/100 ml H<sub>2</sub>O) โดยการใช้โอโซน พบว่าในช่วงต้นของการทดลองความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายมีค่าต่ำ จากนั้นความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง ความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายจึงมีค่าคงที่ แสดงให้ทราบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นของการทดลองจะมีความเร็วสูงและจะมีการเลือกเกิดปฏิกิริยากับหมู่ที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย จากนั้นเมื่อความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้างลิกนิน (substrate) ลดลง ปริมาณการใช้โอโซนจะมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในการวัดปริมาณโอโซนที่เหลือในก๊าซที่อัตราการไหล 4.5 หน่วย โดยผ่านก๊าซลงไปในสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการใช้โอโซนของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจน อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที



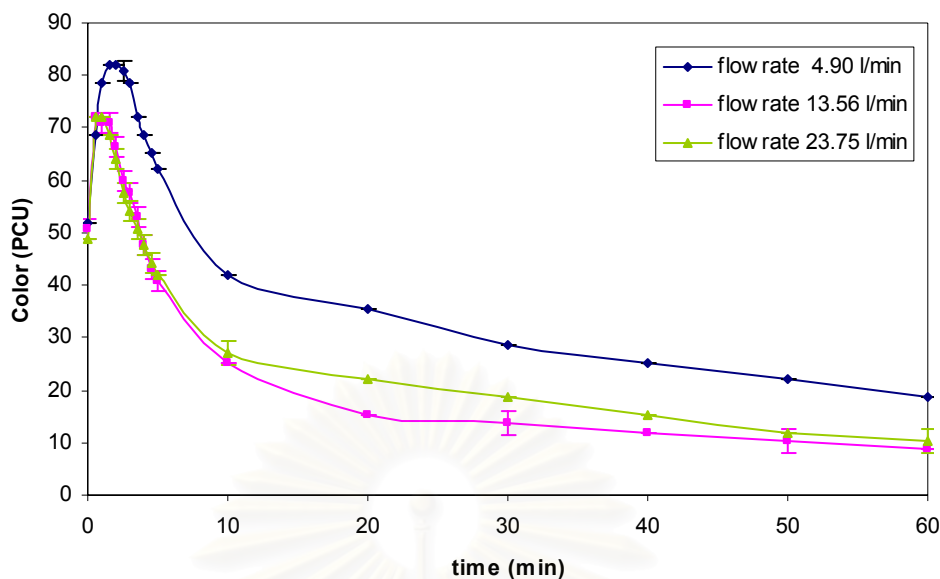
#### 4.2.3 ผลของอัตราการไหลของก๊าซไอโซนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน

ในการศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของก๊าซไอโซนต่อประสิทธิภาพในการลดสีของสารละลายลิกนิน โดยกำหนดอัตราการป้อนก๊าซไอโซน และความเข้มข้นของไอโซนที่ใช้มีความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.4

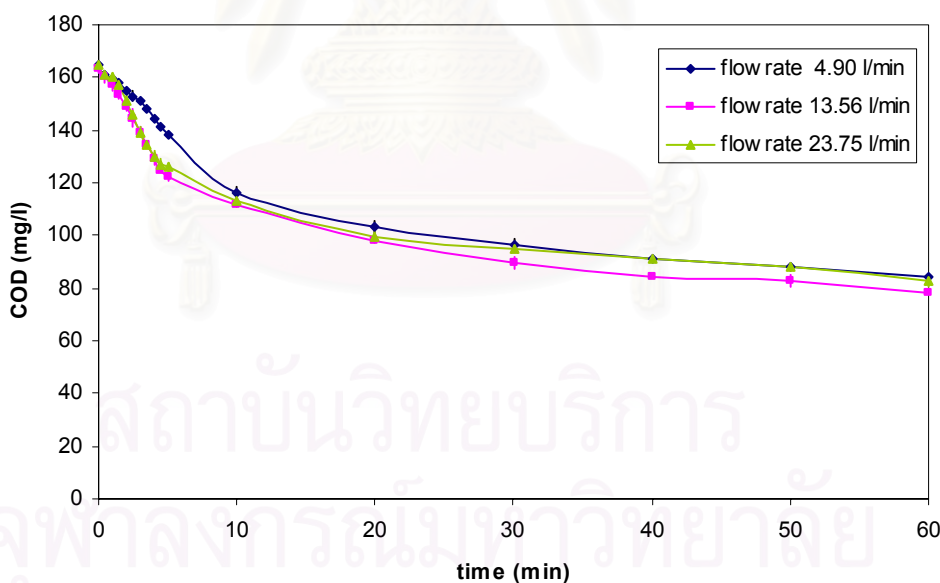
อัตราการป้อนก๊าซออกซิเจนเข้าสู่เครื่องผลิตไอโซน		ความเข้มข้นไอโซน (ppm)
(ลิตรต่อนาที)	(มิลลิกรัมต่อนาที)	
4.90	1711.2	$1.743 \times 10^5$
13.56	2400.8	$9.016 \times 10^4$
23.75	3456	$7.413 \times 10^4$

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะ และอัตราการป้อน ไอโซนที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองเมื่อป้อนก๊าซไอโซนที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรแตกต่างกันดังตารางที่ 4.4 ลักษณะของสารละลายลิกนินของทั้งสามตัวอย่างในช่วงเริ่มต้นการทดลองเมื่อมีการสัมผัสก๊าซไอโซนจะมีสีค่อยๆเข้มขึ้น และจะค่อยๆจางลงไปตามระยะเวลา (รูปที่ 4.17) ในขณะที่ค่าซีไอดีที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างสารละลายลิกนินทั้งสามความเข้มข้นขณะที่เกิดปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์นั้น มีค่าค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนดังรูปที่ 4.18

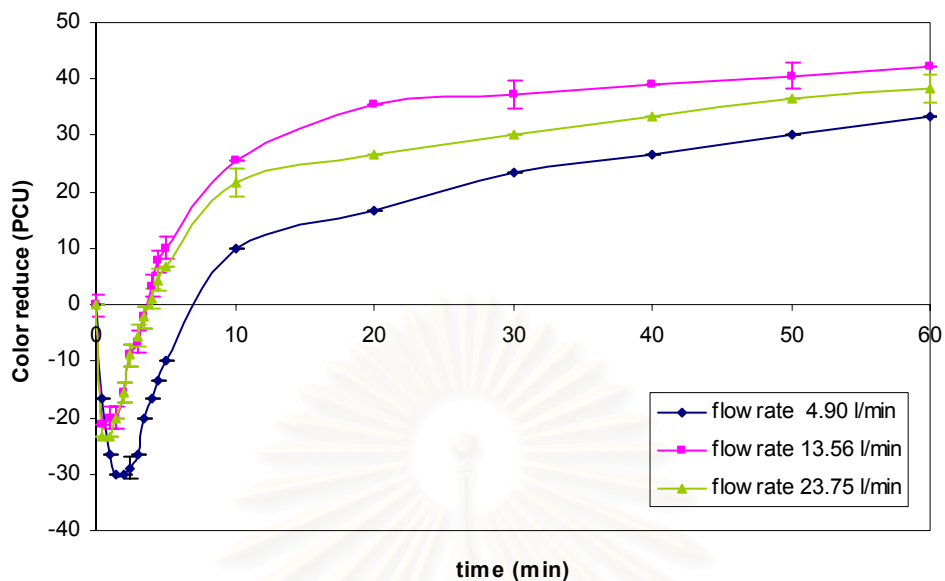


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลต่างๆ

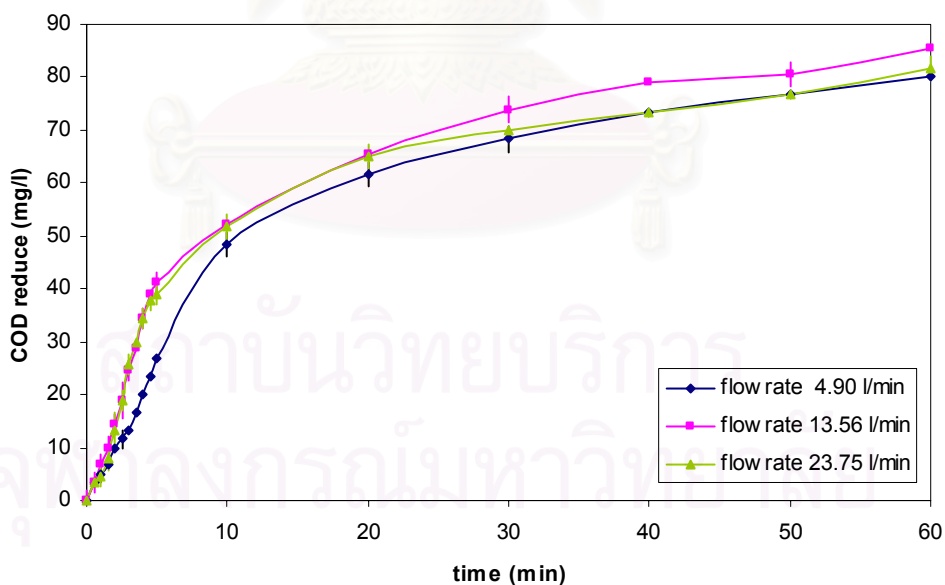


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลต่างๆ

เมื่อนำค่าสีและซีโอดีของตัวอย่างสารละลายลิกนินมาคำนวณเป็นปริมาณสี และซีโอดีที่ลดลงไป ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20

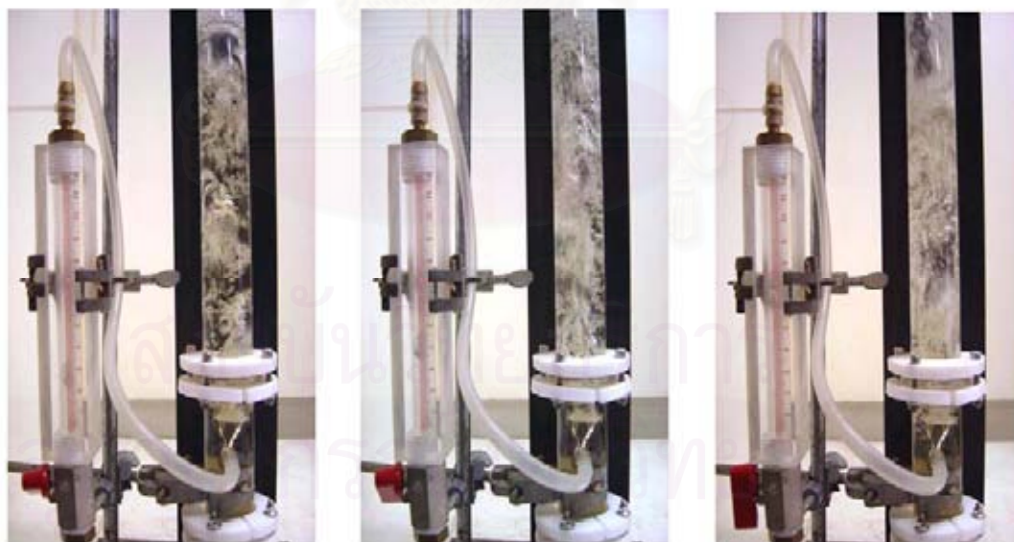


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดสีของสารละลายลินินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจน ที่อัตราการไหลต่างๆ



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการลดค่าซีโอดีของสารละลายลินินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซน ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลต่างๆ

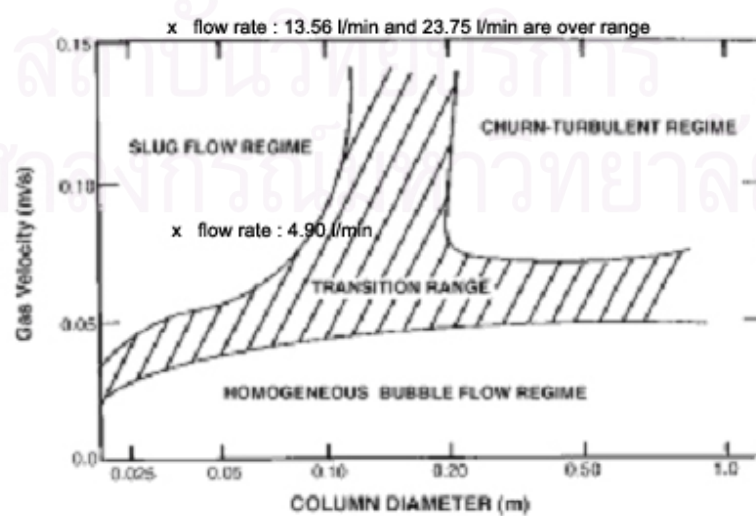
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการลดสีของสารละลายลิกนิน (รูปที่ 4.19) พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ในการลดสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 4.90, 13.56 และ 23.75 ลิตรต่อนาที มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรกของทั้งสามการทดลอง อัตราการลดสีจะมีค่าสูง แล้วจึงค่อยๆ ลดลงไป หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนประมาณ 25-30 นาทีโดยปริมาณสีของสารละลายลิกนินหลังทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณการลดสีสูงสุด และการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 4.90 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณการลดสีต่ำสุด ในขณะที่รูปแบบความสัมพันธ์ของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการลดค่าซีไอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 4.90, 13.56 และ 23.75 ลิตรต่อนาที ปริมาณซีไอดีของสารละลายลิกนินทั้งสามอัตราการไหลของโอโซนจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยากับโอโซน โดยปริมาณซีไอดีของสารละลายลิกนินหลังทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณการลดซีไอดีสูงสุด ในขณะที่ปริมาณการลดค่าซีไอดีของสารละลายลิกนินหลังทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนที่อัตราการไหล 4.90 ลิตรต่อนาที จะมีปริมาณการลดซีไอดีต่ำสุด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปแบบลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในระบบท่อแนวตั้ง ดังรูป 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะการไหลของก๊าซโอโซนในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลต่างๆ กัน



รูปที่ 4.22 ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนในถังปฏิกรณ์ที่อัตราการไหลต่างๆ กัน



รูปที่ 4.23 รูปแบบการไหลสองเฟสแบบต่างๆ ในท่อแนวตั้ง [Kantarci และคณะ, 2004]



จากรูป เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลของก๊าซไอโซนในระบบท่อแก้วซึ่งบรรจุสารละลาย ลิกนินพบว่า การไหลของก๊าซจะมีลักษณะแบบ plug-slug ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kantarci และคณะซึ่งแสดงในรูปที่ 23 โดยความปั่นป่วนในท่อเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของก๊าซไอโซนที่ 4.90, 13.56 และ 23.75 ลิตรต่อนาที มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที จะมีการกระจายตัวของก๊าซและความปั่นป่วนในท่อสูงกว่าที่อัตราการไหล 4.90 ลิตรต่อนาที ในขณะที่ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนที่อัตราการไหล 23.75 ลิตรต่อนาที จะมีลักษณะการกระจายตัวของก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอโดยจะมีลักษณะเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ไหลผ่าน คอลัมน์แก้วเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่จะเกิดการถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อหน่วยปริมาตรน้อยกว่าอัตราการไหลของก๊าซไอโซน 13.56 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีขนาดฟองที่เล็กกว่า และนอกจากนี้จากการทดลองข้างต้น (รูปที่ 4.19 และ 4.20) พบว่าประสิทธิภาพในการผสมระหว่างเฟสก๊าซและเฟสของเหลวมีอิทธิพลต่อการลดสีและค่าซีไอดีของสารละลาย ลิกนินมากกว่าผลต่างของปริมาณก๊าซไอโซนที่ป้อนเข้าไปในระบบ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

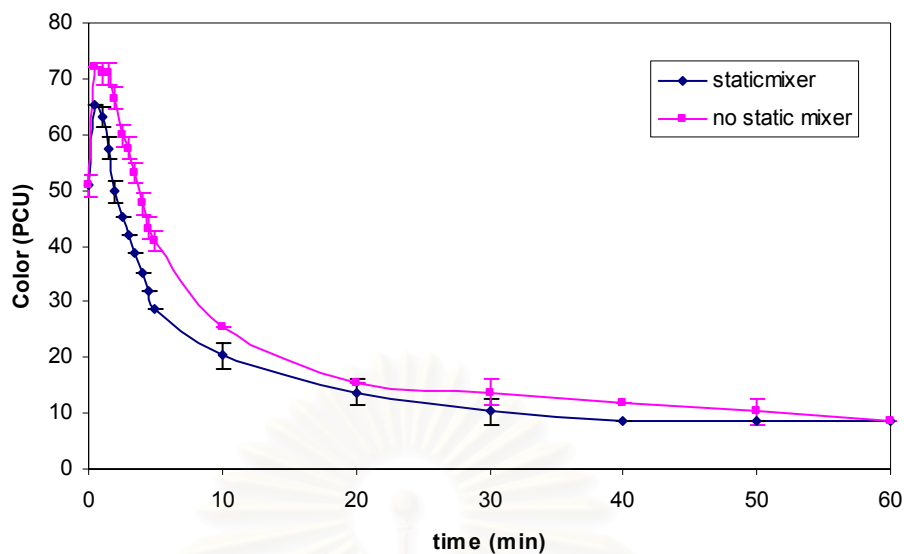


#### 4.2.4 ผลของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายลิกนิน และก๊าซโอโซนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน

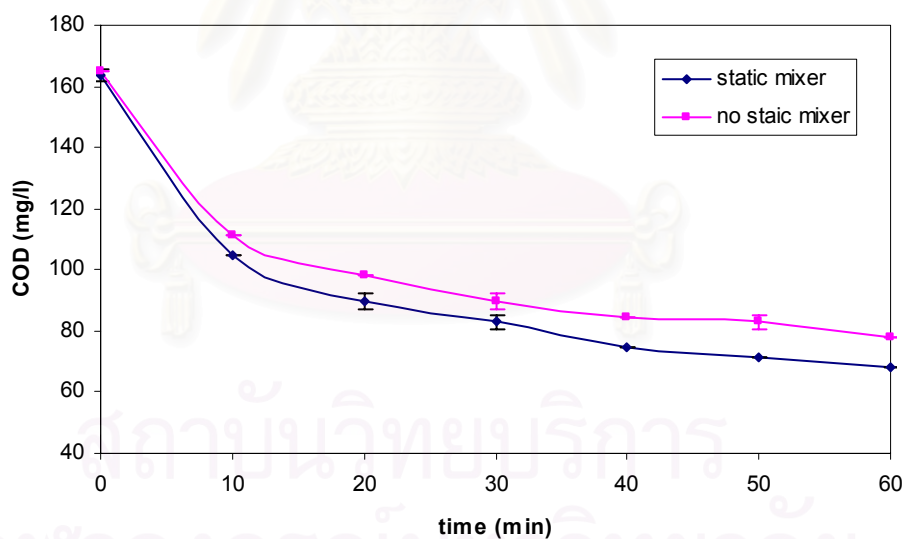
การศึกษาประสิทธิภาพในการลดสีและซีโอดีของสารละลายลิกนิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างก๊าซโอโซนกับสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้ง สามารถวิเคราะห์ได้จากผลของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างก๊าซโอโซนความเข้มข้น  $9.016 \times 10^4$  ppm อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที และสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสี และซีโอดีจากกระบวนการไหลในท่อแก้วแนวตั้งที่ไม่มี static mixer และท่อแก้วแนวตั้งที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสก๊าซ และของเหลวโดยใช้ static mixer ที่มีรูปร่างทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ขอบหนา 0.5 มิลลิเมตร และยาว 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 4.24



