

# การหาสภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดน้ำเสียจาก โรงงานหมักพิมพ์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น\*

อรชуда ชันติกุล<sup>1)</sup> และ อนุรักษ ปิติรักษสกุล<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10800

<sup>2)</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10800

Email : ornchuda\_k@yahoo.co.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานหมักพิมพ์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (central composite design) ซึ่งตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อการลดลงของสีของน้ำเสีย คือ ภาระสารอินทรีย์ (organic loading) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชั่น โดยภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง อยู่ระหว่าง 650 - 1950 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช อยู่ระหว่าง 3 - 11 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชั่น อยู่ระหว่าง 10 - 60 นาที ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลของโอโซนคงที่เท่ากับ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และปริมาณของโอโซนที่ผลิตจากเครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีการผลิตแบบโคโรนาดีสชาร์จ เท่ากับ 27.6 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชั่น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเมื่อเพิ่มภาระสารอินทรีย์ของน้ำเสีย นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ คือ ภาระสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 8.7 และเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชั่น 20 นาที ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 1.5 %

**คำสำคัญ :** โอโซนเนชั่น, การกำจัดสี, การออกแบบส่วนประสมกลาง

---

\* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 7 พฤศจิกายน 2549

# Optimization of Ink Wastewater Treatment by Ozonation\*

Ornchuda Khunteegul<sup>1)</sup> and Anurak Petiraksakul<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok 10800

<sup>2)</sup> Lecturer, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok 10800

Email : ornchuda\_k@yahoo.co.th

## ABSTRACT

The objective of this research is to study the optimum condition of the color removal of ink wastewater by ozonation. Central composite design was applied with three independent variables namely, organic loading, pH and reaction time in the ranges of 650-1950 mg/l, 3-11 and 10-60 min., respectively. Constant air flow rate of 700 cm<sup>3</sup>/min and ozone dose of 27.6 mg/l were generated from an ozone generator operated by the electrical corona discharge. The decoloration efficiency is increased with increasing pH and the reaction time while the efficiency is decreased with increasing the organic loading. Statistic analysis indicating that the optimum process condition was organic loading of 650 mg/l, pH of 8.7 and treatment time of 20 min. Verification results at this condition gave an error less than 1.5 % for all response parameters.

**Keywords :** Ozonation, Color removal, Central composite design

---

\* Original manuscript submitted: August 24, 2006 and Final manuscript received: November 7, 2006

## บทนำ

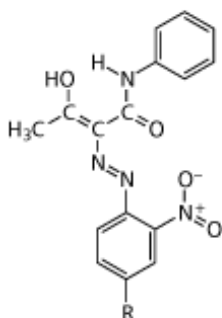
คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มาตรฐานก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งรับน้ำธรรมชาติ การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) ทำโดยอาศัยจุลินทรีย์ (microorganism) ย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษต่อธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม แต่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงและเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน (complex organic) จุลินทรีย์อาจต้องใช้เวลาในการย่อยสลายที่นานขึ้น ทำให้การบำบัดทางชีววิทยาโดยตรงเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพต่ำ วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจคือ วิธีการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับสารอินทรีย์ ซึ่งตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ที่นิยมใช้ ได้แก่ คลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารประกอบที่ยากต่อการย่อยสลายได้ (Lin and Yeh, 1993) แต่การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเกิดสารเคมีที่อันตราย อีกทั้งคลอรีนเป็นสารที่สลายตัวในช่วงเวลาปานกลางทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ดังนั้นการใช้โอโซนซึ่งสลายตัวได้เร็วกว่าคลอรีนจึงได้รับความสนใจอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง (strong oxidizing agent) และไม่เกิดสารอันตรายตกค้างเนื่องจากโอโซนสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกซิเจนได้ง่าย นอกจากนี้โอโซนยังสามารถกำจัดสีและกลิ่นของน้ำเสียได้เป็นอย่างดี (สุรพล, 2543)

น้ำทิ้งจากโรงงานหมักฟิมพ์เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาวะแวดล้อมทางน้ำ ซึ่งน้ำเสียส่วนใหญ่่นั้นเกิดจากขั้นตอนการล้างภาชนะที่ใช้ในกระบวนการ ปัญหาสำคัญของการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักฟิมพ์ คือสีที่เกิดจากหมึกฐานน้ำหรือหมึกเฟล็คโซ (Flexo) หมึกนี้ประกอบด้วย เม็ดสี (organic pigment) ชนิดอะโซ (Azo dye) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่โมเลกุลมีโครงสร้างซับซ้อน แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งสีเหล่านี้หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และอนุภาคของสีอาจไปขัดขวางการกระจายของแสงในน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบนิเวศน์ตามมา (เปี่ยมศักดิ์, 2536)