รูปที่ 4.24 ขนาด และลักษณะของท่อ Teflon ที่นำมาใช้เป็น static mixer

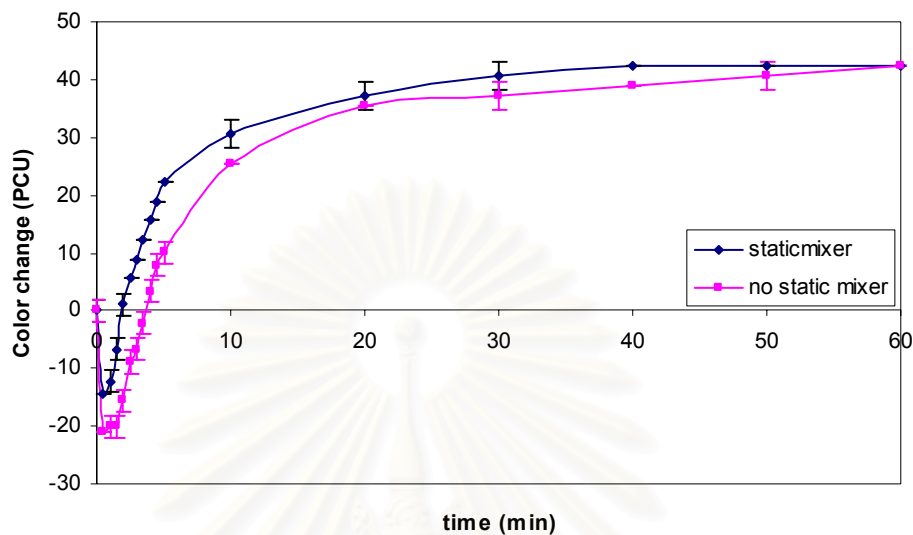


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการป้อน 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer

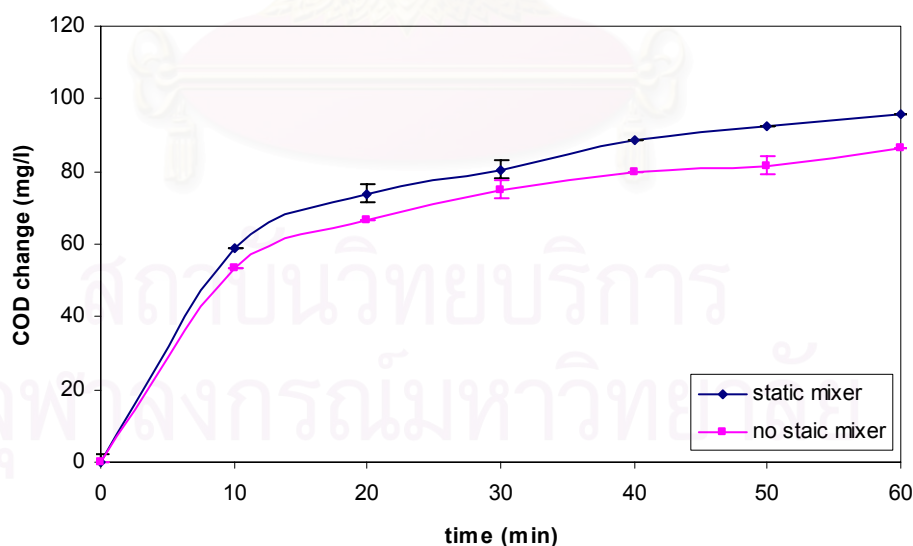


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการป้อน 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer

เมื่อนำค่าสีและซีไอดีของตัวอย่างสารละลายลิกนินมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของปริมาณของสีและซีไอดีที่สามารถลดได้จากปฏิกิริยา โดยมีความสัมพันธ์ดังรูป 4.27 และ 4.28



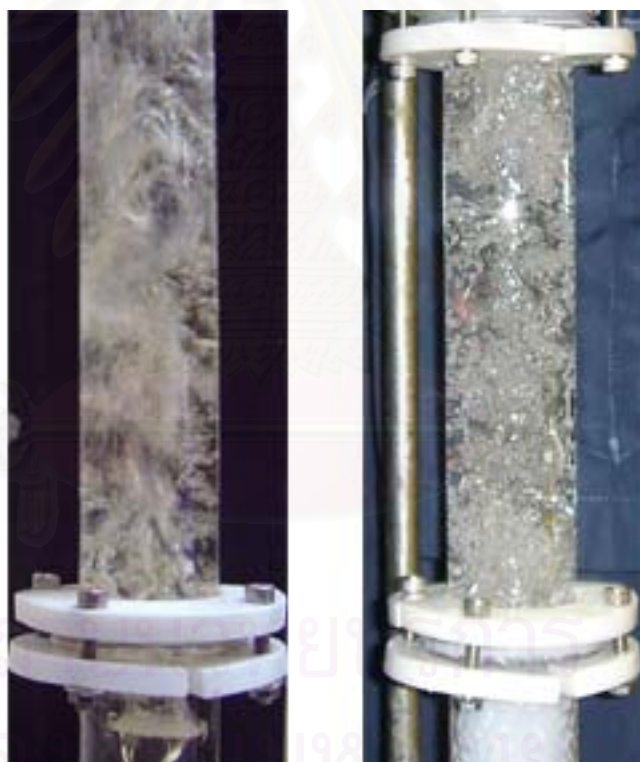
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่ลดได้ของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอดีที่ลดได้ของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรกับเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อที่มีการติดตั้ง static mixer และ ไม่มีการติดตั้ง static mixer

จากการทดลองเมื่อทำการป้อนก๊าซไอโซนเข้าไปในระบบท่อแก้วแนวตั้งซึ่งบรรจุสารละลาย ลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ระบบ แยกเป็นระบบที่มีการ บรรจุตัว static mixer และระบบที่ไม่มีการบรรจุตัว static mixer ซึ่งลักษณะฟองก๊าซของระบบที่มีการ ติดตั้งตัว static mixer จะมีขนาดเล็ก และมีความละเอียด สูงกว่าระบบที่ไม่ได้มีการติดตั้งตัว static mixer

ในการพิจารณาเปรียบเทียบถึงผลการทำปฏิกิริยา ลักษณะสีของสารละลายลิกนินทั้งสอง ระบบขณะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกัน ไอโซนจะมีลักษณะเข้มข้นในช่วงแรก โดยลักษณะสีของ สารละลายลิกนินในระบบที่มีการบรรจุตัว static mixer จะมีสีเข้มขึ้นและสีจะค่อยๆจางลงใน ช่วงเวลาที่สั้นกว่ากรณีที่ไม่ได้มีการติดตั้ง static mixer ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ซีไอดี โดย ระบบที่มีการติดตั้งตัว static mixer จะมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งส่งผลไปยังการ ลดปริมาณซีไอดีสูงกว่าระบบที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัว static mixer



รูปที่ 4.29 ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนในคอลัมน์ที่ไม่บรรจุ static mixer และ บรรจุ static mixer ที่อัตราการไหลก๊าซ 13.56 ลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.30 ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนในคอลัมน์ที่มีการบรรจุ *static mixer*



จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดสีและการลดซีโอดี พบว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายลิกนิน และก๊าซโอโซนในระบบที่มีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดปฏิกิริยาโดยการบรรจุตัว static mixer จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ไม่มีการบรรจุตัว static mixer โดยการทดลองในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ระบบที่มีการติดตั้งตัว static mixer จะมีอัตราเร็วในการลดสีสูง และซีโอดีสูงกว่า โดยมีศักยภาพในการลดซีโอดีเพิ่มมากขึ้นเท่ากับร้อยละ 6.11 ของปริมาณซีโอดีในสารละลายลิกนิน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



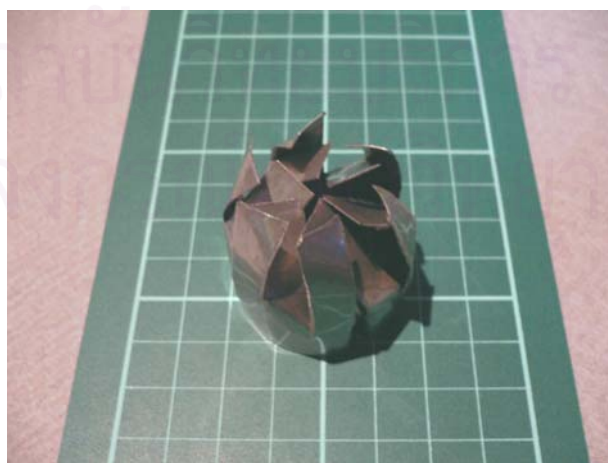
### 4.3 กระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ

#### (horizontal pipe)

การศึกษาส่วนนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนิน โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนในระบบท่อแนวระนาบที่ติดตั้ง static mixer โดยใช้ก๊าซโอโซนความเข้มข้น  $9.016 \times 10^{-4}$  ppm ในระบบท่อแนวระนาบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.72 เซนติเมตร ความยาว 5.20 เมตร ในส่วนแรกได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของระบบการทดลองในการถ่ายเทมวลระหว่างเฟสและการลดสีของสารละลายลิกนิน ในส่วนที่สองได้ทำการพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายต่อการลดสี

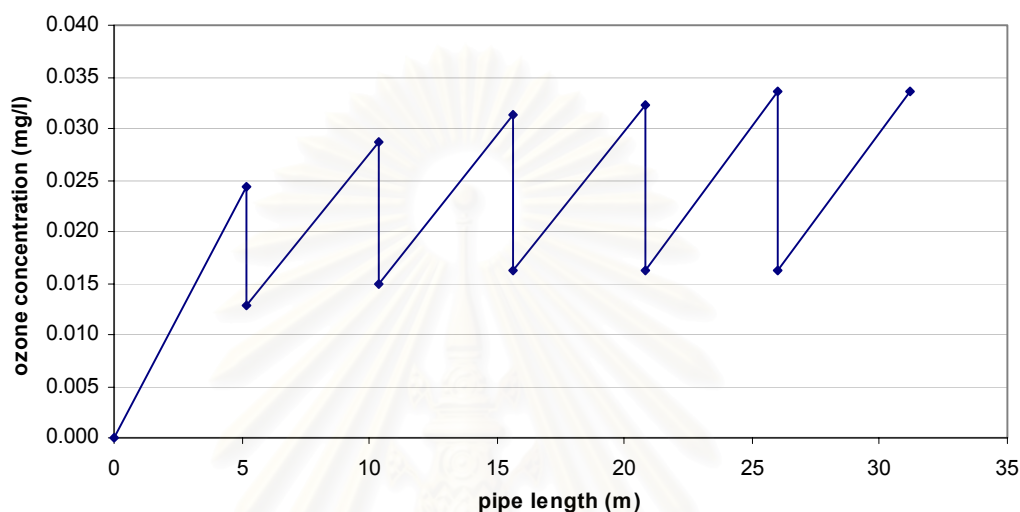
#### 4.3.1 การศึกษาถึงการลดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบที่มี static mixer

การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนินจากกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ ได้ออกแบบการทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การศึกษาการถ่ายเทโอโซนจากเฟสก๊าซไปยังเฟสของเหลวโดยวัดปริมาณโอโซนในน้ำ และสารละลายลิกนินที่ทางเข้า และทางออกของระบบท่อก่อนเข้าสู่ระบบหมุนเวียน และในส่วนต่อมาได้ศึกษาถึงการลดสีของสารละลายลิกนินจากการทำปฏิกิริยากับก๊าซโอโซนในระบบท่อแนวระนาบที่มี static mixer (รูปที่ 4.31) จากการทดลองส่วนแรก เมื่อป้อนโอโซนเข้าสู่ระบบท่อ ปริมาณโอโซนในน้ำที่สามารถตรวจสอบได้ที่ทางออกของท่อจะมีปริมาณมากกว่าปริมาณโอโซนในน้ำหลังผ่านการป้อนก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่โอโซนออกและหมุนเวียนกลับมายังทางเข้าระบบท่อ โดยปริมาณโอโซนที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเนื่องจากคุณสมบัติในการดูดซึมโอโซนในน้ำและข้อจำกัดของระยะเวลาที่ใช้ในการป้อนไนโตรเจนเพื่อไล่โอโซน



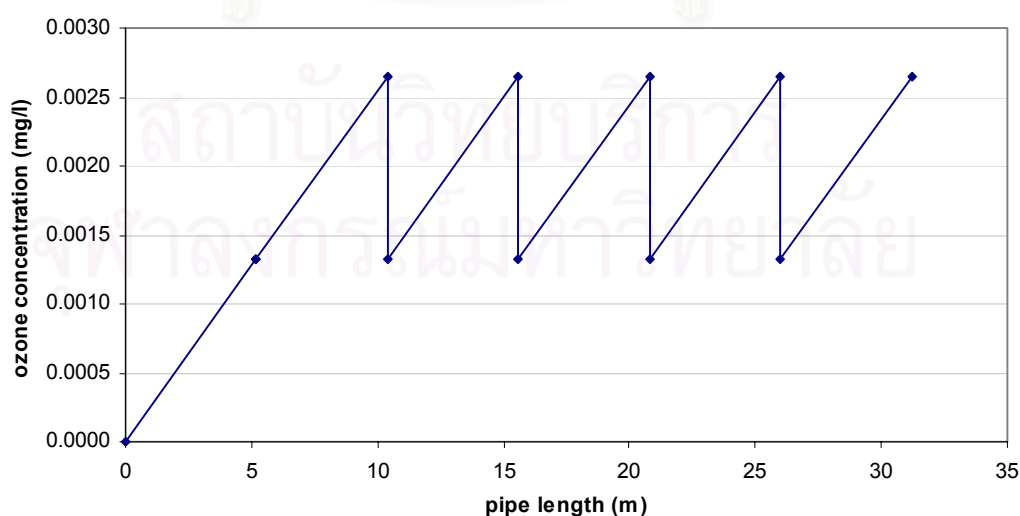
รูปที่ 4.31 ลักษณะ static mixer ที่ใช้ในระบบท่อแนวระนาบ

ปริมาณ โอโซนในน้ำที่ท่อทางออกจะมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามจำนวนรอบของการไหลวนกลับเข้าสู่ระบบ ในขณะที่ปริมาณ โอโซนที่ทางเข้าของท่อหลังจากผ่านระบบหมุนเวียนที่มีการป้อนก๊าซในโตรเจนเพื่อไล่ออกโอโซนออกนั้น ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผ่านการไหลวน และมีค่าคงที่เมื่อผ่านการไหลวนไปประมาณ 3 รอบ หรือเป็นระยะทางประมาณ 15.6 เมตร ดังรูป 4.32



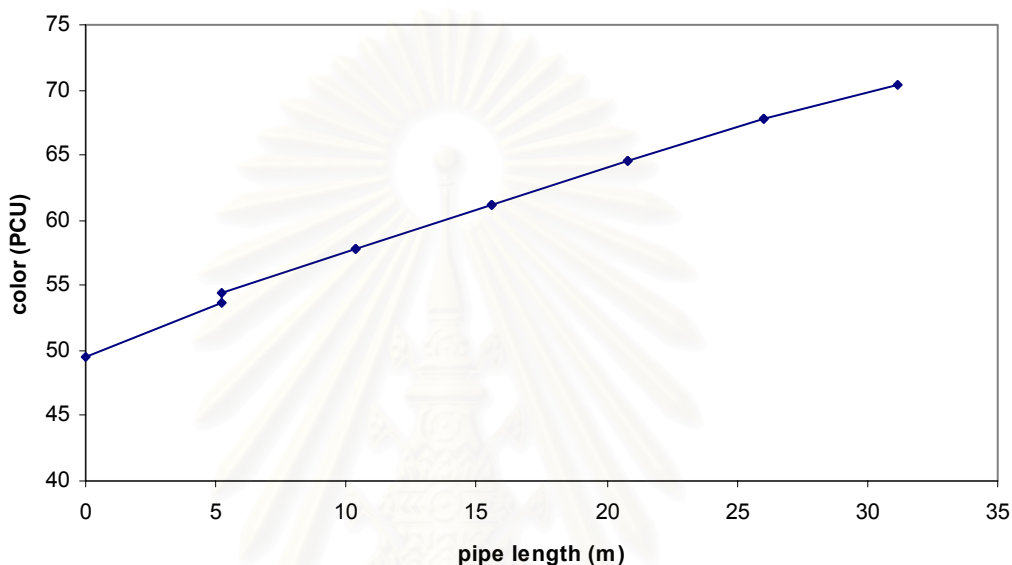
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โอโซนในน้ำกับระยะทางของท่อแนวระนาบ (ไม่คิดระยะทางท่อหมุนเวียน)

จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนของเหลวในระบบท่อแนวระนาบจากน้ำเป็นสารละลายกลีซิน สามารถวัดปริมาณ โอโซนในสารละลายที่ทางเข้าและทางออกของระบบได้ดังรูป 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โอโซนในสารละลายกลีซินที่ทางเข้า และทางออกของระบบท่อแนวระนาบกับจำนวนรอบของการไหลวนของสารละลายกลีซิน

จากการทดลอง ปริมาณไอโซนในสารละลายลิกนินที่ทางออกและทางเข้าของระบบท่อจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและจะมีค่าคงที่หลังผ่านการไหลวนกลับเข้าสู่ระบบรอบแรก ซึ่งปริมาณไอโซนที่วัดได้ในสารละลายลิกนินจะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณไอโซนในน้ำเนื่องจากไอโซนส่วนใหญ่จะถูกใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไอโซน และลิกนินที่ละลายอยู่ในสารละลาย โดยสังเกตได้จากสีของสารละลายลิกนินจะมีลักษณะเข้มขึ้นดังรูป

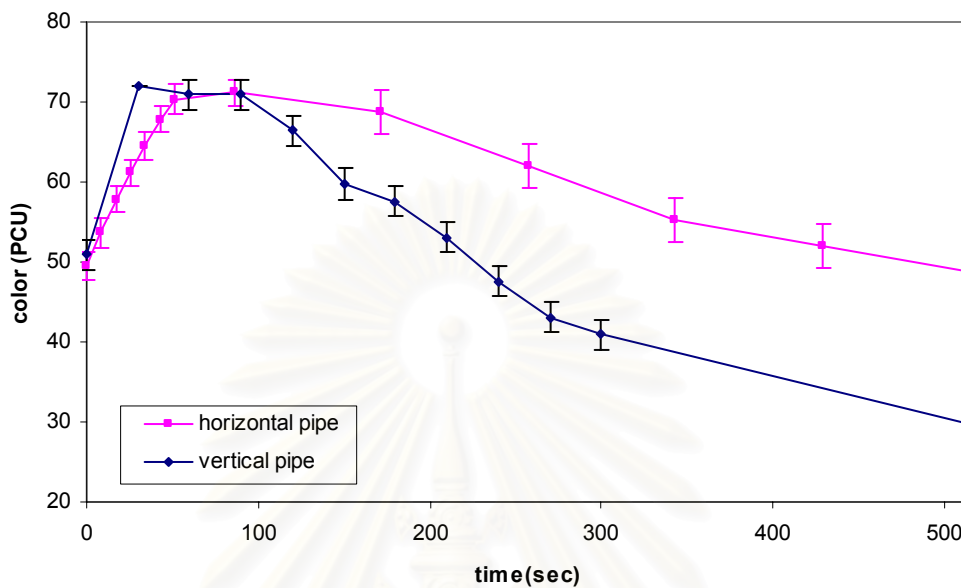


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินกับระยะทางของท่อแนวระนาบ (ไม่คิดระยะทางท่อหมุนเวียน)

ระหว่างหมุนเวียนสารละลายกลับ ปฏิกิริยาระหว่างไอโซนกับสารละลายลิกนินเกิดขึ้นน้อยมาก โดยพิจารณาจากผลต่างของปริมาณสีที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสีที่เปลี่ยนแปลงจากการเกิดปฏิกิริยาในระบบท่อแนวระนาบที่ติดตั้ง static mixer ดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นเราอาจสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่เกิดจากการหมุนเวียนสารละลายกลับมาทำปฏิกิริยาใหม่ ไม่มีอิทธิพลต่อผลการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดลองเปรียบเทียบปริมาณสีของสารละลายลิกนินหลังทำปฏิกิริยากับก๊าซไอโซนในระบบท่อแนวตั้งและแนวระนาบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของ static mixer จากลักษณะหอแป็คในท่อแนวตั้งเป็นลักษณะครีบบีพัดในท่อแนวระนาบเพื่อลดความดันตกในระบบ โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์จากเวลาที่ใช้ในระบบ (รูปที่ 4.35) พบว่าสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งจะมีสีเข้มขึ้นในช่วงแรกของการทดลองและจะค่อยๆจางลงเมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่สารละลายลิกนินในระบบท่อแนวระนาบจะมีสีเข้มขึ้นในช่วงแรกของการทดลองและจะค่อยๆจางลง แต่จะใช้ระยะเวลามากกว่า โดยสามารถอธิบายได้จากอัตราการถ่ายเทมวลสารของระบบท่อ

แนวตั้งซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบท่อแนวนอนเนื่องจากระบบแนวตั้งมีประสิทธิภาพในการผสมและพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับก๊าซมากกว่าระบบท่อแนวนอน



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งและแนวระนาบกับเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.2 การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของสารละลายลิกนินต่อการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน

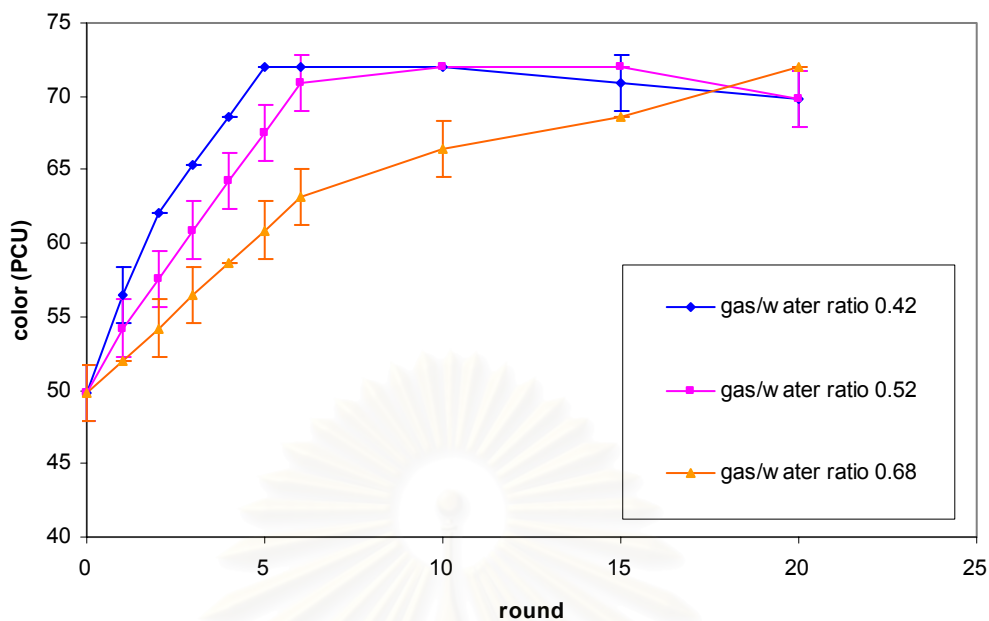
การศึกษาถึงผลของอัตราการไหลของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวระนาบต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนที่อัตราการไหลคงที่ได้ทำการทดลองโดยกำหนดอัตราการไหลของตัวอย่างสารละลายลิกนินที่ใช้ทำการทดสอบออกเป็น 3 ระดับ โดยตัวอย่างแรกมีอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของก๊าซโอโซนต่อสารละลายลิกนินเท่ากับ 0.42 ตัวอย่างที่สองอัตราส่วนเท่ากับ 0.52 และตัวอย่างสุดท้ายอัตราส่วนเท่ากับ 0.64 จากนั้นนำตัวอย่างทั้งสามมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนความเข้มข้นเท่ากับ  $9.016 \times 10^4$  ppm ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงที่อัตราการไหลเท่ากับ 13.56 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)		gas/water ratio
ก๊าซโอโซน	สารละลายลิกนิน	
13.56	32	0.42
13.56	26	0.52
13.56	20	0.64

ตารางที่ 4.5 อัตราการป้อนโอโซนและสารละลายลิกนินที่ใช้ในการทดลอง

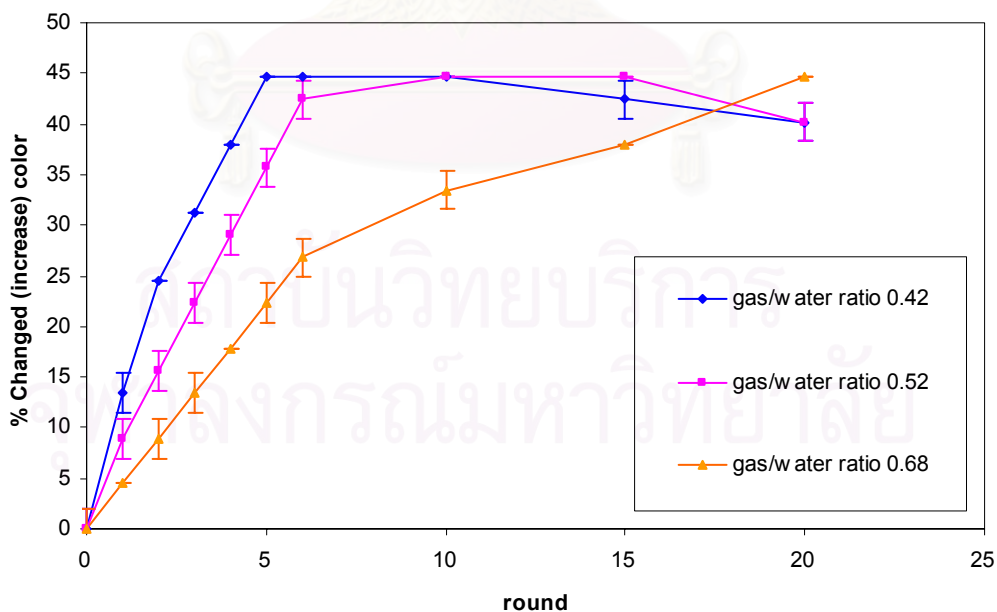
จากการทดลองเมื่อป้อนสารละลายลิกนินที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรแตกต่างกัน ลักษณะของสารละลายลิกนินในระบบท่อของทั้งสามตัวอย่างในช่วงเริ่มต้นการทดลองเมื่อมีการสัมผัสก๊าซโอโซนจะมีสีค่อยๆเข้มขึ้น (รูปที่ 4.36)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของสารละลายลิกนินที่อัตราส่วนของอัตราการใช้ระหว่างก๊าซไอโซนต่อสารละลายลิกนินต่าง ๆ กัน กับจำนวนรอบของการไหลวนเข้าสู่ระบบ

เมื่อนำค่าสีของตัวอย่างสารละลายลิกนินจากการทดลองมาคำนวณเป็นร้อยละของสีที่เปลี่ยนแปลงไป ได้ความสัมพันธ์ดังรูป 4.37

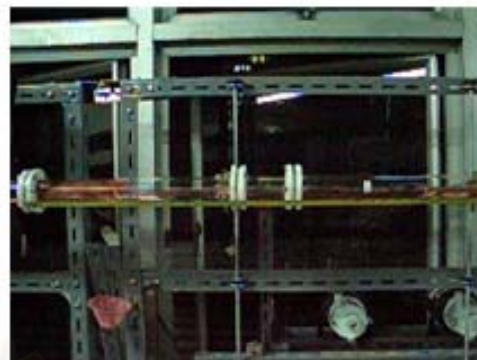


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนินที่อัตราส่วนของอัตราการใช้ระหว่างก๊าซไอโซนต่อสารละลายลิกนินต่าง ๆ กัน กับจำนวนรอบของการไหลวนเข้าสู่ระบบ

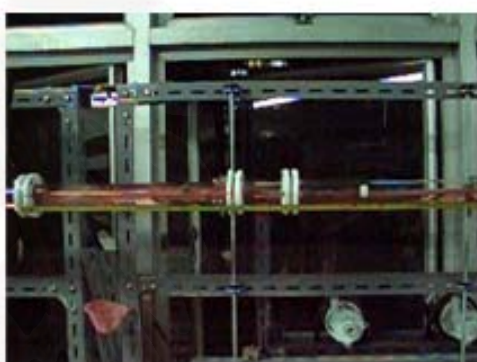




gas/liquid ratio 0.68



gas/liquid ratio 0.52



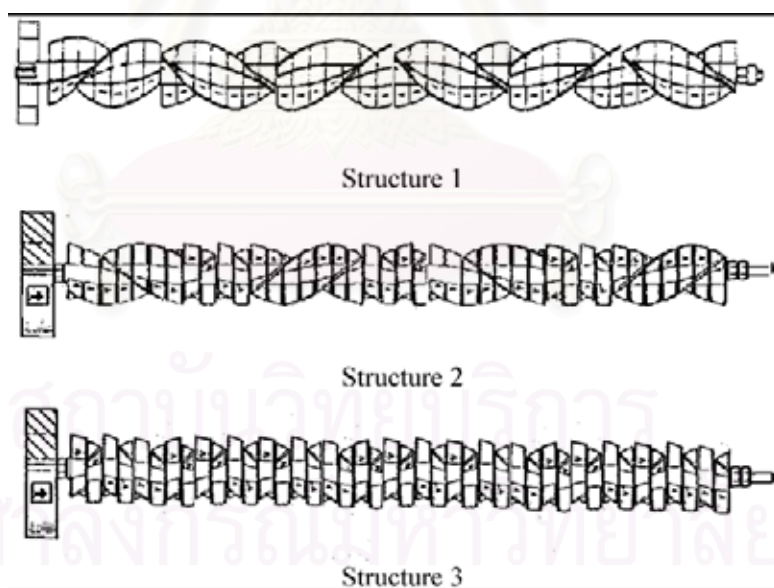
gas/liquid ratio 0.42



รูปที่ 4.38 ลักษณะการไหลของก๊าซไอโซนในระบบท่อแนวระนาบหลังผ่าน *static mixer* ที่สัดส่วนอัตราการไหลระหว่างก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.42, 0.52 และ 0.64

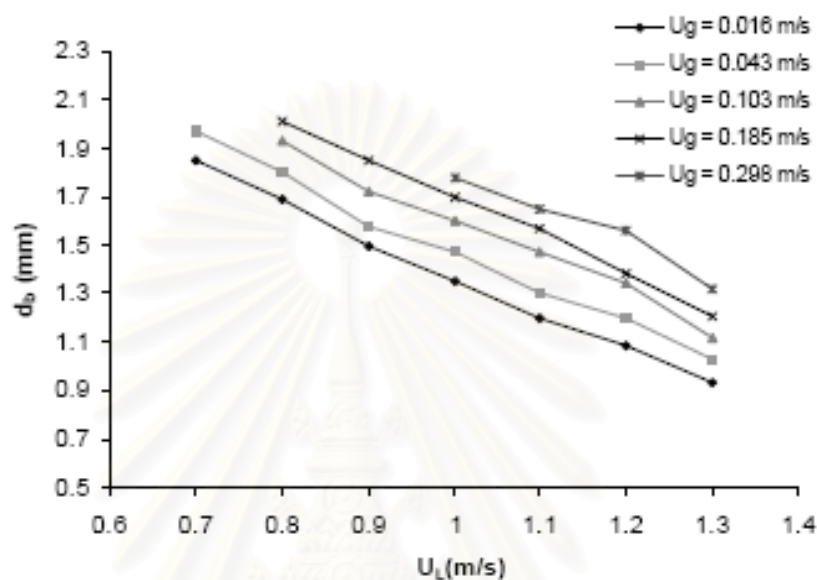
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนิน (รูปที่ 4.37) พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซโอโซนความเข้มข้น  $9.016 \times 10^4$  ppm ที่อัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างก๊าซโอโซนต่อสารละลายลิกนินเท่ากับ 0.42, 0.52 และ 0.64 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรกของการทดลองอัตราการเปลี่ยนแปลงสีจะมีค่าสูง แล้วจึงค่อยๆ ลดลงไปหลังการไหลวนกลับเข้าสู่ระบบประมาณ 6-8 รอบ จากการพิจารณาความชันของกราฟ อัตราเร็วของร้อยละของการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายลิกนินที่สัดส่วนอัตราการไหลระหว่างก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.42 จะมีค่าสูงสุด ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูปแบบของการผสมระหว่างเฟสก๊าซและของเหลวในระบบท่อแนวระนาบหลังผ่าน static mixer (รูปที่ 4.38)

ลักษณะการผสมของเฟสก๊าซและของเหลวที่อัตราส่วนการไหล 0.42 จะมีฟองก๊าซขนาดเล็กเป็นจำนวนมากไหลผสมกับของเหลว และสามารถไหลผสมไปได้ไกลที่สุดก่อนเกิดการแยกเฟสออกจากกัน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่จะเกิดการถ่ายเทมวลสูงมากยิ่งขึ้น นำมาซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลต่อหน่วยปริมาตรที่สูงกว่าอัตราส่วนการไหลก๊าซต่อของเหลวที่มีสัดส่วนสูงขึ้นไปสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Heyouni และคณะ [2002] ซึ่งศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการไหลผ่าน static mixer ต่อการถ่ายเทมวลระหว่างเฟส โดยมีรูปแบบของ static mixer ดังรูป

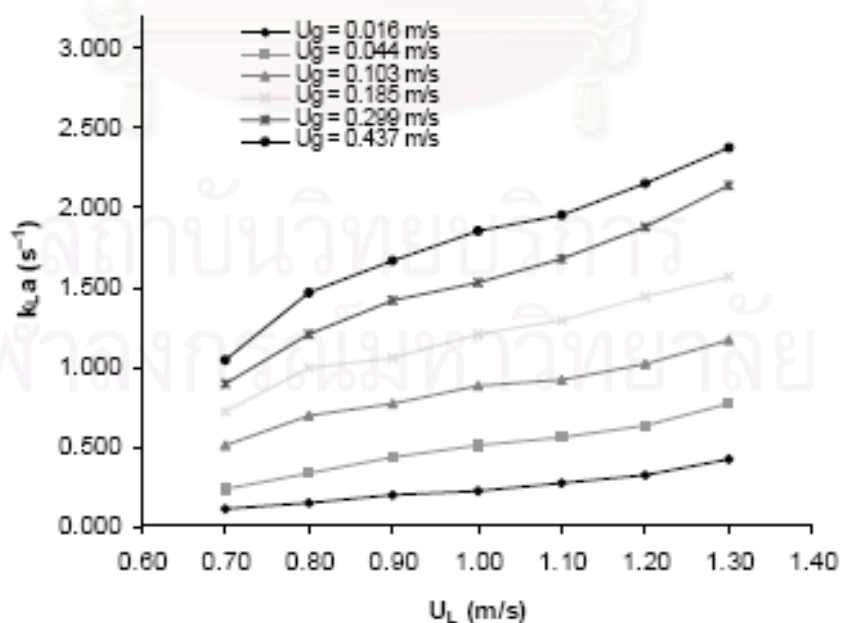


รูปที่ 4.39 ลักษณะของ *Lightnin static mixer* ที่ใช้ในการทดสอบ [Heyouni และคณะ, 2002]

จากผลงานวิจัย โดยพิจารณาถึงโครงสร้างลักษณะที่ 2 เมื่อป้อนของเหลวที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยกำหนดให้อัตราการไหลก๊าซคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของเหลว ฟองก๊าซที่แพร่กระจายจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง (รูปที่ 4.40) ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสที่จะเกิดการถ่ายเทมวลและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมีค่ามากขึ้นดังรูป 4.41