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักฟิมพ์มักจะใช้หลายวิธีรวมกันทั้งทางด้านชีววิทยา ทางกายภาพและทางเคมี โดยทั่วไปมักจะบำบัดน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการกำจัดทางกายภาพ เพื่อกำจัดสีซึ่งเป็นส่วนที่กำจัดยากที่สุดแล้วตามด้วยกระบวนการกำจัดทางชีววิทยา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ยังเหลืออยู่ หรืออาจใช้เพียงวิธีการใดวิธีการหนึ่งในการบำบัด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำเสีย แต่อย่างไรก็ตามระบบบำบัดที่เลือกใช้จะต้องสามารถบำบัดสีในน้ำเสียและภาวะสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี การนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหมักฟิมพ์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากโอโซนเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงและเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วโดย

โอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์พันธะเคมีของโมเลกุลสีให้แตกออกกลายเป็นสารที่ไม่มีสี และวิธีการนี้เป็นวิธีการที่สามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้สูงถึง 87-99 % (Cooper, 1993)

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการโอโซนชั้น ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการในการหาสภาวะที่เหมาะสมจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ก) การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (statistical design of experiment) เป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (response surface methodology) โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาพื้นผิวผลตอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ การออกแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากสำหรับการสร้างแบบจำลองอันดับที่สอง (second-order response surface model) เนื่องจากมีการเพิ่มการทดลองในแนวแกน (axial run) ทำให้มีจำนวนการทดลองเพียงพอที่จะใช้ในการประมาณพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในแบบจำลอง ข) วิเคราะห์สัมประสิทธิ์ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลตอบในแบบจำลอง เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลตอบให้ดีขึ้น ค) ทำนายผลตอบจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (ปารเมศ, 2545)



รูปที่ 1 โครงสร้างเม็ดสีอะโซ

## การออกแบบการทดลอง

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 1

จำนวนตัวแปรอิสระ (k)	จำนวนการทดลอง			จำนวนการทดลองรวม	$\alpha_D$
	$2^k$	แนวแกน	จุดศูนย์กลาง		
3	8	6	6	20	1.682
4	16	8	7	31	2.000
5	16	10	6	32	2.000
6	32	12	9	53	2.378

ตารางที่ 1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design)

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการลดลงของสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ภาวะสารอินทรีย์, ค่าพีเอชและเวลา ซึ่งตามงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดเป็นตัวแปรอิสระ  $X_1$ ,  $X_2$  และ  $X_3$  ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ตามลำดับ โดยที่สมการของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติคือ (Myers, 1995)

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} X_j^2 \quad (1)$$

โดยที่  $Y$  คือ ผลตอบที่ได้จากการทำนาย (predicted response)  $\beta_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย  $i$  และ  $j$  คือ ลำดับของตัวแปร

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยจำนวนตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร จากตารางที่ 1  $\alpha_D$  มีค่าเท่ากับ 1.682 ซึ่งเป็นค่าที่แสดงระยะห่างของตัวแปรเข้ารหัส (coded value) ระหว่างจุดศูนย์กลางและแนวแกน ดังนั้นตัวแปรจะถูกนำเข้ารหัสโดยกำหนดระดับต่ำ กลางและสูง ของรหัสเป็น -1.682 0 และ +1.682 ตามลำดับ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริง (actual value) และค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ตามตารางที่ 2

ตัวแปรอิสระ	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัส				
	-1.682	-1.000	0	+1.000	+1.682
ภาวะสารอินทรีย์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	650	915	1300	1700	1950
พีเอช	3	5	7	9	11
เวลา (นาที)	10	20	35	50	60

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

จากสมการที่ 1 สมการแบบจำลองพหุคูณอันดับที่สอง สำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2)$$

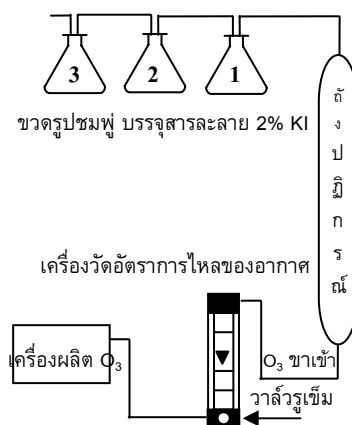
จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนตัวแปรอิสระเท่ากับ 3 ตัวแปรจะทำให้เกิดจำนวนการทดลองรวมทั้งหมด 20 การทดลอง ดังตารางที่ 3 ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดนี้ไปประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_{ij}$ ) ในแบบจำลองโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) (Douglas, 2005)