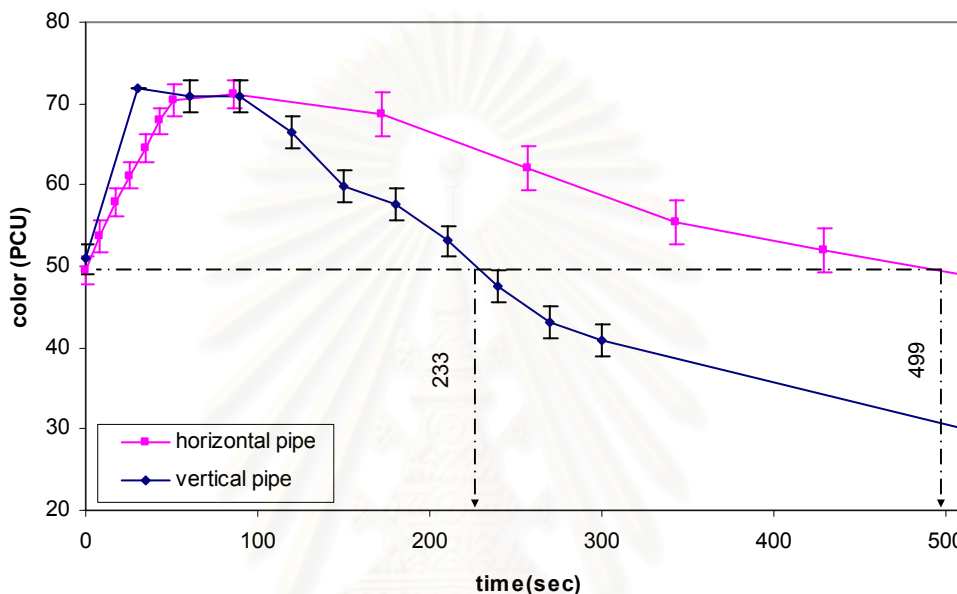
รูปที่ 4.40 อิทธิพลอัตราการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองก๊าซ [Heyouni และคณะ, 2002]



รูปที่ 4.41 อิทธิพลอัตราการไหลของเฟสของเหลวและเฟสก๊าซต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล [Heyouni และคณะ, 2002]

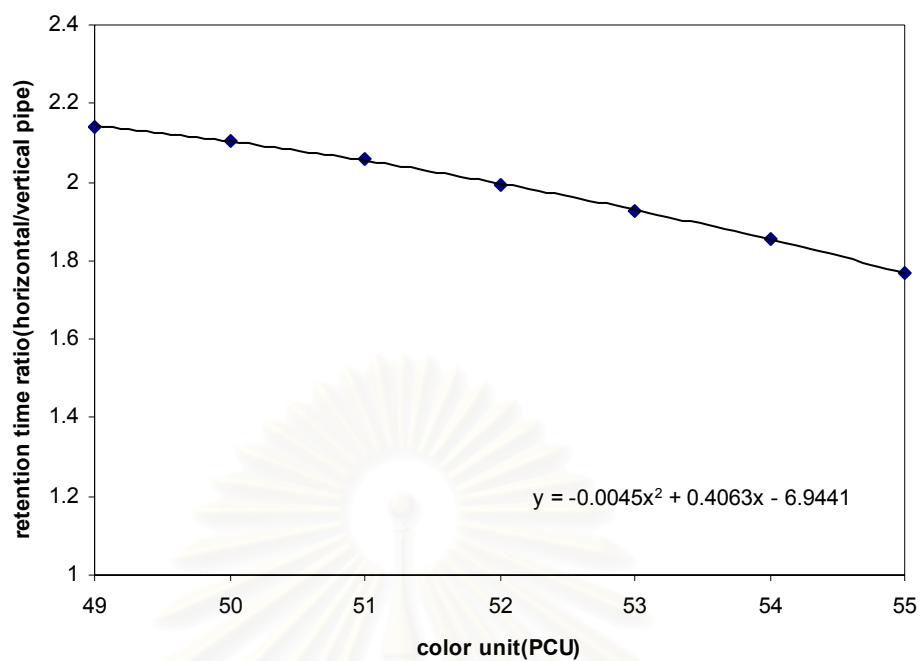
#### 4.4 การนำไปประยุกต์

รูปแบบของการวางระบบท่อในแนวตั้งและแนวระนาบ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซน ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์เปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละระบบโดยพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง และปริมาณสีที่ลดได้ของแต่ละระบบท่อที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากัน ดังรูป 4.42



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งและแนวระนาบกับเวลาที่ของไหลอยู่ในระบบ

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการลดสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้ก๊าซโอโซนความเข้มข้น  $9.016 \times 10^4$  ppm ซึ่งผลิตจากก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูงที่อัตราการไหลเท่ากับ 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้งจะใช้เวลาน้อยกว่าการทดลองในระบบท่อแนวระนาบประมาณ 2.14 เท่า ที่ตำแหน่งความเข้มข้นสีหลังเกิดปฏิกิริยา 49 PCU และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อเวลาการทำปฏิกิริยาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 4.43 การออกแบบกระบวนการกำจัดสีในระบบท่อแนวระนาบจะสามารถกระทำได้ง่ายโดยอาศัยผลการทดลองจากระบบท่อแนวตั้งในห้องปฏิบัติการได้



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการลดสีในระบบท่อแนวระนาบ และระบบท่อแนวตั้ง กับปริมาณสี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การกำจัดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างโอโซนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบโครงสร้างลิกนิน โดยในช่วงต้นโอโซนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Darkin หรือ Darkin-like reaction) กับโครงสร้างอะโรมาติกในหมู่ฟีนิล (phenyl group) เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะแบบควิโนน (quinone) ซึ่งมีสีน้ำตาล และทำให้ค่า chromophore index สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสีของสารละลายที่วัดได้มีปริมาณมากขึ้น ในขณะที่ค่าซีไอลดลง และเมื่อโครงสร้างควิโนนถูกออกซิไดซ์ความเข้มสีของสารละลายจึงเริ่มลดลง ในขณะที่ค่าซีไอก็ยังลดลงอย่างต่อเนื่อง

สำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ออกซิเดชันของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งพบว่าสีที่ปรากฏของลิกนินเกิดจากหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยากับโอโซนแตกต่างกัน เป็นเหตุให้ความเข้มข้นของสารละลายลิกนินส่งผลต่อปริมาณสีที่ลดลง ในขณะที่การถ่ายเทมวลสารของโอโซนส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการกำจัดสี โดยพิจารณาจากผลของความเข้มข้นของโอโซนในเฟสก๊าซ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟส

ในการทดสอบประสิทธิภาพในการลดสีของสารละลายลิกนินโดยโอโซนในระบบท่อแนวระนาบ พบว่ารูปแบบการไหลและการกระจายตัวของก๊าซโอโซนมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการลดสี จากการทดลองพบว่าหลังจากการป้อนสารละลายลิกนินและก๊าซโอโซนที่มีสัดส่วนอัตราการไหลระหว่างก๊าซและของเหลวต่ำไหลผ่าน static mixer จะมีช่วงเวลาในการผสมระหว่างเฟสก๊าซกับเฟสของเหลวก่อนแยกเฟสนานที่สุด และมีฟองก๊าซขนาดเล็กแพร่กระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทมวลสูงสุด ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าระบบที่มีสัดส่วนอัตราการไหลระหว่างก๊าซต่อของเหลวต่ำจะมีประสิทธิภาพในการลดสีสูงสุด เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายลิกนินส่งผลให้มีความปั่นป่วนในเฟสของเหลวสูงสุด

จากการศึกษาพฤติกรรมผลการลดสีระหว่างระบบท่อแนวตั้งและระบบท่อแนวระนาบ โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลาย และอัตราการไหลของก๊าซโอโซนเท่ากัน พบว่าการลดสีของสารละลายลิกนินในระบบท่อแนวตั้งจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบท่อแนวระนาบ เนื่องจากในระบบท่อแนวตั้งมีประสิทธิภาพในการผสม และการถ่ายเทมวลสูงกว่าในระบบท่อแนวระนาบ



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลการทดลองพบว่าพื้นที่ผิวและความปั่นป่วนในระบบท่อส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการลดสีของสารละลายลิกนิน ดังนั้นจึงควรมีการเพิ่มจำนวน static mixer มากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลให้มากยิ่งขึ้น โดยต้องมีการคำนึงถึงค่าความดันลด (pressure drop) ในระบบด้วย ดังนั้นในการนำไอโซนไปประยุกต์ใช้ในระบบท่อโรงงานอุตสาหกรรม ควรมีการทดลองเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการนำไปใช้โดยเทียบกับสถานะจริงในระบบท่อของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ชนิดและความเข้มข้นของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลาย ขนาดของท่อ และจำนวน static mixer



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- มันสิน ตันทุลเวศม์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- Alen Raimo. Forest Product Chemistry 3<sup>rd</sup>. Finland: Fapet Oy, 2000.
- Batterbee, J.E., and Bailey, P.S. Oxidation of Carbon-Hydrogen Bonds. Anthrone. Journal of Organic Chemistry. 32 (1967): 3899.
- Bernatek, E. and Frengen, C. Ozonololysis of Phenols. I. Ozonolysis of Phenol in Ethyl Acetate. Acta Chemica Scandinavica. 15 (1961): 471.
- Bernatek, E., Moskeland, J. and Valen, K. Ozonololysis of Phenols. II. Catechol, Resorcinol and Quinol. Acta Chemica Scandinavica. 15 (1961): 1454.
- Bernatek, E. and Frengen, C. Ozonololysis of Phenols. III. 1- and 2-Naphthol. Acta Chemica Scandinavica 15 (1962): 2421.
- Browning, B.L. The Chemistry of Wood. Florida: Robert E. Krieger Publishing company, 1981
- Dilek, FB. and Bese, S. Treatment of pulping effluents by using alum and clay-Co lour removal and sludge characteristic. Water SA 27 (July 2001): 361-366.
- Eisenhauer, H.R. The Ozonation of Phenolic Wastes. Journal of the Water Pollution Control Federation 40 (1968)
- Eisenhaure, H.R. Increased Rate and Efficiency of Phenolic Waste Ozonation. Journal of the Water Pollution Control Federation 48 (1971): 201.
- El-Din, M.G. and Smith, D.W. Ozonation of Kraft pulp mill effluents: process dynamics. J. Environ. Eng. Sci 1 (2002): 45-57.
- Erickson, R.E., Bakalik, D., Richards, C., Scanlon, M. and Huddleston, G. Mechanism of the Reactions. II. Aldehydes. Journal of Organic Chemistry 31 (1966): 461.
- Erickson, R.E., Hansen, R.T., and Harkins, J. 1968. Mechanism of Ozonation Reactions. III. Ethers. Journal of The American Chemical Society 90 (1968): 6777.
- Hamilton, G.A., Ribner, B.S. and Hellman, T.M. The Mechanism of Alkane Oxidation by Ozone. Advances in Chemistry Series, No. 77. American Chemical Society. Washington, D.C.: 15 (1968)
- Hartler, N. and Norrstrom, H.; Light-absorbing properties of pulp and pulp components. III. Kraft pulp. Tappi 52 9 (1969): 1712-1715

- Heyouni, A., Roustan, M. and Do-Quang, Z.; Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flow through static mixers. Chemical Engineering Science 57 (2002): 3325-3333
- McGrouther, K.G.; Pasco, M.F. and Suckling, I.D.; Chromophore changes during chemical pulp bleaching. A study by absorption spectroscopy. In Proceedings of the 8th International Symposium on Wood and Pulping Chemistry. Helsinki, Finland. (1995): 85-90
- Miller, B. Regis. Wood handbook-Wood as an engineering material. U.S.: Department of Agriculture Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999.
- Paremanee Nilapha. Lignin Removal from Puling Process waste water By ULTERFILTRATION. Master's thesis, Department of environmental engineering, AIT, 1997
- Sarkanen, K.V. and Ludwig, C.H. Lignin: Occurrence, Formation, Structure and Reactions. ed. Sarkanen, K.V. and Ludwig, C.H. Wiley-Interscience: New York. 916 pp. (1971).
- Schuberrt, C.C., S.J. and Pease, R.N. The Oxidation of Lower Paraffin Hydrocarbons. II. Observations on the Role of Ozone in the Slow Combustion of Isobutene. Journal of The American Chemical Society 78 (1956): 2044
- Syrov, A.A., and Tsyskovski, V.K. 1970. Mechanism of the Action of Ozone on Aldehydes; The Course of Ozonation of Ethers. Journal of Organic Chemistry of the USSR 6 (1970): 1406.
- Thomas, B.J. Wood: Structure and Chemical Composition. Washington, D.C.: North Carolina State University, 1977.
- White, H.M. and Bailay, P.S. Ozonation of Aromatic Aldehydes. Journal of Organic Chemistry 30 (1965): 3037.
- Whiting, M.C., Bolt, A.J.N. and Parish, J.E. The Reaction Between Ozone and Saturated Compounds. Advances in Chemistry Series, No. 77. American Chemical Society. Washington, D.C.: 4. (1968)
- Wingard, L.B. Jr. and Finn, R.K. Oxidation of Catechol to cis, cis-Muconic Acid with Ozone. Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development 8 (1969): 89.
- Wirojanagud Wanpen, Supachaisakorn Narutchai and Boonpoke Anusorn. Removal of organic matter contaminated pulp and paper industrial wastewater by soil. Master's thesis, Depart of environmental engineering, Khon Kaen University, 2002
- Zhou Hongde and Smith, W. Daniel. PROCESS PARAMETER DEVELOPMENT FOR OZONATION OF KRAFT PULP MILL EFFLUENTS. Wat.Sci.Tech. , 35(2-3) (1997): 251-259.

ภาคผนวก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ขั้นตอนการทดลอง

1. การศึกษามาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเทียบวัด ได้แก่ กระบวนการสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยการใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (NCSI Method color 71.01,1999) และการวิเคราะห์ Chemical oxygen demand (COD)
  - 1.1. สร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสี และค่าดูดกลืนแสง (absorbance) จากสารละลายตัวอย่าง ตามมาตรฐานกระบวนการสีจากสารละลายลิกนินในน้ำโดยการใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (NCSI Method color 71.01,1999) (ภาคผนวก ค.)
  - 1.2. สร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) และค่าการดูดกลืนแสง (ภาคผนวก ข.)
  
2. การศึกษากระบวนการกำจัดสีของสารละลายลิกนิน โดยใช้โอโซนในระบบถังปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อแก้วแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.72 เซนติเมตร โดยแบ่งการพิจารณาได้เป็น
  - 2.1. ผลของความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่อการลดสีของสารละลายลิกนิน
    - 2.1.1. ผ่านก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ลงในตัวอย่างสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในระบบท่อแนวตั้ง
    - 2.1.2. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ระยะเวลาต่างๆ กัน
    - 2.1.3. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
    - 2.1.4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2.1.1 ถึง 2.1.3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของก๊าซโอโซนเป็นก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากอากาศ
  
  - 2.2. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายลิกนินต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน
    - 2.2.1. ผ่านก๊าซโอโซนซึ่งผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ลงในตัวอย่างสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในระบบท่อแนวตั้ง

- 2.2.2. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ระยะเวลาต่างๆ กัน
- 2.2.3. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการให้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
- 2.2.4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2.2.1 ถึง 2.2.3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายลิกนินเป็น 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 2.3. ผลของอัตราการไหลของก๊าซไอโซนต่อประสิทธิภาพของกระบวนการลดสีของสารละลายลิกนิน
- 2.3.1. ผ่านก๊าซไอโซนซึ่งผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ลงในตัวอย่างสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในระบบท่อแนวตั้ง
- 2.3.2. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ระยะเวลาต่างๆ กัน
- 2.3.3. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการให้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
- 2.3.4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2.3.1 ถึง 2.3.3 โดยเปลี่ยนความอัตราการไหลของก๊าซไอโซนเป็น 4.9 และ 23.75 ลิตรต่อนาที
- 2.4. ประสิทธิภาพของกระบวนการลดสี เมื่อมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารละลายลิกนินและก๊าซไอโซน
- 2.4.1. ผ่านก๊าซไอโซนซึ่งผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ลงในตัวอย่างสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ในระบบท่อแนวตั้ง
- 2.4.2. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ระยะเวลาต่างๆ กัน
- 2.4.3. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการให้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
- 2.4.4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 2.3.1 ถึง 2.3.3 โดยติดตั้ง static mixer ในระบบท่อ



3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินด้วยโอโซนในระบบท่อแวนระนาบ
  - 3.1. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินด้วยโอโซนในระบบท่อแวนระนาบเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดสีในระบบท่อแวนตั้งโดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีและเวลาที่ใช้ในการทดลอง
    - 3.1.1. ป้อนสารละลายลิกนินที่ทราบความเข้มข้นเข้าสู่ระบบท่อแวนระนาบที่อัตราการไหลคงที่
    - 3.1.2. ทำการเติมโอโซนที่เตรียมจากก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าสู่ระบบที่อัตราการไหลคงที่
    - 3.1.3. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ทางออกของท่อในแต่ละรอบ
    - 3.1.4. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการใช้นิเทศนิกสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
    - 3.1.5. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับกระบวนการลดสีในระบบท่อแวนตั้ง
  - 3.2. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีจากสารละลายลิกนินด้วยโอโซนในระบบท่อแวนระนาบโดยพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดสีและสัดส่วนอัตราการไหลระหว่างโอโซนและสารละลายลิกนิน
    - 3.2.1. ป้อนสารละลายลิกนินที่ทราบความเข้มข้นเข้าสู่ระบบท่อแวนระนาบที่อัตราการไหลคงที่
    - 3.2.2. ทำการเติมโอโซนที่เตรียมจากก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าสู่ระบบที่อัตราการไหลคงที่
    - 3.2.3. เก็บตัวอย่างสารละลายในท่อที่ระยะต่างๆกัน
    - 3.2.4. วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของสีจากลิกนินที่เจือปนในตัวอย่างโดยการใช้นิเทศนิกสเปกโทรโฟโตเมตรี (ภาคผนวก ค.), Kappa Number ตามมาตรฐาน Tappi T 236 (ภาคผนวก ง.) และปริมาณ Chemical oxygen demand (COD) ที่เจือปนอยู่ในตัวอย่าง (ภาคผนวก ข.)
    - 3.2.5. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 3.3.1 ถึง 3.3.4 โดยเปลี่ยนสัดส่วนอัตราการไหลระหว่างโอโซนและสารละลายลิกนินโดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายลิกนิน

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ซีโอดี(COD)

การวิเคราะห์หาซีโอดีเป็นวิธีวิเคราะห์หาความสกปรกของน้ำเสียต่างๆ โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในปฏิกิริยาออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียเพื่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลปฏิกิริยาสุดท้าย นอกจากนี้พวกกรดอะมิโนในโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียในโตรเจน เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดีคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing Agent) อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง หลักการของซีโอดีจะคล้ายกับบีโอดีคือ สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เพียงแต่บีโอดีต้องใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วนซีโอดีใช้ออกซิไดซิงเอเจนต์ ซีโอดีและบีโอดีต่างเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำ แต่ซีโอดีไม่สามารถจะบอกได้ถึงความยากง่ายในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์ได้หมดหรือเกือบหมดไม่ว่าจะสามารถออกซิไดส์ได้ทางชีวภาพหรือไม่ แม้กระนั้นซีโอดีก็มีข้อดีที่ใช้เวลาในการหาเพียง 3 ชม. ในขณะที่การหาบีโอดีใช้เวลาถึง 5 วัน มีตัวแปรผันน้อยกว่า ค่าที่ได้มีความแน่นอนน่าเชื่อถือกว่าและสารมีพิษไม่ขัดขวางการหาซีโอดี โดยปกติซีโอดีมักมีค่าสูงกว่าบีโอดี อัตราส่วนของค่าซีโอดีและค่าบีโอดีสำหรับน้ำเสียชนิดต่างๆ มีค่าไม่เท่ากันเพราะส่วนประกอบของน้ำเสียไม่เหมือนกัน อัตราส่วนระหว่างบีโอดีและซีโอดี (BOD:COD) อาจเป็นไปได้ตั้งแต่ 0.1-0.8 แต่ไม่เกิน 1 บีโอดี

ซีโอดีมีประโยชน์สรุปได้ดังนี้

1. ถ้าใช้พิจารณาพร้อมกับค่าบีโอดี ทำให้บอกได้ว่าน้ำเสียนั้นมีแนวโน้มในการย่อยสลายโดยทางชีววิทยาได้ยากหรือง่ายเพียงใด
2. ใช้ในการประมาณค่าบีโอดีอย่างคร่าว ๆ ถ้ารู้แหล่งกำเนิดหรือที่มาของตัวอย่างน้ำ
3. เป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย
4. เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย
5. ใช้บอกความสกปรกของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ หรือจากบ้านเรือนได้
6. ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าบีโอดีอาจสามารถบอกได้ว่าน้ำนั้นมิใช่สารเป็นพิษหรือไม่

วิธีวิเคราะห์ซีโอดีโดยใช้ไดโครเมตเป็นออกซิไดซิงเอเจนต์ มี 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux Method)
2. วิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Close Reflux Method)

วิธีรีฟลักซ์แบบเปิดเหมาะสำหรับหาค่าซีโอดีในช่วงกว้างๆ ต้องการใช้ปริมาณตัวอย่างมาก ส่วนวิธีรีฟลักซ์แบบปิดจะใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า และจะประหยัดการใช้สารเคมี แต่ก็เหมาะสมกับตัวอย่างน้ำที่มีสารแขวนลอยที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีรีฟลักซ์ยังแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การไตเตรตและการเทียบสี

### A. วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux Method)

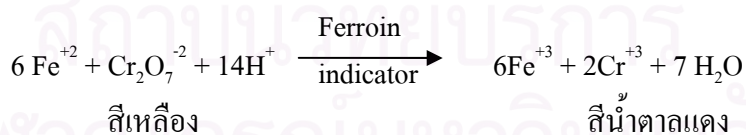
#### ก. หลักการ

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลังจากรีฟลักซ์ วัดปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลือโดยนำไปไตเตรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulfate) และใช้เฟอโรอิน (Ferrouin) เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ทราบปริมาณของโปแตสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ ปฏิกริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

1. เมื่อรีฟลักซ์ด้วย  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$



2. หาปริมาณ  $\text{Cr}^{2-}$  ที่เหลือโดยการไตเตรตด้วย FAS มีเฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์



$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{+2}$  (FAS) ไดโครมิก ( $\text{Cr}^{+3}$ ) จนหมด แล้ว  $\text{Fe}^{+2}$  จึงทำปฏิกิริยากับเฟอโรอินได้สารประกอบสีนํ้าตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไตเตรต

## ข. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าซีโอดีที่ได้จากการวิเคราะห์

ผลกระทบที่มีต่อการวัดค่าซีโอดีมี 2 ทาง คือ ทำให้วัดค่าซีโอดีได้สูงและทำให้วัดค่าซีโอดีได้ต่ำ ในที่นี้ต้องเข้าใจตรงกันว่า ค่าซีโอดีที่ต้องการคือซีโอดีของสารอินทรีย์ (เพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับค่าบีโอดี)

### ข.1 พารามิเตอร์ที่ทำให้วัดค่าซีโอดีได้ต่ำ

โดยปกติแล้ว การวิเคราะห์ซีโอดีใช้สารไดโครเมตซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดส์สูงมาก และเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและอุณหภูมิสูง ดังนั้นแทบจะไม่มีสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยไดโครเมต อย่างไรก็ตาม สารอินทรีย์บางตัว เช่น กรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยไดโครเมต การแก้ไขกระทำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ )

### ข.2 พารามิเตอร์ที่ทำให้วัดค่าซีโอดีได้สูง

การวัดซีโอดีของน้ำเสียเป็นการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารรีดิวซิงเอเจนต์ที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) โดยมีไดโครเมตเป็นสารให้อิเล็กตรอน พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นรีดิวซิงเอเจนต์จะถูกวัดเป็นค่าซีโอดีทั้งหมด ปัญหาเกิดขึ้นเพราะสารรีดิวซิงเอเจนต์เป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ (ที่ต้องการวัดเป็นซีโอดี) และสารอนินทรีย์บางตัว (ที่ไม่ต้องการวัดเป็นซีโอดี) เช่น คลอไรด์ ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) เหล็กเฟรัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ซัลไฟด์ ( $\text{S}^{2-}$ ) ฯลฯ ดังนั้นถ้าในน้ำเสียที่มีรีดิวซิงเอเจนต์ที่เป็นสารอนินทรีย์รวมอยู่ด้วย ค่าซีโอดีที่ได้จึงเป็นค่าซีโอดีเนื่องจากสารอินทรีย์ด้วย ตามทฤษฎี ค่าซีโอดีที่ได้จากคลอไรด์ ซัลไฟด์ ไนไตรต์และเหล็ก เป็นดังนี้

คลอไรด์	1	มก./ล.	ให้ค่าซีโอดี	0.3	มก. /ล.
ซัลไฟด์	1	มก./ล.	ให้ค่าซีโอดี	2	มก./ล.
ไนไตรต์	1	มก./ล.	ให้ค่าซีโอดี	1.1	มก./ล.
เหล็กเฟรัส	1	มก./ล.	ให้ค่าซีโอดี	0.14	มก./ล.

การแก้ไขซัลไฟด์กระทำได้โดยไล่ซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียหรือน้ำทิ้งก่อนวิเคราะห์หาซีโอดี การไล่ซัลไฟด์กระทำได้โดยปรับพีเอชของตัวอย่างน้ำให้มีค่าต่ำเพื่อให้ซัลไฟด์ละลายน้ำกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อิสระที่สามารถไล่ออกจากน้ำได้ง่าย ส่วนการกำจัดไนไตรต์สามารถแก้ไขได้โดยการเติมกรดซัลฟามิก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อทุกๆ มิลลิกรัมของไนไตรต์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย แต่เนื่องจากในน้ำมักจะมีปริมาณไนไตรต์น้อยมากจนอาจไม่ต้องคำนึงถึงก็ได้

การแก้ไขคลอไรด์โดยการเติม  $\text{HgSO}_4$  ลงในตัวอย่างน้ำก่อนเติมน้ำยาเคมีอื่นเพื่อให้  $\text{Hg}^{2+}$  ไปรวมกับ  $\text{Cl}^-$  เกิดเป็น  $\text{HgCl}_2$  ซึ่งเป็นสารที่แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมาก ดังนั้นจึงมีไอออนคลอไรด์อยู่ในตัวอย่างน้ำน้อยมากไม่สามารถไปรบกวนโคโครเมตได้ สำหรับปริมาณ  $\text{HgSO}_4$  ที่จะใช้เติมสำหรับตัวอย่างน้ำที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์น้อยกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ใช้  $\text{HgSO}_4$  1 กรัมต่อตัวอย่างน้ำ 50.0 มิลลิกรัม เพื่อสร้างสารเชิงซ้อน (Complex) กับคลอไรด์ 100 มิลลิกรัม ถ้าใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำน้อยกว่านี้ ให้ลดปริมาณ  $\text{HgSO}_4$  ลงตามความเข้มข้นของคลอไรด์ที่มีในปริมาณตัวอย่างที่ใช้ โดยรักษาอัตราส่วนของ  $\text{HgSO}_4:\text{Cl}$  ให้เท่ากับ 10:1 เช่น ถ้าใช้ตัวอย่าง 10 มิลลิกรัม จะต้องใช้  $\text{HgSO}_4$  0.2 กรัม ( $\text{HgSO}_4$  200 มิลลิกรัม :  $\text{Cl}$  20 มิลลิกรัม)

วิธีการไล่ซัลไฟด์ละลายน้ำออกจากตัวอย่างน้ำ ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างน้ำที่จะนำมาวิเคราะห์ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำมาเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 หยด และนำไปเขย่าโดยใช้เครื่อง Shaker ที่ความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที การตรวจสอบอย่างง่ายสามารถทำได้โดยการดมกลิ่นของตัวอย่างน้ำ ถ้ามีกลิ่นฉุนออกเปรี้ยวและไม่มิกลิ่นของก๊าซไข่เน่า จะต้องเพิ่มเวลาในการเขย่าจนไม่ได้กลิ่นก๊าซไข่เน่าแล้ว จึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่าซีโอซีตามปกติ

#### ค. การเก็บและรักษาตัวอย่าง

ควรเก็บตัวอย่างน้ำใส่ในขวดแก้วและนำมาวิเคราะห์ทันที แต่ถ้าไม่สามารถจะทำได้ ควรแช่เย็นไว้ก่อนหากไม่สามารถวิเคราะห์ภายใน 1 วัน ให้เติมกรดซัลฟูริกจนตัวอย่างน้ำมีพีเอชน้อยกว่า 2

#### ง. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดเออร์เลนเมเยอร์ ขนาดความจุ 250 – 500 มิลลิลิตร ซึ่งมีปากขวดเป็นแบบ Ground-Glass Joint ขนาด 24/40
2. เครื่องควมแน่นหรือคอนเดนเซอร์ ซึ่งมี Jacket ขนาด 300 มิลลิเมตร และต่อได้พอดีกับขวดเออร์เลนเมเยอร์
3. เตาแผ่น (Hot Plate) ซึ่งสามารถให้ความร้อนได้อย่างน้อย 1.4 วัตต์/ตร.ซม. ที่ผิวหน้าเตา
4. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร



จ. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต (Standard Potassium Dichromate Solution) 0.25 นอร์มัล

ละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ซึ่งอบแห้งที่  $103^\circ C$  เป็นเวลา 2 ชม. หนัก 12.259 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเติมกรดซัลฟามิก 120 มิลลิกรัม ละลายให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในขวดตวง

2. กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต

ซิงซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1–2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมด ก่อนนำไปใช้ต่อไป

3. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroun Indicator Solution)

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทโรลีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline Monohydrate,  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) 1.485 กรัมและเฟอรัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 695 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Standard FAS) 0.05 นอร์มัล

ละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) 19.6 กรัม ในน้ำกลั่นเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร แล้วเจือจางเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เนื่องจากความเข้มข้นของเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) ไม่คงที่และจะลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นต้องหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกวันที่ใช้ เทียบกับสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ดังนี้ ปิเปิดสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 5.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น ไตเตรตด้วยเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ จุดยุติเป็นสีน้ำตาลแดง จดปริมาตร FAS ที่ใช้

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล (N)} = \frac{5.0 \times 0.25}{\text{มล. FAS ที่ใช้}}$$

5. เมอคิวริก ซัลเฟต (Mercuric Sulfate,  $HgSO_4$ ) เป็นผลึกหรือผง



### ฉ. วิธีวิเคราะห์

1. เติมตัวอย่างน้ำที่จะวิเคราะห์ 10 มิลลิลิตร หรือใช้ตัวอย่างน้ำน้อยกว่า แต่เติมน้ำกลั่นให้เป็น 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรีฟลักซ์ เติมเมอคิวริกซัลเฟต 0.2 กรัม ใส่ลูกแก้วขนาดจิว 5-6 เม็ด แล้วจึงเติมสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 5.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน
2. นำขวดรีฟลักซ์ในข้อ 1 ไปต่อกับเครื่องรีฟลักซ์ เปิดน้ำหล่อเย็นเติมกรดซัลฟูริก-ซิลเวอร์ซัลเฟต 15 มิลลิลิตร ลงที่ปากคอนเดนเซอร์ซึ่งกรดซัลเฟตจะไหลไปยังขวดรีฟลักซ์เอง เปิดไฟแล้วรีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชม. เมื่อครบ 2 ชม. นำขวดรีฟลักซ์ออกและทำให้เย็น
3. ทำแบลนด์พร้อมกับตัวอย่างน้ำโดยใช้น้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร สารเคมีต่างๆ ใช้เท่ากับตัวอย่างน้ำทำการรีฟลักซ์เช่นเดียวกับตัวอย่างน้ำทุกประการ
4. เมื่อรีฟลักซ์ครบ 2 ชม. แล้วปิดไฟ ทิ้งให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นลงที่ปากเครื่องรีฟลักซ์ 40 มิลลิลิตร เพื่อล้างไอสารภายในคอนเดนเซอร์ แล้วจึงปิดน้ำหล่อเย็น
5. นำขวดรีฟลักซ์ขั้นตอนที่ 4 มาไตเตรตหาปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลือด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอร์โรอินประมาณ 2-3 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ ควรใช้ปริมาณอินดิเคเตอร์เท่าๆ กันทุกตัวอย่าง จุดยุติจะมีการเปลี่ยนแปลงจากเหลืองเป็นฟ้าอมเขียวและเป็นสีน้ำตาล จดปริมาตร FAS ที่ใช้ไตเตรต

### ช. การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัม O}_2 / \text{ลิตร} = \frac{(A-B) * N * 8000}{\text{มล. ตัวอย่างที่ใช้}}$$

- เมื่อ
- A = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตแบลนด์
  - B = มิลลิลิตรของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง
  - N = ความเข้มข้นของ FAS เป็นนอร์มัลลิตี

### ซ. ข้อเสนอน้ำและข้อควรระวัง

ถ้าต้องการหาซีโอดีที่มีต่ำๆ (น้อยกว่า 50 มก./ล.) ควรลดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $K_2Cr_2O_7$  เหลือ 0.025 นอร์มัล และสารละลายมาตรฐาน FAS เหลือ 0.01 นอร์มัล การวิเคราะห์ต้องทำด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะสารอินทรีย์จำนวนเล็กน้อยที่ติดอยู่กับเครื่องแก้วหรือจากบรรยากาศก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ สำหรับการวิเคราะห์น้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูงๆ เช่น น้ำทะเล ต้องเติม  $HgSO_4$  เพิ่มจนเกินพอ

## B. วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบไตเตรตชัน

### ก. หลักการ

มีหลักการเช่นเดียวกับวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด แต่จะรีฟลักซ์ในหลอดแก้วที่มีฝาแก้วที่มีฝาเกลียวปิดใส่อยู่ในเตาที่มีอุณหภูมิ  $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$  โดยไม่ต้องใช้คอนเดนเซอร์

### ข. สิ่งรบกวนการวิเคราะห์

เหมือนการรีฟลักซ์แบบเปิด แต่การรีฟลักซ์แบบปิดสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ระเหยได้อย่างสมบูรณ์

### ค. การเก็บและรักษาตัวอย่าง

วิธีการเก็บและรักษาตัวอย่างเช่นเดียวกับวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิด

### ง. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (*Digestion Vessels*) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ซึ่งใช้เลี้ยงเชื้อขนาด  $16 \times 100$  หรือ  $20 \times 150$  หรือ  $25 \times 150$  มม. มีฝาพลาสติกเกลียวซึ่งทำด้วย TFE

2. เตาหลอด (*Heater Block*) เตาหลอดหรือเตาซีโอดี (COD Reactor) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับหลอดแก้วโดยเฉพาะ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่  $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$  หรืออาจใช้บล็อกวางบนเตาแผ่นก็ได้ บล็อก (Block) ใช้สำหรับใส่หลอดแก้ว ทำด้วยอะลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45-50 มม. การให้ความร้อนเพื่อต้มย่อยสลายกระทำโดยวางบล็อกบนเตาแผ่นหรืออาจใช้เตาอบในข้อ 3 ก็ได้

3. เตาอบ (*oven*) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ  $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$

4. บิวเรต

5. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มิลลิลิตร

### จ. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ซึ่งอบแห้งที่  $103^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชม.หนัก 4.913 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดกำมะถันเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายปล่อยให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

2. กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต

ซังซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมด ก่อนนำไปใช้ต่อไป

### 3. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.05 นอร์มัล

ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) 19.6 กรัมในน้ำกลั่น เดิมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตรแล้วเจือจางเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

### 4. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

ละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous Sulfate,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 695 มิลลิกรัมและ 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline Monohydrate,  $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) 1.485 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

### วิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย FAS

ปิเปตสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล 5.0 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปกรวยเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วจึงค่อยๆเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น เติมเฟอโรอิน 2-3 หยด ไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS จนได้สีน้ำตาลเป็นจุดยุติ

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS, นอร์มัล (N)} = (5.0 \times 0.1) / \text{มล. FAS ที่ใช้}$$

### 5. กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid)

ใช้สำหรับป้องกันการรบกวนของไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ปริมาณที่ใช้คือ 10 มก. ต่อทุกๆ 1 มิลลิกรัม ของไนไตรต์

### 6. สารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)

บด เคเอชพี (KHP) เพื่อลดขนาดลงและนำไปอบที่อุณหภูมิ  $103^\circ\text{C}$  จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วละลาย KHP ที่บดและอบแห้งแล้ว 425 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีซีไอดีเท่ากับ 500 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเก็บรักษาในตู้เย็นได้นานไม่เกิน 3 เดือน

### 7. สารละลายกลูโคส

ละลายกลูโคส 486.6 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้จะมีค่าซีไอดี เท่ากับ 500 มิลลิกรัม/ลิตร (กลูโคส 1 กรัม จะให้ซีไอดี 1.067 กรัม) สารละลายกลูโคสจะไม่ค่อยคงตัวเพราะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว

## ฉ. วิธีวิเคราะห์

ต้องล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดกำมะถัน 20% เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน

### 1. การเลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีโอดีที่เหมาะสม

ถ้าตัวอย่างน้ำมีซีโอดีต่ำให้เลือกใช้หลอดแก้วขนาด 25×150 มม. (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร) ถ้าซีโอดีค่อนข้างสูงให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20×150 มม. (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 5 มิลลิลิตร) และถ้าซีโอดีสูงสามารถใช้หลอดแก้วขนาด 16×100 มม. (ปริมาตรตัวอย่างน้ำ 2.5 มิลลิลิตร) ในที่นี้ขอแนะนำว่าไม่จำเป็นต้องใช้หลอดหลายขนาดใช้เพียง 2 ขนาดคือ 25×150 มม. สำหรับหาซีโอดีที่มีค่าต่ำและขนาด 20×150 มม. สำหรับหาซีโอดีที่มีค่าสูง ถ้าตัวอย่างมีค่าสูงมากก็ให้เจือจางตัวอย่างน้ำก่อน