ลำดับที่	ภาระสารอินทรีย์ ( $X_1$ )		ฟิเอช ( $X_2$ )		เวลา ( $X_3$ )	
	ค่าเข้ารหัส	ค่าจริง	ค่าเข้ารหัส	ค่าจริง	ค่าเข้ารหัส	ค่าจริง
1	0	1300	0	7	0	35
2	0	1300	-1.682	3	0	35
3	-1	915	1	9	-1	20
4	0	1300	0	7	1.682	60
5	0	1300	0	7	0	35
6	0	1300	0	7	0	35
7	-1	915	-1	5	1	50
8	1.682	1950	0	7	0	35
9	1	1700	-1	5	-1	20
10	0	1300	0	7	0	35
11	1	1700	1	9	-1	20
12	0	1300	1.682	11	0	35
13	0	1300	0	7	0	35
14	0	1300	1	9	1	50
15	0	1300	0	7	0	35
16	0	1300	0	7	-1.682	10
17	-1	915	-1	5	-1	20
18	-1.682	650	0	7	0	35
19	-1	915	1	9	1	50
20	1	1700	-1	5	1	50

ตารางที่ 3 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร

### อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้



รูปที่ 2 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนที่ใช้ในการทดลอง

### 1. เครื่องผลิตโอโซน (ozone generator)

ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่องผลิตโอโซนแบบ electrical corona discharge ยี่ห้อ นอร์ค้า รุ่น NK-200 เครื่องผลิตโอโซนแบบนี้ประกอบด้วย ขั้วอิเล็กโทรดคู่หนึ่งซึ่งวางอยู่ห่างกันพอประมาณโดยมีช่องว่างอากาศกั้นอยู่ เมื่ออากาศหรือออกซิเจนผ่านเข้ามาในช่องว่างนี้ซึ่งมีความต่างศักย์สูง จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) บางส่วนแตกตัวเป็นออกซิเจนเรดิคัล ( $O^\bullet$ ) โดยการวิ่งชนของอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) จากนั้นออกซิเจนเรดิคัล ( $O^\bullet$ ) จะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) กลายเป็นโอโซน ( $O_3$ ) (Lin และ Yeh, 1993)

### 2. ถังปฏิกรณ์ (reactor)

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ทำมาจากอะคริลิก (acrylic) โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีปริมาตรบรรจุประมาณ 1,256 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร

### 3. เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (flow meter) เป็นชนิดโรตารีมิเตอร์

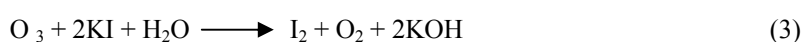
## วิธีการทดลอง

1. เตรียมตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบไปด้วยหมักฐานน้ำหรือหมักเฟลโซ (Flexo) ปริมาตร 18 มิลลิลิตร กับน้ำ 1 ลิตรคนให้ละลายเข้ากัน และใส่สารเฟอร์รัสซัลเฟต ( $Fe(SO_4)$ ) ลงไป 2 กรัม เพื่อให้ทำให้น้ำเสียสังเคราะห์ตกตะกอน จากนั้นแยกน้ำเสียสังเคราะห์และตะกอนออกจากกัน

2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการแยกตะกอนแล้วไปตรวจวัดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ด้วยวิธี Close reflux, colorimetric method โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ซึ่งพบว่าซีโอดีมีค่าเท่ากับ 1,950 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นจึงนำน้ำเสียนี้มาเจือจางเพื่อให้ได้ซีโอดี ตามตารางที่ 2 โดยเจือจางน้ำเสียสังเคราะห์ให้ได้ 35 50 75 และ 90 % โดยปริมาตรซึ่งจะทำให้ได้ซีโอดี เท่ากับ 650 915 1300 และ 1,700 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

3. ทำการทดลอง 20 การทดลองตามสมภาวะของแต่ละการทดลองตามตารางที่ 3 ซึ่งในแต่ละการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของโอโซนให้คงที่ที่ 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที โดยการปรับวาล์วที่เครื่องวัดอัตราการไหล ปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้ 27.6 มิลลิกรัม/ชั่วโมง ซึ่งในการทดลองแต่ละการทดลองจะใช้ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 500 มิลลิลิตร และนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดมาวัดค่าสีโดยการวัดการดูดกลืนของแสง (absorbance) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 526 นาโนเมตร

4. หาปริมาณของโอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตโอโซนโดยวิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric method) เป็นการวัดปริมาณโอโซนในรูปสารละลาย (solution phase) อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและไอโอดีน ดังสมการที่ 3 (Gottschalk, Libra และ Saup, 2000)



จากสมการที่ 3 สามารถวัดปริมาณโอโซนได้โดยทำการไตเตรทไอโอดีน ( $I_2$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโอโซน ( $O_3$ ) กับโพแทสเซียมไอโอดีน ( $KI$ ) ด้วยโซเดียมไรโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3$ ) และใช้

น้ำแป้ง (starch) เป็นอินดิเคเตอร์ (indicator) ซึ่งอัตราของไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอโซน คำนวณตามสมการที่ 4 (Ronald *et al.*, 2003)

$$\text{POR} = (V_{\text{titrant } 1} \times N_1 + V_{\text{titrant } 2} \times N_2 + V_{\text{titrant } 3} \times N_3) \times 24 \quad (4)$$

โดยที่ POR คือ อัตราของไอโซนที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตไอโซน (มิลลิกรัม/ชั่วโมง)  $V_{\text{titrant}1}$ ,  $V_{\text{titrant}2}$  และ  $V_{\text{titrant}3}$  คือ ปริมาตรของโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) เข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N) ในขวดรูปชมพู่ (flash) ไบที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

### ผลการทดลอง

วิธีการพื้นผิวผลตอบ คือวิธีในการสร้างแบบจำลองจากการทำการทดลอง ซึ่งแบบจำลองพื้นผิวตอบขั้นที่สองที่ได้ คือ

$$Y = 109.443 - 0.06825 X_1 + 2.9329 X_2 + 0.0775 X_3 + 0.00002 X_1^2 + 0.1260 X_2^2 - 0.0023 X_3^2 - 0.0024 X_1 X_2 - 0.0004 X_1 X_3 - 0.0073 X_2 X_3 \quad (5)$$

โดยที่ Y คือ ประสิทธิภาพการกำจัดสี (%)

ตารางที่ 4 แสดงค่าการเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายตามสมการ และจากผลการทดสอบแล็กออฟฟิต (lack of fit) แสดงตามตารางที่ 5 โดยกำหนดให้ระดับนัยสำคัญที่

ลำดับ	ค่าที่ได้จากการทดลอง (%)	ค่าที่ได้จากการทำนาย (%)	ค่าความแตกต่าง (%)
1	78.220	77.945	0.275
2	71.180	75.082	-3.902
3	89.630	88.956	0.674
4	91.140	88.198	2.942
5	77.480	77.945	-0.465
6	78.100	77.945	0.155
7	85.420	87.171	-1.751
8	70.790	75.165	-4.375
9	68.320	63.918	4.402
10	77.890	77.945	-0.055
11	70.160	65.691	4.469
12	84.900	84.842	0.058
13	78.660	77.945	0.715
14	83.110	84.463	-1.353
15	77.980	77.945	0.035
16	57.980	64.766	-6.786
17	82.150	78.079	4.071
18	98.150	97.618	0.532
19	95.320	97.004	-1.684
20	85.780	83.736	2.044

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองและการทำนายของแบบจำลองการถดถอย



เทอม	สัมประสิทธิ์การถดถอย	P-value
constant	109.443	0.000
organic	- 0.06825	0.000
pH	2.9329	0.023
time	0.0775	0.000
org.org	0.00002	0.017
pH.pH	0.1260	0.512
time.time	- 0.0023	0.632
org.pH	- 0.0024	0.137
org.time	0.0004	0.086
pH.time	- 0.0073	0.856

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของประสิทธิภาพการกำจัดสี

0.05 พบว่า แบบจำลองการถดถอยที่ได้สามารถฟิตข้อมูลได้ดีเพียงพอ เนื่องจาก P-value ของแล็ก-ออฟฟิต มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$  เท่ากับ 0.05) และแบบจำลองการถดถอยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 91.1%

ผลจากปัจจัยทั้งสามปัจจัยได้แก่ ภาวะสารอินทรีย์ค่าพีเอชและเวลา มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value ของปัจจัยทั้งสามน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ โดยมีสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับตัวแปร ภาวะสารอินทรีย์เป็นลบ หมายความว่า ถ้ากำหนดปัจจัยอื่นๆคงที่ การเพิ่มภาวะสารอินทรีย์จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีแนวโน้มลดลง สำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปร pH และเวลา มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ถ้ากำหนดปัจจัยอื่นๆคงที่ การเพิ่ม pH และเวลาจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

อิทธิพลหลักในอันดับที่สองที่มีนัยสำคัญทางสถิติคือ ภาวะสารอินทรีย์ เนื่องจาก P-value ของ org.org มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ แสดงว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง ภาวะและประสิทธิภาพการลดลงของสีเป็นไปตามเส้นโค้ง แต่ค่าพีเอชและเวลามีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการลดลงของสีเป็นเส้นตรง

อิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value ของอิทธิพลร่วมของปัจจัยมากกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของ ภาวะสารอินทรีย์ ค่าพีเอชและเวลาไม่มีผลต่อกัน

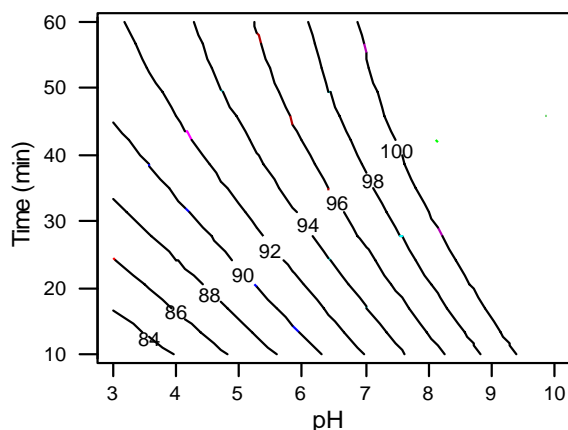
## อภิปรายผลการทดลอง

### ผลของค่าพีเอช

รูปที่ 3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและเวลา ที่ภาวะสารอินทรีย์คงที่ที่ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่างๆ ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าที่ค่าพีเอช คงที่ค่าหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการไอโซเนชันเพิ่มขึ้น และที่เวลาในการไอโซเนชันค่า

หนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการกำจัดสีให้สมบูรณ์จะลดลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอช

ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซนคือ อุณหภูมิ ตัวยับยั้ง (scavenger) และค่าพีเอช (Gottschalk, Libra และ Saup, 2000) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชยังมีผลต่อความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ของโอโซนโดยทำให้ศักย์ในการออกซิเดชันของโอโซน (oxidation potential) มีค่าลดลงจาก 2.08 โวลต์ ที่สภาวะกรด เป็น 1.4 โวลต์ ที่สภาวะด่าง (Hoigne และ Bader, 1976) และเป็นตัวกำหนดเส้นทางการทำปฏิกิริยาของโอโซน โดยที่โอโซนสามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรด โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์โดยตรง ส่วนในสภาวะที่เป็นด่างจะเกิดการสลายตัวของโอโซน ซึ่งถูกเร่งโดยตัวริเริ่ม (initiators) เช่น  $\text{OH}^\cdot$  เพื่อทำให้เกิดออกซิแดนท์ลำดับที่สอง (secondary oxidant) เช่น  $\text{OH}^\cdot$ ,  $\text{HO}_2^\cdot$ ,  $\text{HO}_3^\cdot$  และ  $\text{HO}_4^\cdot$  ซึ่งในกลุ่มของออกซิแดนท์ลำดับที่สอง เช่น  $\text{OH}^\cdot$  มีศักย์ออกซิเดชันสูงที่สุดคือ 2.8 โวลต์ (Gottschalk, Libra และ Saup, 2000) ถึงแม้ว่า บทบาทในการออกซิไดซ์ของโอโซนจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นแต่บทบาทของออกซิแดนท์ลำดับที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น ผลจากรูปที่ 3 อธิบายได้ว่า  $\text{OH}^\cdot$  จะเป็นตัวริเริ่มให้เกิดการสลายตัวของโอโซน และเกิดกลุ่มของออกซิแดนท์ลำดับที่สองขึ้นตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งในกลุ่มของออกซิแดนท์ลำดับที่สองจะมี  $\text{OH}^\cdot$  ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ดีกว่าโอโซนจึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดลงของสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพีเอช

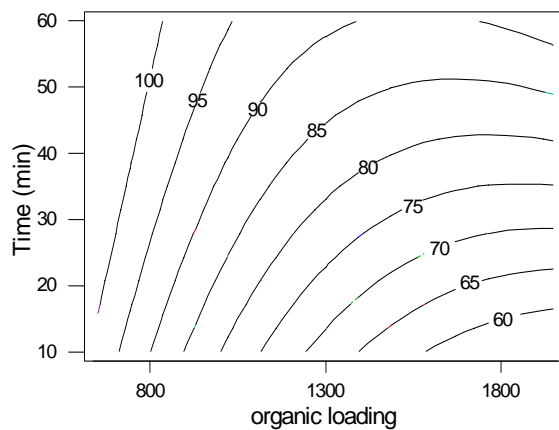


รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและเวลา ที่ภาวะสารอินทรีย์คงที่ที่ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่างๆ

#### ผลของภาวะสารอินทรีย์

รูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาวะและเวลา ที่ค่าพีเอช คงที่ที่ 8.7 ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่างๆ จากกราฟจะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นด้วย

ในการบำบัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยโอโซนจะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ที่ก่อให้เกิดสี โดยโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์โครโมฟอร์ (chromophores) ซึ่งเป็นส่วนของโมเลกุลของสารอินทรีย์ ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะคู่ ซึ่งดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ โดยโอโซนจะไปทำลายพันธะ ทั้งทางตรง และทางอ้อม ทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ เป็นสาเหตุให้สีของน้ำเสียลดลง (สุรพล, 2543)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระสารอินทรีย์และเวลา ที่ค่าพีเอช คงที่ที่ 8.7 ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสีต่างๆ

### การหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่น

ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองพื้นผิวตอบขั้นที่สอง ตามสมการที่ 5 โดยกำหนดค่าเป้าหมายของประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 100 % จากผลการคำนวณทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสม 2 สภาวะ แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งจากตารางแสดงให้เห็นว่า สภาวะที่ 2 จะใช้เวลาในกระบวนการโอโซนเนชั่นน้อยกว่าแต่ต้องปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้เป็น 9.14 ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานที่กำหนดไว้ว่าค่าพีเอชต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 5.5 - 9.0 (เกรียงศักดิ์, 2542) ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด จึงเป็นสภาวะที่ 1 จากนั้นได้ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ (ภาระสารอินทรีย์ 665 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าพีเอช 8.8 เวลา 20 นาที) ผลที่ได้คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเท่ากับ 98.5 % ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้มีความแตกต่างจากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองน้อยกว่า 1.5 %

สภาวะที่	ค่าพีเอช	เวลา (นาที)
1	8.70	20.00
2	9.14	13.70

ตารางที่ 6 สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซนเนชั่นที่ภาระสารอินทรีย์ 650 มิลลิกรัม/ลิตร

## สรุป

ในการศึกษาการใช้โอโซนในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ภาวะสารอินทรีย์ ค่าพีเอชและเวลาที่ใช้ในการโอโซนเนชัน ผลที่ได้คือ ปัจจัยทั้งสามมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาและค่าพีเอช แต่การเพิ่มภาวะสารอินทรีย์จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการกำจัดสีของน้ำเสีย คือ ภาวะเท่ากับ 650 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8.7 โดยใช้เวลาในการโอโซนเนชันเท่ากับ 20 นาที ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลที่สมภาวะดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 1.5 %

## เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัทสยามสเตชันเนอรีซัพพลายส์
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัทด้านสุทธนาการพิมพ์ จำกัด.
- เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต. 2536. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพล รักปทุม. 2543. โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ภาพพิมพ์.
- Cooper, P. 1993. Removing Color from Dyehouse Wastewater. **Journal of Society of Dyer & Colourists**. Vol. 109: pp.1270 - 1279.
- Douglas, C.M. 2005. **Design and analysis of experiment**. 6<sup>th</sup> ed. U.S.A: John Wiley & Sons Inc.
- Gottschalk, C. Libra, J.A. and Saup, A. 2000. **Ozonation of water and waste water**. Germany: Wiley-VCH verlag GmbH.
- Hoigne, J. and Bader, H. 1976. A role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solution. **Water Res.** Vol. 10: pp.376 – 386.
- Lin, S.H. and Yeh, K.L. 1993. Looking to treat wastewater. Try ozone. **Chem Eng.** Vol. 6: pp.112-116.
- Myers, R.H. 1995. **Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. Newyork: John Wiley & Sons Inc.
- Ronald, G. Monika, W. Priya, V. and Pierre, P. 2003. Disinfection efficiency of peracetic acid UV and ozone after enhance primary treatment of municipal wastewater. **Water Res.** Vol. 37: pp.4573-4586.