### 2. การเลือกปริมาตรตัวอย่างน้ำ

ถ้าเป็นน้ำสะอาด น้ำธรรมชาติหรือน้ำที่มีค่าซีโอดีต่ำๆ (<40 มิลลิกรัม/ลิตร) ควรใช้ตัวอย่างน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดแก้วขนาด 25×150 มม. แต่ถ้ามีค่าซีโอดีสูงกว่านั้นให้ใช้หลอดแก้วขนาด 20×150 มม. โดยเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำมากที่สุด 5 มิลลิลิตร หรือใช้น้อยกว่าแล้วเติมน้ำกลั่นให้เป็น 5 มิลลิลิตร และถ้าตัวอย่างน้ำมีค่าซีโอดีสูงมากต้องเจือจางตัวอย่างน้ำก่อนนำมาใช้ และควรประมาณค่าซีโอดีของตัวอย่างคร่าวๆก่อนเพื่อที่จะได้เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม การประมาณค่าซีโอดีสามารถทำได้โดยพิจารณาจากลักษณะตัวอย่างน้ำแหล่งที่มาของน้ำ และจากค่า Rapid COD การเลือกขนาดของตัวอย่างน้ำที่จะใช้ วิเคราะห์ให้เหมาะสมอาจดูได้จากตาราง a ในทางปฏิบัติ ควรเลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำให้ผลต่างของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตแบลนค์และตัวอย่างน้ำอยู่ระหว่าง 1-5 มิลลิลิตร

ตาราง ข.1 ขนาดตัวอย่างและอัตราเจือจางที่เหมาะสม

ช่วง ซีไอดี	ขนาดตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	อัตราเจือจาง
<200	5	1:1
200 – 400	4	1:1
400 – 800	2	1:1
800 – 1,600	1	1:1
1,600 – 3,200	5	1:10
2,700 – 5,300	3	1:10
4,000 – 8,000	4	1:20
8,000 – 16,000	2	1:20
13,000 – 26,500	3	1:50
20,000 – 40,000	2	1:50
40,000 – 80,000	2	1:100
80,000 – 160,000	1	1:100

เมื่อใช้ FAS ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล และ  $K_2Cr_2O_7$  0.1 นอร์มัล

### 3. ใส่น้ำตัวอย่าง

3.1 ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเหมาะสม จากนั้นเติมน้ำยาล้างสลายนหรือสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ (ถ้าใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าที่แสดงไว้ในตาราง b ให้เติมน้ำกลั่นให้ครบตามจำนวน) ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสมกันให้ดี สำหรับแบลงค์ใช้น้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.2 ขนาดของหลอดแก้ว ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม

ขนาดหลอดแก้ว (มม.)	ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)	สารละลายได โครเมต (มิลลิลิตร)	สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิลิตร)	ปริมาตร ทั้งหมด (มิลลิลิตร)
16×100	2.5	1.5	3.5	7.5
20×150	5.0	3.0	7.0	15.0
25×150	10.0	6.0	14.0	30.0

3.2 วางหลอดแก้วในบล็อกลูก แล้วใส่ตู้อบ ตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชม. เมื่อครบ 2 ชม. แล้ว นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็น

#### 4. การทำไตเตรตชัน

เทสารละลายออกจากหลอดแก้วลงในขวดรูปกรวย ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด แล้วเทรวมลงในขวดรูปกรวย เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด แล้วจึงไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน FAS สีของสารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเขียวอมเหลือง สีฟ้าและสีน้ำตาลแดง ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าถึงจุดยุติ จดปริมาณ FAS ที่ใช้ไตเตรต

#### ข. การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัม } \text{O}_2 / \text{ลิตร} = \frac{(A-B) * N * 8000}{\text{มล. ตัวอย่างที่ใช้}}$$

เมื่อ A = มล. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตแบบลค์  
 B = มล. ของ FAS ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่างน้ำ  
 N = ความเข้มข้นของ FAS , นอร์มัล

#### ข. ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. สามารถตรวจสอบความถูกต้องวิธีวัดซีโอดีได้ โดยใช้สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตหรือกลูโคส (มีวิธีเตรียมอยู่ในหัวข้อ จ.) ที่ทราบค่าซีโอดี นำไปวิเคราะห์หาซีโอดีโดยใช้สารละลายมาตรฐานนี้แทนตัวอย่างน้ำ ค่าซีโอดีที่วัดได้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 95% ของค่าซีโอดีที่เตรียม



2. ถ้าในตัวอย่างน้ำมีสารบรอนพวกไนไตรตจำนวนมาก แก้ไขโดยเติมกรดซัลฟามิก 10 มิลลิกรัม ต่อทุกๆ มิลลิกรัม ของไนไตรตที่มีในตัวอย่างน้ำ

3. ตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูงมากกว่า 2000 มิลลิกรัม/ลิตร ต้องเติม  $\text{HgSO}_4$  เพิ่มจนเกินพอ เช่น น้ำทะเลถ้าใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 มิลลิตร อาจใช้  $\text{HgSO}_4$  สูงถึง 1.5 กรัม การเติม  $\text{HgSO}_4$  ให้เติมหลังจากเติมตัวอย่างน้ำ เขย่าให้ทั่วแล้วค่อยเติมสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมตและกรดซัลฟูริก

4. การเลือกปริมาณตัวอย่าง ควรเลือกให้เหมาะสมเพื่อให้มีปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตมากเกินพอสำหรับออกซิไดส์สารอินทรีย์ การเลือกปริมาณตัวอย่างควรพิจารณาจากลักษณะน้ำ ที่มาของตัวอย่างประกอบกับค่า Rapid COD หรือจากการสังเกตสีของสารละลายก่อนการนำไปรีฟลักซ์ ถ้าเป็นสีเขียวให้ทำใหม่โดยลดปริมาณตัวอย่างลง แต่ถ้าสีของสารละลายเหลืองเข้มมาก ควรจะเพิ่มปริมาณตัวอย่างขึ้น (สีที่เหมาะสมควรเป็นสีเหลืองอมเขียวอ่อนๆ) จะได้ไม่ต้องเสียเวลาในการรีฟลักซ์และเริ่มทำใหม่อีกครั้ง

5. ต้องทำแบลนด์พร้อมทั้งตัวอย่างทุกครั้งเพื่อให้อยู่ในสภาวะอย่างเดียวกัน ผลวิเคราะห์จะได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

6. ต้องตรวจสอบความเข้มข้นของ FAS ทุกวันที่ใช้ไตเตรต ถ้าความเข้มข้นลดลงมากๆ ควรเตรียมใหม่

### C. วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบลิ

#### ก. หลักการ

มีหลักการเช่นเดียวกับวิธีรีฟลักซ์ปิดแบบไตรเตรชัน (ดูในวิธีที่ B)

#### ข. สิ่งรบกวนการวิเคราะห์

เหมือนวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด แต่การรีฟลักซ์แบบปิดสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ระเหยได้อย่างสมบูรณ์

#### ค. การเก็บรักษาตัวอย่าง

วิธีการเก็บและรักษาตัวอย่าง เช่นเดียวกับวิธีการรีฟลักซ์แบบเปิด

#### ง. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อย (*Digestion Vessels*) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate) ซึ่งใช้เลี้ยงเชื้อขนาด  $16 \times 100$  หรือ  $20 \times 150$  หรือ  $25 \times 150$  มม. มีฝาพลาสติกที่ยึดด้วย TFE

2. เตาหลอด (*Heater Block*) เตาหลอดหรือเตาซีโอดี (COD Reactor) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับหลอดแก้วโดยเฉพาะ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่  $150 \pm 2$  °ซ หรืออาจใช้บล็อกวางบนเตาแผ่นก็ได้ บล็อก (Block) ใช้สำหรับใส่หลอดแก้ว ทำด้วยอะลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45-50 มม. การให้ความร้อนเพื่อต้มย่อยสลายกระทำโดยวางบล็อกบนเตาแผ่นหรืออาจใช้เตาอบในข้อ 3 ก็ได้

3. เตาอบ (*oven*) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ  $150 \pm 2$  °ซ

4. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### จ. สารเคมี

1. สารละลายที่ใช้ย่อย (*Digestion Solution*)

ละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ซึ่งอบแห้งที่  $103$  °ซ เป็นเวลา 2 ชม. หนัก 10.216 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดกำมะถันเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (สารละลายใช้ย่อยไม่จำเป็นต้องมีความเข้มข้นแน่นอน แต่ตัวอย่างน้ำและตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้เตรียมกราฟมาตรฐานจะต้องใช้สารละลายย่อยขวดเดียวกันเสมอ)

2. กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต

ซังซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) 8.8 กรัม ใส่ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1-2 วันเพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลายได้ทั้งหมด ก่อนนำไปใช้ต่อไป

### 3. กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid)

ใช้สำหรับป้องกันการรบกวนของไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ ) ปริมาณที่ใช้คือ 10 มิลลิกรัม ต่อ ทุกๆ 1 มิลลิกรัม ของไนไตรต์

### 4. สารละลายมาตรฐาน โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)

บด KHP เพื่อลดขนาดลงและนำไปอบที่อุณหภูมิ  $103^\circ\text{C}$  จนแห้งและมีน้ำหนักคงที่ แล้วละลาย KHP ที่บดและอบแห้งแล้ว 850 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น เจือจางให้เป็น 1000 มิลลิลิตร สารละลายนี้มีซีไอดีเท่ากับ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเก็บรักษาในตู้เย็นได้นานไม่เกิน 3 เดือน

#### ฉ. วิธีวิเคราะห์

ต้องล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้นร้อยละ 20 เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน

1. การเลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับซีไอดีที่เหมาะสม (ดูในวิธี B)
2. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง (ดูในวิธี B)
3. การย่อยตัวอย่าง

3.1 ใส่น้ำตัวอย่างลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเหมาะสม เติมสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมต ตามด้วยกรดกำมะถันอย่างช้าๆ ในปริมาณที่แสดงอยู่ในตารางที่ b (ถ้าใช้ปริมาณตัวอย่าง น้อยกว่าที่แสดงไว้ในตาราง b ให้เติมน้ำกลั่นให้ครบตามจำนวน) ปิดฝาให้แน่นและเขย่าผสม กันให้ดี สำหรับแบบลงน้ำกลั่นแล้วทำเหมือนตัวอย่างทุกอย่าง

3.2 วางหลอดแก้วในบล็อกและวางบนเตาแผ่นหรืออาจใช้เตาหลอดหรืออาจใช้ตู้อบธรรมดา ตั้งอุณหภูมิไว้ที่  $150 \pm 2^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชม. เสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

#### 4. การวัดสี

พลิกหลอดตัวอย่างที่เย็นแล้วกลับไปกลับมามากๆ ครั้งและปล่อยให้ตะกอนแข็งนอนกัน ค่อยๆ เท ตัวอย่างน้ำ (โดยระวังมิให้ตะกอนฟุ้ง) ลงในหลอดวัดของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และวัดค่า Absorbance ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปอ่านค่าปริมาณซีไอดี (มิลลิลิตร) จากกราฟมาตรฐานและคำนวณค่าความเข้มข้นซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) จากสูตรในข้อ ข.

#### 5. การเตรียมกราฟคาลิเบรชัน (กราฟมาตรฐาน)

เตรียมสารละลายมาตรฐานซีไอดีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 20, 80, 160, 250, 400, 600, 800 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารละลายมาตรฐาน KHP ที่มีปริมาณซีไอดีเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนดังแสดงในตารางข้างล่างนี้ (ปริมาตรของ สารละลายที่ได้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร)

ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	20	80	160	250	400	600	800	1000
สารละลาย KHP (มิลลิลิตร)	2	8	16	25	40	60	80	100
น้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	98	92	84	75	60	40	20	0

ย่อตัวอย่างและวัดสีตามข้อ 3 และ 4 ข้างต้น พล็อตกราฟระหว่าง Absorbance และปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม) นำค่าความชันที่ได้ไปใช้ในการคำนวณ

ช. การคำนวณ

$$\text{ซีโอดี, มิลลิกรัม O}_2 / \text{ลิตร} = \frac{\text{ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม)} \times 1000}{\text{มิลลิลิตรของตัวอย่างน้ำ}}$$

ซ. ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง (ดูในวิธีที่ B)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

### การวัดปริมาณสีของน้ำเสียโรงงานกระดาษโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (NCASI METHOD COLOR 71.01)

#### ขอบเขตและการนำไปใช้

การวัดปริมาณสีในน้ำเสียโรงงานกระดาษ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบปริมาณค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของน้ำเสียตัวอย่างกับสารละลาย platinum cobalt stocks ซึ่งหน่วยของสีจะเทียบกับปริมาณสีที่ได้จาก platinum 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปแบบ chloroplatinate ion หรือ PCU ซึ่งค่าที่เหมาะสมในการวัดอยู่ในช่วงระหว่าง 10-500 PCU หากปริมาณสีของตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 500 PCU ควรนำตัวอย่างไปเจือจางก่อนทำการวัด

#### อุปกรณ์ และสารเคมี

##### อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่าง

1. ชุดอุปกรณ์สำหรับการกรองแบบลดความดัน ขนาดกรวยกรอง 47 มิลลิเมตร
2. Pasteur pipettes
3. กระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร
4. แท่งกวนแม่เหล็กชนิดเคลือบ Teflon
5. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
6. ขี้กวดกรองความละเอียด 1.0 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
7. ขี้กวดกรองความละเอียด 0.8 ไมโครเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร

##### อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดหลอดทั้งสแตนด์ และมีส่วนความกว้างของแถบ spectral 10 นาโนเมตร สามารถวัดความยาวคลื่นในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร

##### อุปกรณ์อื่นๆ

1. pH meter
2. เครื่องกวนแม่เหล็ก
3. absorption cell

### สารเคมี

1. pH buffer ขนาด pH 7 ได้แก่ Metripak pHHydrion buffer
2. น้ำชนิดปราศจากสารอินทรีย์และไม่มีสี

### สารละลายมาตรฐาน

1. platinum cobalt color standard, 500 PCU stock
2. สารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ความเข้มข้น 25, 50, 100, 250 และ 500 PCU เตรียมโดยนำสารละลาย platinum cobalt color standard ความเข้มข้น 500 PCU ปริมาณ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิลิตร มาปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI)
3. สารละลายมาตรฐานไม่ต้องแช่ตู้เย็น แต่ควรหลีกเลี่ยงการโดยแสง การระเหย และการปนเปื้อน

### สารเคมีที่ใช้ในการปรับ pH

1. Sodium hydroxide, ACS reagent grade ขนาดความเข้มข้นร้อยละ 20 เตรียมโดยนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 20 กรัม ผสมน้ำ DI ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. Hydrochloric Acid, ACS reagent grade ขนาดความเข้มข้นร้อยละ 10 เตรียมโดยนำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมน้ำ DI 85 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายอุณหภูมิลดลง แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

### การเก็บรักษาตัวอย่าง

ในการเก็บตัวอย่างสารละลายต้องใช้ภาชนะที่สะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อน สารตัวอย่างควรแช่เย็นตลอดระยะเวลาการเก็บ และควรนำมาวัดให้เร็วที่สุดหลังการเก็บแต่ละตัวอย่าง การประเมินค่าความคงที่ตัวอย่างต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ ซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและ pH ได้

### วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดย set zero จากน้ำ DI ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร
2. สร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) จากสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้ข้างต้น โดยพล็อตระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) กับสีที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่า r-squared ไม่ต่ำกว่า 0.991



### 3. เตรียมสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์

3.1 นำตัวอย่างสารออกจากตู้แช่ ตั้งทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เขย่าจนสารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นตวงสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ด้วยกระบอกตวง

3.2 วัดและบันทึกค่า pH จากนั้นเติม pH7 Metripak pHydrion buffer ปริมาณครึ่งแคปซูล กวนจนสาร buffer ละลายหมด ปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ  $7.6 \pm 0.05$  โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% หาก pH ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่ากำหนดหรือเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 10 % หากค่า pH ที่วัดได้มีค่าสูง ซึ่งหากสารละลายตัวอย่างมีปริมาตรเปลี่ยนแปลงไป 1% หลังจากปรับ pH ควรเตรียมสารตัวอย่างใหม่

3.3 กรองตัวอย่างด้วยเยื่อกรองแบบเป็ยกความละเอียด 0.8 ไมโครเมตร

### 4. นำสารละลายตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ซึ่งผ่านการ set zero ด้วยน้ำ DI ที่ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร

#### การคำนวณ

สมการที่ใช้ในการคำนวณสามารถสร้างได้จากกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ซึ่งมีลักษณะแบบเชิงเส้น

$$Y = MX + B$$

ก.1

เมื่อ

Y : absorbance

M : slope

B : Y-intercept

X : calculated color value

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

### การวัดไอโซนในน้ำด้วยวิธี Indigo Colorimetric

#### 1. พื้นฐานการวัด (General Discussion)

##### ก. หลักการพื้นฐาน (Principle)

ไอโซนจะลดสีของอินดิโก (indigo) อย่างรวดเร็วในสารละลายที่เป็นกรด โดยสามารถวัดได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงเป็นสัดส่วนตามความเข้มข้นของไอโซนที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ของสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรมีค่า  $0.42 \pm 0.01$  ต่อเซนติเมตรต่อมิลลิกรัมต่อลิตร ( $\text{/cm/mg/L}$ ) ( $\Delta \epsilon = 20000/\text{M.cm}$ ) เปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตของไอโซนบริสุทธิ์ที่  $\epsilon = 2950/\text{M.cm}$  ที่ความยาวคลื่น 258 นาโนเมตร

##### ข. สิ่งรบกวนระบบ (Interferences)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะลดสีของสารละลาย indigo ได้อย่างช้าๆ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะไม่รบกวนระบบในกรณีที่วัดความเข้มข้นไอโซนภายในช่วงเวลา 6 ชั่วโมงหลังเติมสารละลาย ส่วนเปอร์ออกไซด์ของสารอินทรีย์จะมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า การปรับแก้ค่าที่วัดได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องทำได้โดยวัดเทียบกับกรณีไม่ใช่ตัวอย่างเลย (blank)

ถ้าไม่มีการปรับแก้ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดไปจากความเข้มข้นที่แท้จริง เช่น แมงกานีสที่ถูกรีดออกซิไดซ์ที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะให้การตอบสนองเปรียบได้กับไอโซนเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร คลอรีนที่ส่งผลกระทบต่อกรวัดเช่นกันแต่สามารถป้องกันได้ด้วยกรดมาโลนิก โบรไมน์สามารถเกิดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $\text{Br}^-$  โดย 1 โมลของ  $\text{HOBr}$  จะให้ค่าเทียบได้กับไอโซน 0.4 โมล

##### ค. ช่วงความเข้มข้นที่สามารถวัดได้ (Minimum detectable concentration)

ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวัดได้ด้วยการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง คือ 2 ไมโครกรัมไอโซนต่อลิตร แต่ถ้าใช้สายตาในการสังเกตจะสามารถวัดได้เพียง 10 ไมโครกรัมไอโซนต่อลิตร

## 2. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

- ก. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ที่สามารถวัดได้ที่มีความยาวคลื่น  $600 \pm 5$  นาโนเมตร
- ข. หลอดแก้ว (Glass cylinder) สำหรับกรณีใช้การสังเกตด้วยตาเปล่า ใช้หลอดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีก้นแบน

## 3. สารเคมี (Reagents)

ก. Indigo stock solution : เตรียมได้โดยผสมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรเข้ากับกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นเติมโปแทสเซียมอินดิโกไทรซัลโฟเนต (potassium indigo trisulfonate,  $C_{15}H_7N_2O_{11}S_3K_3$ ) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 80-85 แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

เมื่อนำมาเจือจางในสัดส่วน 1 ต่อ 100 แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรจะมีค่าการดูดกลืน  $0.20 \pm 0.010$  เซนติเมตร สารละลายที่เตรียมนี้จะอยู่ได้นาน 4 เดือนเมื่อเก็บในที่มืด และไม่ควรนำมาใช้ถ้าทดสอบแล้วพบว่าค่าการดูดกลืนเมื่อเจือจางมีค่าน้อยกว่า 0.16 เซนติเมตร

ข. Indigo reagent I: เติม indigo stock solution 20 มิลลิลิตร โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (sodium dihydrogen phosphate,  $NaH_2PO_4$ ) และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 7 มิลลิลิตรลงไปในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร สารละลายนี้มีอายุการใช้งานประมาณหนึ่งสัปดาห์หรือเมื่อทดสอบด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรแล้วต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่วัดได้ในครั้งแรก

ค. Indigo reagent II: เตรียมด้วยวิธีเช่นเดียวกับข้อ ข. แต่เติม indigo stock solution 100 มิลลิลิตรแทนที่จะเป็น 20 มิลลิลิตร

ง. กรดมาโลนิก (Malonic acid reagent) เตรียมโดยละลายกรดมาโลนิก 5 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

จ. สารละลายไกลซีน (Glycine reagent) เตรียมโดยละลายไกลซีน 7 กรัมในน้ำจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

#### 4. ขั้นตอนการปฏิบัติ (Procedure)

##### ก. กระบวนการใช้ Spectrophotometric

##### 1. ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.1 มิลลิกรัมไอโซนต่อลิตร

เติม indigo reagent I 10 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวัดจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยมีขวดหนึ่งที่เติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น  $600 \pm 5$  นาโนเมตร ภายในเวลา 4 ชั่วโมงโดยควรใช้เซลล์ขนาด 10 เซนติเมตร จำนวนความเข้มข้นไอโซนจะผลต่างระหว่างน้ำตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ

##### 2. ความเข้มข้นในช่วง 0.05 ถึง 0.5 มิลลิกรัมไอโซนต่อลิตร

ปฏิบัติตามขั้นตอนในข้อ 1 แต่ใช้ indigo reagent II 10 มิลลิลิตรแทน และควรใช้ cell ขนาด 4 ถึง 5 เซนติเมตร

##### 3. ความเข้มข้นมากกว่า 0.3 มิลลิกรัม ไอโซนต่อลิตร

ใช้ indigo reagent II แต่เจือจางน้ำตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นก่อนนำมาวิเคราะห์ (ในการตรวจปริมาณตัวอย่างควรใช้ปิเปตที่ทำด้วยแก้ว โดยชะด้วยสารตัวอย่างก่อนใช้ และให้ปลายปิเปตอยู่ต่ำกว่าผิวน้ำ

##### 4. การควบคุมสิ่งรบกวนระบบ

ถ้ามีคลอรีนในตัวอย่าง ให้ใส่สารละลายกรดมาโลนิกลงในขวดก่อนเติมสารตัวอย่างจนเต็ม แล้ววัดค่าการดูดกลืนภายใน 60 นาที

##### ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

##### 1. ความเข้มข้นในช่วง 0.01 ถึง 0.1 มิลลิกรัมไอโซนต่อลิตร

เติม indigo reagent I 10 มิลลิลิตรลงในหลอดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตรสองหลอด หลอดแรกเติมน้ำกลั่นเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) ส่วนอีกหลอดเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นเปรียบเทียบสีของทั้งสองหลอดโดยการมองจากด้านบน รินสารละลายในหลอดเปรียบเทียบออกจนกระทั่งมีสีใกล้เคียงกับหลอดตัวอย่าง บันทึกปริมาตรของหลอดเปรียบเทียบ โดยการเปรียบเทียบนี้ควรทำภายใน 4 ชั่วโมงหลังการเก็บตัวอย่าง

2. ความเข้มข้นสูงกว่า 0.1 มิลลิกรัมไอโซนต่อลิตร ทำตามขั้นตอนในข้อ 1 แต่เพิ่มน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เพียง 30 หรือ 45 มิลลิลิตรจากนั้นจึงเติมน้ำจนได้ 100 มิลลิลิตร

##### 3. กรณีที่น้ำตัวอย่างมีแมงกานีส ไม่ควรใช้วิธีการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

## 5. การคำนวณ (Calculation)

ก. กระบวนการใช้ Spectrophotometric

$$mgO_3 / L = \frac{100 * \Delta A}{f * b * V} \quad \text{ง.1}$$

โดย  $\Delta A$  = ความแตกต่างระหว่างค่าการดูดกลืนของตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ

$b$  = ความกว้างของ cell (เซนติเมตร)

$V$  = ปริมาตรของตัวอย่าง (มิลลิลิตร) (โดยทั่วไปมีค่า 90 มิลลิลิตร)

$f = 0.42$

ค่า  $f$  มาจากค่า sensitivity factor ที่ 20000/cm สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรต่อโมลของไอโอดีนที่เพิ่มเข้ามาต่อลิตร ซึ่งจะถูกเทียบวัด (calibrate) ด้วยการไทเทรชันแบบไอโอดิโดเมตริก (iodometric)

ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

$$mgO_3 / L = \frac{(100 - V) * k}{100} \quad \text{ง.2}$$

โดย  $V$  = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน (มิลลิลิตร)

$k$  = conversion factor สำหรับ indigo stock solution เทียบวัด (calibrate)

โดยวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง มีค่าประมาณ 0.10 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อลิตร เมื่อเจือจางที่สัดส่วน 1 ต่อ 100 ให้ค่าการดูดกลืนที่ 0.19 ต่อเซนติเมตร

เมื่อเติมตัวอย่างเพียงแค่ว่า 45 หรือ 30 มิลลิลิตร ค่า conversion factor จะเป็น 2k หรือ 3k ตามลำดับ

## 5. ความแม่นยำ (Precision and Bias)

ก. กระบวนการใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

เมื่อไม่มีสิ่งที่มีารบวกระบบในการวิเคราะห์ ค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยการทดลองในห้องปฏิบัติการอาจให้ค่าความผิดพลาดน้อยเพียงร้อยละ 1

วิธีวิเคราะห์นี้อยู่บนพื้นฐานของความแตกต่างของค่าการดูดกลืนระหว่างตัวอย่างกับตัวเปรียบเทียบ (blank) วิธีวิเคราะห์นี้ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีสารตัวอย่างมีคลอรีน และแมงกานีส โดยที่ถ้าสัดส่วนของแมงกานีสต่อไอโชนมีค่าน้อยกว่า 10 ต่อ 1 และความเข้มข้นไอโชนมากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าที่วัดได้จะมีความผิดพลาดประมาณน้อยกว่าร้อยละ 20

ข. กระบวนการใช้การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า

วิธีวิเคราะห์นี้มีค่าความเบี่ยงเบนประมาณร้อยละ 1 ถึง 1.5 แต่ไม่เหมาะในการนำมาใช้กรณีมีแมงกานีสในตัวอย่างในสัดส่วนใกล้เคียงกับไอโชน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก จ

### การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซ

#### การวิเคราะห์ปริมาณโอโซน ในก๊าซด้วยวิธีการหาปริมาณความต้องการโอโซน

##### (Ozone Demand: Semi-Batch method)(APHA., 1989)

การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซด้วยวิธีการหาปริมาณโอโซน เป็นการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนในก๊าซโดยการผ่านก๊าซตัวอย่างลงในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์จากนั้นนำสารละลายมาไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน เพื่อนำมาเทียบหาปริมาณโอโซน

#### 1. หลักการพื้นฐาน (Principle of the Method)

วิธีการแบบกึ่งกะ (semi-batch) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณโอโซนโดยการผ่านก๊าซที่ต้องการวัดไปยังขวดเก็บก๊าซตัวอย่างที่บรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์

#### 2. ความแม่นยำและเที่ยงตรงในการวัด (Precision and Accuracy)

ค่าความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายเทมวลของโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ และปริมาณโอโซนที่ถูกดักจับ โอโซนที่ถูกดักจับควรมีปริมาณมากพอสมควร เพื่อลดค่าความแปรปรวนของข้อมูล

#### 3. จุดเด่นและจุดด้อย (Advantages and Disadvantages)

วิธีนี้มีจุดเด่นคือสามารถดักจับก๊าซโอโซนได้เกือบทั้งหมด แต่มีข้อด้อยคือต้องใช้สารเคมีปริมาณมากเพื่อดักจับก๊าซโอโซน และใช้เวลาในการวิเคราะห์ค่อนข้างนาน

#### 4. เครื่องมือและอุปกรณ์ (Apparatus)

##### 4.1 อุปกรณ์เก็บสารตัวอย่าง

4.1.1 ขวดเก็บตัวอย่างก๊าซที่สามารถบรรจุสารละลายได้มีมากกว่า 200 มิลลิลิตร

4.1.2 ท่อแก้ว

4.1.3 บีกอากาศ

4.1.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ

4.1.5 เทอร์โมมิเตอร์

4.1.6 มานอมิเตอร์

## 4.1.7 นาฬิกาจับเวลา

## 4.2 เครื่องแก้ว

## 5. สารเคมี (Reagent)

## 5.1 น้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากความต้องการโอโซน (Ozone-demand-free-water)

เตรียมโดยพ่นก๊าซไนโตรเจนลงในน้ำที่ต้องการเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

5.2 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 2N (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ , 2N)

เตรียมโดยเจือจางกรดซัลฟูริกเข้มข้น 56 มิลลิลิตรในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาณ 1 ลิตร

## 5.3 สารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI)

เตรียมโดยสารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์ 20 กรัมในน้ำให้ได้ปริมาณ 1 ลิตร

5.4 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.1 N (Standard sodium thiosulfate titrant,  $Na_2S_2O_3$ , 0.005)

ละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) 25 กรัม ในน้ำกลั่นที่กำลังเดือดปริมาตร 1 ลิตร ทิ้งไว้สองสัปดาห์ก่อนนำมาใช้งาน โดยก่อนใช้งานต้องนำมาหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนก่อน ด้วยการไทเทรตกับสารละลายโปแทสเซียมไอโอเดท ( $KH(IO_3)_2$ ) หรือ โปแทสเซียมไดโครเมท ( $K_2Cr_2O_7$ ) เข้มข้น 0.1000N

สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมทเข้มข้น 0.1000N ที่นำมาหาค่าความเข้มข้นเตรียมได้ โดยละลายโปแทสเซียมไดโครเมทแอนไฮดรัส ( $K_2Cr_2O_7$ ) 4.904 กรัมในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาณ 1 ลิตร เก็บในขวดแก้ว (glass stoppered bottle)

5.5 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.005N (Standard sodium thiosulfate titrant,  $Na_2S_2O_3$ , 0.005N)

เจือจางสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐานเข้มข้น 0.1N ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้เป็นปริมาตร 1 ลิตร

## 5.6 สารละลายแป้ง (Starch indicator solution)

ผสมแป้ง (แป้งมันฝรั่ง, arrowroot หรือ soluble starch) 5 กรัมกับน้ำเย็นเล็กน้อย บดจนละเอียด จากนั้นเทลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตรที่กำลังเดือด คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน แยกมาเฉพาะสารละลายใสส่วนบน โดยเติมกรดซาลิไซลิก 1.25 กรัมหรือซิงค์คลอไรด์ 4 กรัม เพื่อยืดอายุการใช้งานของสารละลายนี้

## 6. การเทียบวัด (Calibration)

เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 มิลลิลิตร สารละลายโปแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1000 N 10 มิลลิลิตร และโปแทสเซียมไอโอไดด์ 1 กรัม ลงในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร โดยต้องคนสารละลายอย่างต่อเนื่องขณะเติม ทิ้งไว้ 6 นาทีในที่มืดแล้วนำมาไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N จนสีเหลืองของไอโอดีนจางลงจนเกือบหายไป จากนั้นเติมสารละลายแป้ง (starch indicator solution) 1 มิลลิลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเป็นไปตามสมการ จ.1 ดังนี้

$$\text{Normality } Na_2S_2O_3 = \frac{1}{ml. Na_2S_2O_3 \text{ consumed}} \quad \text{จ.1}$$

## 7. ขั้นตอนการปฏิบัติ (Procedure)

7.1 ล้างอุปกรณ์ด้วยน้ำประปา และน้ำกลั่น

7.2 การเก็บก๊าซตัวอย่าง

7.2.1 ใส่สารละลายโปแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 2% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซ

7.2.2 ต่อขวดเก็บตัวอย่างก๊าซเข้ากับระบบที่กำลังทำการทดลอง จากนั้นปล่อยก๊าซผ่านขวดเก็บตัวอย่าง วัดอัตราการไหลและเวลาที่ใช้

7.2.3 เทสารละลายในขวดเก็บตัวอย่างลงในบีกเกอร์

7.2.4 เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 N ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

7.2.5 ไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตมาตรฐาน 0.005 N จนสีเหลืองของไอโอดีนจางลงจนเกือบหายไป จากนั้นเติมสารละลายแป้ง (starch indicator solution) 2 มิลลิลิตร และไทเทรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป

## 8. การคำนวณ (Calculation)

คำนวณหาปริมาณโอโซนในหน่วยมิลลิกรัมต่อนาทีได้ด้วยสมการ จ.2

$$\text{Ozone, mg/min} = \frac{(A + B) * N * 2400}{T} \quad \text{จ.2}$$

โดย

A = ml titrant for trap A

B = ml titrant for trap B

N = normality of  $Na_2S_2O_3$

T = ozonation time, min



ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)		average	SD
	batch 1	batch 2		
0.00	48.67	48.67	48.67	0.00
10.00	58.67	58.67	58.67	0.00
20.00	52.00	52.00	52.00	0.00
30.00	45.33	42.00	43.67	2.35
40.00	38.67	35.33	37.00	2.36
50.00	32.00	32.00	32.00	0.00
60.00	28.67	28.67	28.67	0.00

time (min)	COD (mg/l)		average	SD
	batch 1	batch 2		
0.00	164.67	164.67	164.67	0.00
10.00	154.67	158.00	156.34	2.35
20.00	141.33	144.67	143.00	2.36
30.00	134.67	131.33	133.00	2.36
40.00	121.33	118.00	119.67	2.35
50.00	114.67	114.67	114.67	0.00
60.00	104.67	108.00	106.34	2.35

ตารางที่ จ.2 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	52.00	48.67	50.34	2.35	0.00	0.00
10.00	25.33	25.33	25.33	0.00	25.01	49.68
20.00	15.33	15.33	15.33	0.00	35.01	69.54
30.00	15.33	12.00	13.67	2.35	36.67	72.85
40.00	12.00	12.00	12.00	0.00	38.34	76.16
50.00	12.00	8.67	10.34	2.35	40.00	79.47
60.00	8.67	8.67	8.67	0.00	41.67	82.78

time (min)	COD (mg/l)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	164.67	164.67	164.67	0.00	0.00	0.00
10.00	111.33	111.33	111.33	0.00	53.34	32.39
20.00	98.00	98.00	98.00	0.00	66.67	40.49
30.00	88.00	91.33	89.67	2.35	75.01	45.55
40.00	84.67	84.67	84.67	0.00	80.00	48.58
50.00	84.67	81.33	83.00	2.36	81.67	49.60
60.00	78.00	78.00	78.00	0.00	86.67	52.63

ตารางที่ จ.3 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	65.33	65.33	65.33	0.00	0.00	0.00
10.00	38.67	38.67	38.67	0.00	26.66	40.81
20.00	28.67	28.67	28.67	0.00	36.66	56.12
30.00	25.33	22.00	23.67	2.35	41.67	63.78
40.00	22.00	18.67	20.34	2.35	45.00	68.87
50.00	18.67	15.33	17.00	2.36	48.33	73.98
60.00	15.33	12.00	13.67	2.35	51.67	79.08

time (min)	COD (mg/l)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	224.67	224.67	224.67	0.00	0.00	0.00
10.00	184.67	184.67	184.67	0.00	40.00	17.80
20.00	171.33	171.33	171.33	0.00	53.34	23.74
30.00	168.00	168.00	168.00	0.00	56.67	25.22
40.00	164.67	164.67	164.67	0.00	60.00	26.71
50.00	161.33	161.33	161.33	0.00	63.34	28.19
60.00	158.00	158.00	158.00	0.00	66.67	29.67

ตารางที่ จ.4 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้อากาศเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	92.00	92.00	92.00	0.00	0.00	0.00
10.00	58.67	58.67	58.67	0.00	33.33	36.23
20.00	45.33	42.00	43.67	2.35	48.34	52.54
30.00	35.33	35.33	35.33	0.00	56.67	61.60
40.00	32.00	32.00	32.00	0.00	60.00	65.22
50.00	28.67	28.67	28.67	0.00	63.33	68.84
60.00	25.33	25.33	25.33	0.00	66.67	72.47

time (min)	COD (mg/l)		average	SD	reduced	%
	batch 1	batch 2				
0.00	284.67	284.67	284.67	0.00	0.00	0.00
10.00	254.67	254.67	254.67	0.00	30.00	10.54
20.00	238.00	238.00	238.00	0.00	46.67	16.39
30.00	231.33	231.33	231.33	0.00	53.34	18.74
40.00	228.00	228.00	228.00	0.00	56.67	19.91
50.00	224.67	221.33	223.00	2.36	61.67	21.66
60.00	221.33	221.33	221.33	0.00	63.34	22.25



ตารางที่ ๓.5 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 4.9 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	52.00	52.00	52.00	52.00	0.00	0.00	0.00
0.50	68.67	68.67	68.67	68.67	0.00	-16.67	-32.06
1.00	78.67	78.67	78.67	78.67	0.00	-26.67	-51.29
1.50	82.00	82.00	82.00	82.00	0.00	-30.00	-57.69
2.00	82.00	82.00	82.00	82.00	0.00	-30.00	-57.69
2.50	82.00	78.67	82.00	80.89	1.92	-28.89	-55.56
3.00	78.67	78.67	78.67	78.67	0.00	-26.67	-51.29
3.50	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	-20.00	-38.46
4.00	68.67	68.67	68.67	68.67	0.00	-16.67	-32.06
4.50	65.33	65.33	65.33	65.33	0.00	-13.33	-25.63
5.00	62.00	62.00	62.00	62.00	0.00	-10.00	-19.23
10.00	42.00	42.00		42.00	0.00	10.00	19.23
20.00	35.33	35.33		35.33	0.00	16.67	32.06
30.00	28.67	28.67		28.67	0.00	23.33	44.87
40.00	25.33	25.33		25.33	0.00	26.67	51.29
50.00	22.00	22.00		22.00	0.00	30.00	57.69
60.00	18.67	18.67		18.67	0.00	33.33	64.10

time (min)	COD (mg/l)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	164.67	164.67	164.67	164.67	0.00	0.00	0.00
0.50	161.33	161.33	161.33	161.33	0.00	3.34	2.03
1.00	158.00	161.33	159.67	159.67	1.67	5.00	3.04
1.50	158.00	158.00	158.00	158.00	0.00	6.67	4.05
2.00	154.67	154.67	154.67	154.67	0.00	10.00	6.07
2.50	154.67	151.33	153.00	153.00	1.67	11.67	7.09
3.00	151.33	151.33	151.33	151.33	0.00	13.34	8.10
3.50	148.00	148.00	148.00	148.00	0.00	16.67	10.12
4.00	144.67	144.67	144.67	144.67	0.00	20.00	12.15
4.50	141.33	141.33	141.33	141.33	0.00	23.34	14.17
5.00	138.00	138.00	138.00	138.00	0.00	26.67	16.20
10.00	118.00	114.67		116.34	2.35	48.34	29.35
20.00	104.67	101.33		103.00	2.36	61.67	37.45
30.00	98.00	94.67		96.34	2.35	68.34	41.50
40.00	91.33	91.33		91.33	0.00	73.34	44.54
50.00	88.00	88.00		88.00	0.00	76.67	46.56
60.00	84.67	84.67		84.67	0.00	80.00	48.58

ตารางที่ ๓.6 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งให้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	52.00	48.67	52.00	50.89	1.92	0.00	0.00
0.50	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	-21.11	-41.48
1.00	72.00	72.00	68.67	70.89	1.92	-20.00	-39.30
1.50	72.00	72.00	68.67	70.89	1.92	-20.00	-39.30
2.00	68.67	65.33	65.33	66.44	1.93	-15.55	-30.56
2.50	62.00	58.67	58.67	59.78	1.92	-8.89	-17.47
3.00	58.67	58.67	55.33	57.56	1.93	-6.67	-13.10
3.50	55.33	52.00	52.00	53.11	1.92	-2.22	-4.36
4.00	48.67	48.67	45.33	47.56	1.93	3.33	6.55
4.50	45.33	42.00	42.00	43.11	1.92	7.78	15.29
5.00	42.00	42.00	38.67	40.89	1.92	10.00	19.65
10.00	25.33	25.33		25.33	0.00	25.56	50.23
20.00	15.33	15.33		15.33	0.00	35.56	69.88
30.00	15.33	12.00		13.67	2.35	37.23	73.15
40.00	12.00	12.00		12.00	0.00	38.89	76.42
50.00	12.00	8.67		10.34	2.35	40.56	79.69
60.00	8.67	8.67		8.67	0.00	42.22	82.96

time (min)	COD (mg/l)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	164.67	164.67	161.33	163.56	1.93	0.00	0.00
0.50	161.33	161.33	158.00	160.22	1.92	3.34	2.04
1.00	158.00	154.67	158.00	156.89	1.92	6.67	4.08
1.50	154.67	154.67	151.33	153.56	1.93	10.00	6.11
2.00	151.33	148.00	148.00	149.11	1.92	14.45	8.83
2.50	148.00	144.67	141.33	144.67	3.34	18.89	11.55
3.00	141.33	138.00	138.00	139.11	1.92	24.45	14.95
3.50	134.67	134.67	134.67	134.67	0.00	28.89	17.66
4.00	131.33	128.00	128.00	129.11	1.92	34.45	21.06
4.50	124.67	124.67	124.67	124.67	0.00	38.89	23.78
5.00	121.33	124.67	121.33	122.44	1.93	41.11	25.14
10.00	111.33	111.33		111.33	0.00	52.23	31.93
20.00	98.00	98.00		98.00	0.00	65.56	40.08
30.00	88.00	91.33		89.67	2.35	73.89	45.18
40.00	84.67	84.67		84.67	0.00	78.89	48.23
50.00	84.67	81.33		83.00	2.36	80.56	49.25
60.00	78.00	78.00		78.00	0.00	85.56	52.31

ตารางที่ ๗.7 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งให้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 23.75 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้ง

time (min)	color unit (PCU)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	48.67	48.67	48.67	48.67	0.00	0.00	0.00
0.50	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	-23.33	-47.94
1.00	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	-23.33	-47.94
1.50	68.67	68.67	68.67	68.67	0.00	-20.00	-41.09
2.00	65.33	62.00	65.33	64.22	1.92	-15.55	-31.95
2.50	58.67	55.33	58.67	57.56	1.93	-8.89	-18.26
3.00	55.33	52.00	55.33	54.22	1.92	-5.55	-11.40
3.50	52.00	48.67	52.00	50.89	1.92	-2.22	-4.56
4.00	48.67	45.33	48.67	47.56	1.93	1.11	2.29
4.50	45.33	42.00	45.33	44.22	1.92	4.45	9.14
5.00	42.00	42.00	42.00	42.00	0.00	6.67	13.70
10.00	28.67	25.33		27.00	2.36	21.67	44.52
20.00	22.00	22.00		22.00	0.00	26.67	54.80
30.00	18.67	18.67		18.67	0.00	30.00	61.64
40.00	15.33	15.33		15.33	0.00	33.34	68.50
50.00	12.00	12.00		12.00	0.00	36.67	75.34
60.00	12.00	8.67		10.34	2.35	38.34	78.77

time (min)	COD (mg/l)			average	SD	reduced	% reduced
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	164.67	164.67	164.67	164.67	0.00	0.00	0.00
0.50	161.33	161.33	161.33	161.33	0.00	3.34	2.03
1.00	161.33	161.33	158.00	160.22	1.92	4.45	2.70
1.50	158.00	158.00	154.67	156.89	1.92	7.78	4.72
2.00	154.67	148.00	151.33	151.33	3.34	13.34	8.10
2.50	148.00	144.67	144.67	145.78	1.92	18.89	11.47
3.00	138.00	141.33	138.00	139.11	1.92	25.56	15.52
3.50	134.67	134.67	134.67	134.67	0.00	30.00	18.22
4.00	131.33	128.00	131.33	130.22	1.92	34.45	20.92
4.50	128.00	124.66	128.00	126.89	1.93	37.78	22.94
5.00	124.67	124.67	128.00	125.78	1.92	38.89	23.62
10.00	114.67	111.33		113.00	2.36	51.67	31.38
20.00	101.33	98.00		99.67	2.35	65.01	39.48
30.00	94.67	94.67		94.67	0.00	70.00	42.51
40.00	91.33	91.33		91.33	0.00	73.34	44.54
50.00	88.00	88.00		88.00	0.00	76.67	46.56
60.00	84.67	81.33		83.00	2.36	81.67	49.60

ตารางที่ น.8 ปริมาณสีและซีโอดีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนก๊าซโอโซนซึ่งใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นที่อัตราการไหล 13.56 ลิตรต่อนาที ในระบบท่อแนวตั้งที่ติดตั้ง static mixer

time (min)	color unit (PCU)			average	SD	change	% change
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	52.00	52.00	48.67	50.89	1.92	0.00	0.00
0.50	65.33	65.33	65.33	65.33	0.00	-14.44	-28.37
1.00	65.33	62.00	62.00	63.11	1.92	-12.22	-24.01
1.50	58.67	58.67	55.33	57.56	1.93	-6.67	-13.10
2.00	52.00	48.67	48.67	49.78	1.92	1.11	2.18
2.50	45.33	45.33	45.33	45.33	0.00	5.56	10.93
3.00	42.00	42.00	42.00	42.00	0.00	8.89	17.47
3.50	38.67	38.67	38.67	38.67	0.00	12.22	24.01
4.00	35.33	35.33	35.33	35.33	0.00	15.56	30.58
4.50	32.00	32.00	32.00	32.00	0.00	18.89	37.12
5.00	28.66	28.66	28.66	28.66	0.00	22.23	43.68
10.00	22.00	18.67		20.34	2.35	30.56	60.04
20.00	15.33	12.00		13.67	2.35	37.23	73.15
30.00	12.00	8.67		10.34	2.35	40.56	79.69
40.00	8.67	8.67		8.67	0.00	42.22	82.96
50.00	8.67	8.67		8.67	0.00	42.22	82.96
60.00	8.67	8.67		8.67	0.00	42.22	82.96

time (min)	COD (mg/l)			average	SD	change	% change
	batch 1	batch 2	batch 3				
0.00	164.67	164.67	161.33	163.56	1.93	0.00	0.00
10.00	104.67	104.67		104.67	0.00	58.89	36.00
20.00	91.33	88.00		89.67	2.35	73.89	45.18
30.00	84.67	81.33		83.00	2.36	80.56	49.25
40.00	74.67	74.67		74.67	0.00	88.89	54.35
50.00	71.33	71.33		71.33	0.00	92.23	56.39
60.00	68.00	68.00		68.00	0.00	95.56	58.42

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.๙ ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่ทางเข้า (A) และทางออก (B) ของระบบท่อแนวระนาบ

ROUND	time A	ozone (mg/l)	time B	ozone (mg/l)
0	0	0.000	8.58	0.024
0	0	0.000	8.58	0.025
0	0	0.000	8.58	0.024
1	36.36	0.012	44.94	0.029
1	36.36	0.013	44.94	0.029
1	36.36	0.013	44.94	0.028
2	72.73	0.016	81.30	0.032
2	72.73	0.015	81.30	0.030
2	72.73	0.015	81.30	0.032
3	109.09	0.016	117.67	0.033
3	109.09	0.017	117.67	0.032
3	109.09	0.016	117.67	0.032
4	145.46	0.016	154.03	0.033
4	145.46	0.016	154.03	0.033
4	145.46	0.017	154.03	0.034
5	181.82	0.016	190.39	0.033
5	181.82	0.016	190.39	0.033
5	181.82	0.017	190.39	0.034

ตารางที่ ๑.๑๐ ความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายกลีนิคความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่ทางเข้า (A) และทางออก (B) ของระบบท่อแนวระนาบ

ROUND	time A	ozone (mg/l)	time B	ozone (mg/l)
0	0	0.000	8.58	0.001
0	0	0.000	8.58	0.001
0	0	0.000	8.58	0.001
1	36.36	0.001	44.94	0.003
1	36.36	0.001	44.94	0.003
1	36.36	0.001	44.94	0.003
2	72.73	0.001	81.30	0.003
2	72.73	0.001	81.30	0.003
2	72.73	0.001	81.30	0.003
3	109.09	0.001	117.67	0.003
3	109.09	0.001	117.67	0.003
3	109.09	0.001	117.67	0.003
4	145.46	0.001	154.03	0.003
4	145.46	0.001	154.03	0.003
4	145.46	0.001	154.03	0.003
5	181.82	0.001	190.39	0.003
5	181.82	0.001	190.39	0.003
5	181.82	0.001	190.39	0.003

ตารางที่ ๑.11 ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อน โอโซน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ทางเข้า และทางออกของระบบท่อแวนระนาบ

ROUND	pipe in				AVERAGE	SD	pipe out				AVERAGE	SD
	batch 01	batch 02	batch 03	batch 04			batch 01	batch 02	batch 03	batch 04		
0	48.67	52.00	48.67	48.67	49.50	1.67	52.00	55.33	55.33	52.00	53.67	1.92
1	52.00	55.33	55.33	55.33	54.50	1.67	55.33	58.67	58.67	58.67	57.83	1.67
2	55.33	58.67	58.67	58.67	57.83	1.67	58.67	62.00	62.00	62.00	61.17	1.67
3	58.67	62.00	62.00	62.00	61.17	1.67	62.00	65.33	65.33	65.33	64.50	1.67
4	62.00	65.33	65.33	65.33	64.50	1.67	65.33	68.67	68.67	68.67	67.83	1.67
5	65.33	68.67	68.67	68.67	67.83	1.67	68.67	72.00	72.00	68.67	70.33	1.92
10							72.00	72.00	72.00	68.67	71.17	1.67
20							72.00	68.67	68.67	65.33	68.67	2.72
30							65.33	62.00	62.00	58.67	62.00	2.72
40							58.67	55.33	55.33	52.00	55.33	2.72
50							55.33	52.00	52.00	48.67	52.00	2.72
60							52.00	48.67	48.67	45.33	48.67	2.72



ตารางที่ จ.12 ความเร็วในแต่ละเฟสและสัดส่วนของอัตราการใช้แก๊สต่อของเหลว

flowrate (l/min)		ratio (gas/liquid)
gas	liquid	
13.56	32	0.42
13.56	26	0.52
13.56	20	0.64

ตารางที่ จ.13 ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนโอโซนที่อัตราการใช้แก๊สต่อของเหลวเท่ากับ 0.42

ROUND	time (sec)	color unit (PCU)			average	SD	% color changed
		batch 01	batch 02	batch 03			
0	0.00	48.67	52.00	48.67	49.78	1.92	0.00
1	7.45	55.33	58.67	55.33	56.44	1.92	13.39
2	14.89	62.00	62.00	62.00	62.00	0.00	24.55
3	22.34	65.33	65.33	65.33	65.33	0.00	31.25
4	29.78	68.67	68.67	68.67	68.67	0.00	37.95
5	37.23	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64
6	44.68	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64
10	74.46	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64
15	111.69	72.00	72.00	68.67	70.89	1.92	42.41
20	148.92	72.00	68.67	68.67	69.78	1.92	40.18

ตารางที่ จ.14 ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนโอโซนที่อัตราการใช้แก๊สต่อของเหลวเท่ากับ 0.52

ROUND	time (sec)	color unit (PCU)			average	SD	% color changed
		batch 01	batch 02	batch 03			
0	0.00	48.67	52.00	48.67	49.78	1.92	0.00
1	8.58	52.00	55.33	55.33	54.22	1.92	8.93
2	17.16	55.33	58.67	58.67	57.56	1.92	15.63
3	25.74	58.67	62.00	62.00	60.89	1.92	22.32
4	34.32	62.00	65.33	65.33	64.22	1.92	29.02
5	42.90	65.33	68.67	68.67	67.56	1.92	35.71
6	51.48	68.67	72.00	72.00	70.89	1.92	42.41
10	85.80	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64
15	128.70	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64
20	171.60	72.00	68.67	68.67	69.78	1.92	40.18

ตารางที่ น.15 ปริมาณสีของสารละลายลิกนินความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังป้อนโอโซน ที่อัตราการไหลก๊าซต่อของเหลวเท่ากับ 0.64

ROUND	time (sec)	color unit (PCU)			average	SD	% color changed
		batch 01	batch 02	batch 03			
0	0.00	48.67	52.00	48.67	49.78	1.92	0.00
1	10.11	52.00	52.00	52.00	52.00	0.00	4.46
2	20.22	52.00	55.33	55.33	54.22	1.92	8.93
3	30.33	55.33	55.33	58.67	56.44	1.92	13.39
4	40.44	58.67	58.67	58.67	58.67	0.00	17.86
5	50.55	58.67	62.00	62.00	60.89	1.92	22.32
6	60.66	62.00	65.33	62.00	63.11	1.92	26.79
10	101.10	65.33	68.67	65.33	66.44	1.92	33.48
15	151.65	68.67	68.67	68.67	68.67	0.00	37.95
20	202.20	72.00	72.00	72.00	72.00	0.00	44.64



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ภาพอุปกรณ์ทดลอง



รูปที่ ข.1 เครื่องผลิตโอโซนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.2 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณโอโซนในอากาศ



รูปที่ ข.3 ระบบท่อแนวตั้งที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.4 ระบบท่อแนวตั้งที่มีการบรรจุ static mixer



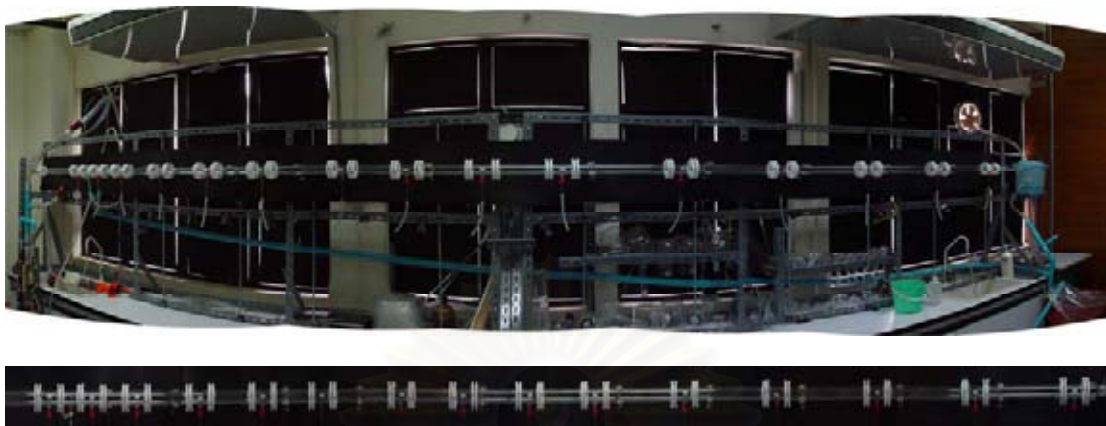


รูปที่ ข.5 *static mixer* ที่ใช้บรรจุในระบบท่อแนวตั้ง



รูปที่ ข.6 *static mixer* ที่ใช้บรรจุในระบบท่อแนวระนาบ





รูปที่ ข.7 ระบบท่อแนวระนาบที่ใช้ในการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศ เจียสกุล เกิดเมื่อวันที่ 26 สิงหาคม พ.ศ. 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัยในปีการศึกษา 2540 จากนั้นเข้าศึกษาใน ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย