



# วิทยานิพนธ์

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการ  
โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีซิงค์ออกไซด์  
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

**TREATMENT OF WASTEWATER FROM SOFT DRINK  
PRODUCTION PROCESS THROUGH PHOTOCATALYTIC  
OXIDATION BY SUNLIGHT WITH ZINC OXIDE AS  
CATALYST**

นางสาวฐานิตา เอี่ยมยี่สุน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Treatment of Wastewater from Soft Drink Production Process through Photocatalytic Oxidation by Sunlight with Zinc Oxide as Catalyst

นามผู้วิจัย นางสาวฐานิตา เอี่ยมยี่สุน

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิมมา ชมสุรินทร์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์นฤมล วงศ์นาสุนทร, D.Eng. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล คำรงค์ศรี, Dr.Ing. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วย  
แสงอาทิตย์ที่มีซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Treatment of Wastewater from Soft Drink Production Process through Photocatalytic Oxidation  
by Sunlight with Zinc Oxide as Catalyst

โดย

นางสาวฐานิตา เอี่ยมยี่สุน

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2551

ฐานิตา เอี่ยมยี่สุน 2551: การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปรกรณ์, Ph.D. 166 หน้า

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำอัดลมที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภทสารให้ความหวานและสารเคมีจากการล้างขวดเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน

ส่วนแรกเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีและทีโอซีในน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋องของกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเบื้องต้น ในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่พีเอช 3 และ 12 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า กระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการกำจัดสีและทีโอซีสูงสุดเฉลี่ยที่พีเอช 12 เท่ากับ 52.94% และ 37.88% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้กระบวนการบำบัดเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซิงค์ออกไซด์หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ในน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม ได้แก่ พีเอชเริ่มต้น ปริมาณซิงค์ออกไซด์เริ่มต้นและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้น ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เวลา 30 นาที พบว่า พีเอชเริ่มต้น 12 ปริมาณซิงค์ออกไซด์เริ่มต้น 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้น 15 มิลลิโมลาร์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีโอดีและทีโอซีสูงสุดเฉลี่ย ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาพีเอชเริ่มต้นและปริมาณซิงค์ออกไซด์เริ่มต้นจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาปริมาณซิงค์ออกไซด์เริ่มต้นและความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เริ่มต้น ตามลำดับ และส่วนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้ซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ผลการทดลองที่ได้จากส่วนที่ 2 จะถูกนำมาใช้ในการทดลองส่วนนี้ พบว่า กระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดทีโอซีสูงกว่าการใช้ซิงค์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 32.33% และ 25.31% ตามลำดับ

ฐานิตา

เอี่ยมยี่สุน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

13 / 11 / 51

Thanita Iamyeesoon 2008: Treatment of Wastewater from Soft Drink Production Process through Photocatalytic Oxidation by Sunlight with Zinc Oxide as Catalyst. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sanya Sirivithayapakorn, Ph.D. 166 pages.

Wastewater from soft drink industry containing organic compounds such as sweeteners and chemicals from bottle washing are an important source of environmental contamination. Photocatalytic oxidation process could be considered an alternative method. The purposes of this research were to study and compare the treatment efficiency of wastewater from soft drink production process through photocatalytic oxidation with zinc oxide alone and zinc oxide combined with hydrogen peroxide as catalyst using sunlight as a sole light source. The experiments comprised of 3 parts.

In the first part, preliminary experiments were carried out to evaluate the color and TOC removal efficiency of synthetic water from carbonated soft drink through photocatalytic oxidation in batch reactor with ZnO alone, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alone and ZnO combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at pH 3 and 12. The duration of each experiment was 30 minutes. It was found that the average highest color and TOC removal efficiency at pH 12 were 52.94% and 37.88%, respectively when combined ZnO with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The experimental results indicated that H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> proved to enhance the treatment process when combined with ZnO as compared to ZnO or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> alone. In the second part, experiments were carried out to evaluate the influence of selected parameters on photocatalytic oxidation. The three parameters of interest in this research were initial pH, initial ZnO dosage and initial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration. The duration of each experiment was 30 minutes. It was found that the average maximum COD and TOC removal occurred at pH 12, which was in the same pH range of wastewater, initial ZnO dose of 4 g/l and initial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration of 15 mM. The results from this part were used in the next part. In the final part, experiments were carried out to evaluate the treatment efficiency of wastewater from soft drink production process through photocatalytic oxidation in open channel continuous-flow reactor. The treatment efficiency by immobilized ZnO alone and immobilized ZnO combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as catalyst were studied. The hydraulic retention time was 30 minutes. It was found that the combination of ZnO and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was the most effective process for remove TOC. The average removal efficiency of TOC by ZnO alone and ZnO with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> were 25.31% and 32.33%, respectively.

Thanita Iamyeesoon

Student's signature



Thesis Advisor's signature

13 / 05 / 08

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมทั้งความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จีมา ชมสุรินทร์และผศ.ดร.นฤมล วงศ์ธนาสุนทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาเสียสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการตรวจข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนของบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2549 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานีและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัว คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รวมถึงเพื่อน พี่และน้องทุก ๆ คนที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำงานเสมอมา

ฐานิตา เอี่ยมยี่สุน

เมษายน 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(16)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	105
สรุป	105
ข้อเสนอแนะ	106
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	107
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง	115
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง	119
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ	161
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	166

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าบีโอดี, ของแข็งทั้งหมด (total solids, TS), ค่าความเป็นกรด (acidity) และพีเอชของน้ำอัดลมแต่ละยี่ห้อ	6
2	ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม	6
3	ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	13
4	สมบัติทางกายภาพและเคมีของซิงค์ออกไซด์	14
5	สมบัติทางกายภาพและเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	15
6	ค่าออกซิเดชัน โฟเทนเชียลของสารออกซิเดนต์ต่าง ๆ	16
7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน	23
8	วิธีการเก็บรักษาและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	31
9	สภาวะต่าง ๆ ของการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น	33
10	ค่าตัวแปรที่ทำการทดลองและช่วงค่าแปรผันของการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	35
11	ชุดการทดลองที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง	37
12	สรุปพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในแต่ละการทดลอง	37
13	ลักษณะการทดลองแต่ละรูปและกระบวนการที่เกิดขึ้น	40
14	ลักษณะของน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋อง	51
15	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	52

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ร้อยละการระเหยของน้ำ โดยพิจารณาจากที่คือเอสหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	54
17	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	64
18	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	65
19	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	76
20	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	76
21	ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำอัดลม	80

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
22	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	81
23	การเปลี่ยนแปลงของทีดีเอส หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	82
24	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	83
25	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	85
26	การเปลี่ยนแปลงทีดีเอส หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	86
27	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ปริมาณ ZnO 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	88

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
28	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้น $H_2O_2$ เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	89
29	การเปลี่ยนแปลงพีเอช หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้น $H_2O_2$ ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	90
30	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีที่ความเข้มข้น $H_2O_2$ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	91
31	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริงปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์	94
32	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อพีเอช หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
33	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	96
34	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส	99
35	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร และความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์	102
36	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์	102

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ลักษณะของน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋อง	116
ก2	ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม	116
ข1	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	120
ข2	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนท์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	121
ข3	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	122
ข4	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	123
ข5	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนท์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	123

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข6 ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	124
ข7 ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	124
ข8 ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี $H_2O_2$ เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	125
ข9 ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	125
ข10 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	126
ข11 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี $H_2O_2$ เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	126

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข12 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	127
ข13 การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร	128
ข14 ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	129
ข15 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	130
ข16 การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง	131

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข17	<p>ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส</p>	132
ข18	<p>ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส</p>	133
ข19	<p>การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร</p>	134
ข20	<p>ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส</p>	135
ข21	<p>ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส</p>	136

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข22	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	137
ข23	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	138
ข24	ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	139
ข25	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	140
ข26	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	141

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข27	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	142
ข28	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	143
ข29	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	144
ข30	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	145
ข31	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	146

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข32	ฟิเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	147
ข33	ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	148
ข34	การเปลี่ยนแปลงฟิเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	149
ข35	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	150
ข36	ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	151
ข37	การเปลี่ยนแปลงฟิเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	152

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข38 ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	153
ข39 ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	154
ข40 การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	155
ข41 ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	156
ข42 ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	157

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข43	การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.33 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	158
ข44	ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	159
ข45	ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)	160

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนผังกรรมวิธีการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลม	5
2	ลักษณะของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน	10
3	ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ	13
4	ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง	27
5	องค์ประกอบของชุดทดลองบำบัดน้ำเสียและจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์	28
6	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น	34
7	ขั้นตอนการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	36
8	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง	38
9	สรุปขั้นตอนการทดลองทั้งหมด	39
10	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	42
11	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิเดนต์	44
12	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	46
13	ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง	48

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	55
15	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	56
16	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	57
17	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	58
18	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	59
19	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	61
21	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	62
22	ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	63
23	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	65
24	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	66

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	67
26	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	68
27	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	69
28	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	70
29	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	71
30	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	72

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	73
32	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	74
33	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	75
34	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	77
35	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้น $H_2O_2$ ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์	78

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	83
37	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ปริมาณ ZnO 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	88
38	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีที่ความเข้มข้น $H_2O_2$ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสงและที่ที่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	91
39	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	97
40	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส	98

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส	100
42	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส	101
43	ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์	103
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ข1	พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	120
ข2	พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส	121

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข3	พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO และ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/เซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส	122
ข4	พีเอชหลังจากทำการศึกษาค่าผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร	128
ข5	พีเอชหลังจากทำการศึกษาค่าผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง	131
ข6	พีเอชหลังจากทำการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร	134
ข7	พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)	137
ข8	พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)	140
ข9	พีเอชหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)	143

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ข10	<p>พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)</p>	146
ข11	<p>พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)</p>	149
ข12	<p>พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)</p>	152
ข13	<p>พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)</p>	155
ข14	<p>พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.33 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)</p>	158

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ซม.	=	เซนติเมตร
ตร.ซม.	=	ตารางเซนติเมตร
ม.	=	เมตร
มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
°C	=	องศาเซลเซียส
°K	=	องศาเคลวิน
μM	=	ไมโครโมลาร์
μW/cm <sup>2</sup>	=	ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
A%	=	ร้อยละการระเหยของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
B%	=	ร้อยละการระเหยของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์
BOD <sub>5</sub>	=	Biochemical Oxygen Demand
C%	=	ร้อยละการระเหยของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
C/C <sub>0</sub>	=	ความเข้มข้นที่บำบัดแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้น
cm	=	เซนติเมตร
COD	=	Chemical Organic Carbon
D <sub>1</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในชุดควบคุมของที่ที่ไม่มีแสง
D <sub>2</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดรวมทั้งหมด เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารออกซิแดนซ์ในที่ที่ไม่มีแสง
D <sub>3</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จาก D <sub>2</sub> - D <sub>1</sub>
D <sub>H1</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $D_{H2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนท์
- $D_{H3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนท์
- $D_{Z1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $D_{Z2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $D_{Z3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $D_{ZH1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $D_{ZH2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $D_{ZH3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$D_{ZH1}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$D_{ZH2}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$D_{ZH3}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
E%	=	ร้อยละการระเหยของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$e_{cb}^-$	=	อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า
Eg	=	พลังงานที่ใช้กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา
eV	=	อิเล็กตรอน โวลต์
g	=	กรัม
g/l	=	กรัมต่อลิตร
h	=	ชั่วโมง
$h_{vb}^+$	=	โฮลในแถบวาเลนซ์
HFCS	=	น้ำเชื่อมข้าวโพดฟรุคโตสสูง (high fructose corn syrup)
Hg	=	ปรอท
hv	=	อนุภาคของแสง (photon)
I	=	ความเข้มแสง
k	=	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
l/min	=	ลิตรต่อนาที
$L_1$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในชุดควบคุมของที่มีแสง

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $L_2$  = ประสิทธิภาพการกำจัดรวมทั้งหมด เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารออกซิแดนซ์ในที่มีแสง
- $L_3$  = ประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จาก  $L_2 - L_1$
- $L_{H1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $L_{H2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $L_{H3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $L_{Z1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $L_{Z2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $L_{Z3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
- $L_{ZH1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$L_{ZH1}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$L_{ZH2}$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$
$L_{ZH2}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$L_{ZH3}$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ $H_2O_2$ ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$
$L_{ZH3}'$	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$m^2/g$	=	ตารางเมตรต่อกรัม
$m^3/s$	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
mg/l	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
min	=	นาที
ml/min	=	มิลลิลิตรต่อนาที
mM	=	มิลลิโมลาร์

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

mm	=	มิลลิเมตร
mmol	=	มิลลิโมล
mmol/l	=	มิลลิโมลต่อลิตร
mW/cm <sup>2</sup>	=	มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
N	=	จำนวนซ้ำ
n	=	สัมประสิทธิ์ความขรุขระ
nm	=	นาโนเมตร
P <sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว
P <sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> '	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียวในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
P <sub>phot</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตไลซิสเพียงอย่างเดียว
P <sub>ZnO</sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO เพียงอย่างเดียว
P <sub>ZnO</sub> '	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO เพียงอย่างเดียวในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
P <sub>ZnO+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub>	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
P <sub>ZnO+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> '	=	ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
Q	=	อัตราการไหล
R	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์ (organic molecule)
R'	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์
s <sup>-1</sup>	=	ต่อวินาที
SS	=	ของแข็งแขวนลอย (suspended solids)
T	=	อุณหภูมิ
TDS	=	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids)

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$TDS_{X0}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
$TDS_{XL}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
$TDS_{Y0}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี $H_2O_2$ เป็นสารออกซิแดนซ์
$TDS_{YL}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี $H_2O_2$ เป็นสารออกซิแดนซ์
$TDS_{Z0}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$
$TDS_{ZH0}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$TDS_{ZHL}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$ ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
$TDS_{ZL}$	=	ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$
TOC	=	สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon)
TS	=	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids)
UV	=	รังสีอัลตราไวโอเล็ต
V	=	โวลต์
v	=	ความถี่
W	=	วัตต์
$W/m^2$	=	วัตต์ต่อตารางเมตร

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

w/w	=	น้ำหนักโดยน้ำหนัก
X <sub>1</sub>	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>2</sub>	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>2</sub> '	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A% ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>2L</sub>	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A% โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>3</sub>	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ในที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>3</sub> '	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ในที่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
X <sub>3L</sub>	=	ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ในที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A% โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
Y <sub>1</sub>	=	ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $Y_2$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Y_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B% ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Y_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B% ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Y_3$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Y_3'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B% ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Y_{3L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B% ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์
- $Z_1$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $Z_2$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $Z_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมในที่ที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C% ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- $Z_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมใน  
ที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C% ของกระบวนการโฟโต  
คะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $Z_3$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO  
และ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วย  
แสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$
- $Z_3'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO  
และ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C%  
ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วม  
กับ  $H_2O_2$
- $Z_{3L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO  
และ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C% ของ  
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  
 $H_2O_2$
- $ZH_1$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) เริ่มต้นของกระบวนการโฟโตคะตะ  
ลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในแบบจำลองราง  
เปิดแบบไหลต่อเนื่อง
- $ZH_2$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงของ  
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  
 $H_2O_2$  ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
- $ZH_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงของกระบวนการ  
โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  หลัง  
จากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E% ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหล  
ต่อเนื่อง
- $ZH_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับ  
ค่าด้วยร้อยละการระเหย E% ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน  
ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อ  
เนื่อง

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- ZH<sub>3</sub> = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ที่มีการเติม ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
- ZH<sub>3</sub>' = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ที่มีการเติม ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่ไม่มีแสงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E% ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง
- ZH<sub>3L</sub> = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ที่มีการเติม ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E% ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก  
ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มีซิงค์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

**Treatment of Wastewater from Soft Drink Production Process through  
Photocatalytic Oxidation by Sunlight with Zinc Oxide as Catalyst**

คำนำ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภท น้ำตาลและสารเคมีที่ใช้สำหรับการล้างขวด นอกนั้นเป็นตะกอนแขวนลอย ดังนั้นจึงพบว่าน้ำเสียนี้มีบีโอดีและซีโอดีค่อนข้างสูง เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ได้รับการบำบัดทำให้เกิดปัญหามลพิษได้ การบำบัดโดยทั่วไปที่มักนิยมใช้ ได้แก่ การบำบัดทางชีวภาพ เช่น ระบบตะกอนเร่ง (activated sludge) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันจึงอาจเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์เป็นกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น สีย้อมแอโซออเรนจ์ 7 (Acid Orange 7 Azo Dye), สีย้อมเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange), สีย้อมโรดามายน์ 6จี (Rhodamine 6G), ยาปราบวัชพืช, ลิกนิน (Chang *et al.*, 2004; Carrier *et al.*, 2006; Kansal *et al.*, 2006; Augugliaro *et al.*, 2002) โดยใช้พลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในการเกิดปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ได้แก่ สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (Lizama *et al.*, 2002; Kansal *et al.*, 2006) เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกอนุภาคของแสงที่มีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน (band gap) ตกลงบนผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า (e<sub>cb</sub><sup>-</sup>) และทิ้งช่องว่างในแถบวาเลนซ์ไว้ เรียกว่า โฮล (h<sub>vb</sub><sup>+</sup>) ซึ่งทั้ง e<sub>cb</sub><sup>-</sup> และ h<sub>vb</sub><sup>+</sup> มีบทบาทมากในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน e<sub>cb</sub><sup>-</sup> ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ที่ดูดซับไว้ ทำให้ O<sub>2</sub> เปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์อ็อกซิเดนต์ (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) ส่วน h<sub>vb</sub><sup>+</sup> สามารถรับอิเล็กตรอน (oxidize) จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายโดยตรงหรือไฮดรอกซิลอ็อกซิเดนต์ (OH<sup>-</sup>) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH<sup>•</sup>) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ที่ดูดซับไว้เปลี่ยนเป็น OH<sup>•</sup> ด้วย ซึ่ง OH<sup>•</sup> เป็นสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูง (strong oxidizing agent) มี

ความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (highly reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ ส่วน  $O_2^-$  สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) (Daneshvar *et al.*, 2005, 2006) โดยประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ พีเอช ความเข้มแสง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกันกับ  $H_2O_2$  ซึ่ง ZnO เป็นสารที่มีเสถียรภาพต่อสารเคมี มีความคงตัว ประสิทธิภาพสูง ไม่ติดไฟ ไม่มีความเป็นพิษ (Daneshvar *et al.*, 2006) และสามารถดูดซับแสงที่ความยาวคลื่นต่ำ Lizama (2002) พบว่า ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพดีกว่า  $TiO_2$  ส่วน  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้เกิด  $OH^{\cdot}$  เช่นเดียวกัน จึงพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ ZnO หรือ  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว และเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ดี (ดวงกมล, 2546) สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงได้และยังเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (Thomas, 2002) การเริ่มเดินระบบทำได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายด้วย เนื่องจากไม่ต้องมีการเติมอากาศเหมือนระบบบำบัดทางชีวภาพและใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น, ปริมาณ ZnO เริ่มต้นและความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันโดยใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมี  $H_2O_2$  และไม่มี  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่องในการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสง

## ขอบเขตงานวิจัย

1. ในการทดลองเบื้องต้นและการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ทำการศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวทำการศึกษาในแบบจำลองที่เป็นรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง โดยมีอัตราการไหลคงที่
2. การศึกษานี้ใช้น้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋องในการทดลองเบื้องต้นและใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ในการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ และประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวในแบบจำลอง
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่ใช้ในการทดลองคือ ZnO และ  $H_2O_2$  โดยในการทดลองเบื้องต้นและการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ZnO อยู่ในรูปของสารแขวนลอย ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าว ZnO จะถูกเคลือบบนผิวกระจก
4. พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, สี, ซีไอดี, ทีไอซีและทีดีเอส
5. ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงในวันที่แดดจัด ตั้งแต่เวลา 10.30 น. ถึง 14.30 น. ช่วงเดือนมีนาคมจนถึงเดือนพฤศจิกายน

## การตรวจเอกสาร

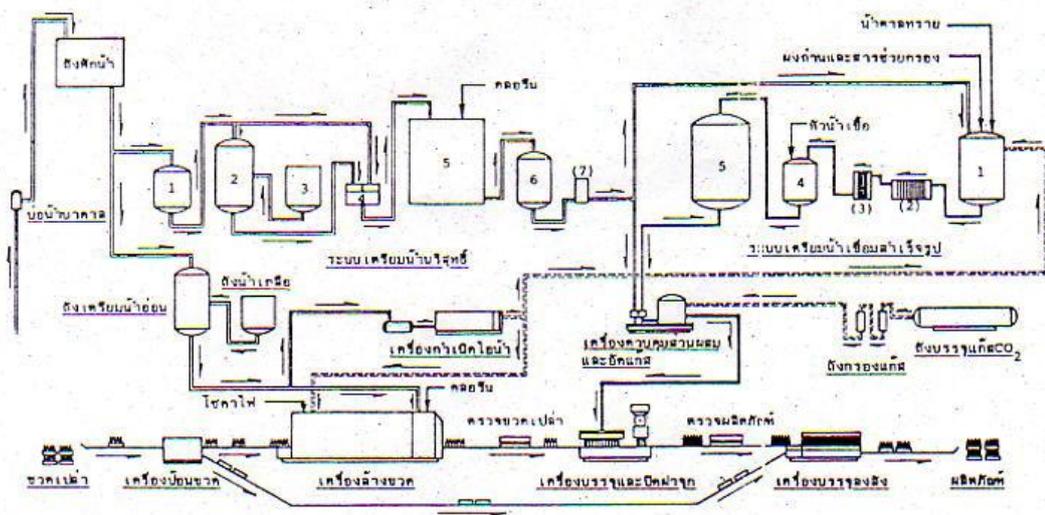
### 1. น้ำอัดลม

น้ำอัดลมเป็นเครื่องดื่มประเภทหนึ่ง ส่วนประกอบหลักของน้ำอัดลมคือน้ำประปา แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมาจากน้ำบาดาลที่ผ่านการกรองและฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน จากนั้นเติมสารให้ความหวาน ได้แก่ ซูโครส ในอดีตการผลิตน้ำอัดลมชนิดธรรมดาจะใช้ซูโครสเพียงอย่างเดียวนำมาผสมน้ำแล้วต้มทำเป็นน้ำเชื่อมและกรอง ปัจจุบันมีการใช้สารให้ความหวานตัวอื่นเพิ่ม เช่น น้ำเชื่อมข้าวโพด (corn syrup) น้ำเชื่อมข้าวโพดแบบฟรุคโตสสูง (high fructose corn syrup: HFCS) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบที่สำคัญอีกชนิด ได้แก่ หวานน้ำเชื่อม ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นและสีกับกรดบางชนิดที่ใช้ในอาหาร เช่น กรดมะนาว หวานน้ำเชื่อมจะนำมาผสมในน้ำเชื่อม จากนั้นก็ทำให้ของผสมทั้งหมดเย็นลงเพื่อที่จะเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยจะนำมาอัดลงในน้ำหวานที่ผสมไว้ ภาพที่ 1 แสดงแผนผังกรรมวิธีการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลมและตารางที่ 1 แสดงลักษณะของน้ำอัดลม

น้ำอัดลมบรรจุขวดหรือกระป๋องที่มีจำหน่ายกันทั่วไปนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะเฉพาะของกลิ่น รสและสีของผลิตภัณฑ์ ได้แก่

ประเภทที่ 1 น้ำอัดลมรสโคล่าหรือน้ำดำ น้ำอัดลมประเภทนี้ปรุงแต่งด้วยหวานน้ำเชื่อมโคล่า ซึ่งมีคาเฟอีนที่สกัดจากส่วนใบของต้นโคคา สำหรับสีน้ำตาลเข้มของน้ำอัดลมชนิดนี้มาจากสีผสมอาหารที่เป็นสีของน้ำตาลเคียวไหม้ (caramel)

ประเภทที่ 2 น้ำอัดลมที่ไม่ใช่โคล่า ได้แก่ น้ำอัดลมสีขาวใสที่ปรุงแต่งด้วยหวานน้ำเชื่อมเลมอน-ไลม์ น้ำอัดลมที่ปรุงแต่งกลิ่นรสเลียนแบบน้ำผลไม้ เช่น ส้ม องุ่น มะนาว ลิ้นจี่ น้ำหวานอัดลมพวกน้ำเขียว น้ำแดงและรูทเบียร์ เป็นต้น น้ำอัดลมเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะไม่มีคาเฟอีน



ระบบเตรียมน้ำไอศูทรี่	(1) ถังกรองทราย (2) Cation exchanger (3) ถังกรวด (4) ถังปรับพีเอช
	(5) ถังฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (6) ถังถ่าน (7) ถังกรองชนิดละเอียด
ระบบเตรียมน้ำเชื่อมสำเร็จรูป	(1) ถังเตรียมน้ำเชื่อม (2) เครื่องกรองน้ำเชื่อม (3) Heat exchanger
	(4) ถังผสมน้ำเชื่อมสำเร็จรูป (5) ถังบ่ม

ภาพที่ 1 แผนผังกรรมวิธีการผลิตเครื่องดื่มน้ำอัดลม  
ที่มา : บริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) (ม.ป.ป.)

2. ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมมักจะเป็นน้ำเสียจากการล้างขวด การผลิตน้ำเชื่อม การบำบัดน้ำและการล้างพื้น โดยทั่วไป ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมจะมี บีโอดีและของแข็งแขวนลอย (suspended solids: SS) สูง รวมทั้งพีเอชที่สูงเช่นกัน เนื่องจากในน้ำเสียประกอบด้วยสารเคมีที่ใช้สำหรับล้างขวด ซึ่งมีความเป็นด่างจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นอกจากนี้ยังมีคลอรีนและฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบอีกด้วย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545) กล่าวว่า น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำอัดลมมีบีโอดีระหว่าง 150-2,400 มก./ล. หรือเฉลี่ย 740 มก./ล. และมีของแข็งแขวนลอยระหว่าง 50-400 มก./ล. หรือเฉลี่ย 190 มก./ล. บีโอดีอาจมีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจมาจากวัตถุดิบที่ใช้ การควบคุมการผลิต รวมไปถึงจนถึงปริมาณการผลิต ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าบีโอดี, ของแข็งทั้งหมด (total solids, TS), ค่าความเป็นกรด (acidity) และพีเอชของน้ำอัดลมแต่ละยี่ห้อ

ยี่ห้อเครื่องดื่ม	บีโอดี, มก./ล.	ของแข็งทั้งหมด, มก./ล.	ความเป็นกรด		พีเอช
			กรดแผลว, มก./ล.	ทั้งหมด, มก./ล.	
Coca-Cola	67,400	114,900	244	1,526	2.4
Pepsi-Cola	79,500	122,000	248	1,466	2.5
Mission Orange	84,300	141,300	570	1,579	3.0
Wagner Lift	64,600	110,800	316	2,253	3.4
Tom Collins, Jr.	66,600	106,900	353	1,246	3.2
Canada Dry					
Quinine water	64,500	101,300	1,181	3,150	2.4
เฉลี่ย	71,200	116,200	490	1,870	

ที่มา : Porges and Struzeski (1960)

ตารางที่ 2 ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

ลักษณะของน้ำ	ค่าที่ได้
พีเอช	10.8
ความเป็นด่างฟีนอลฟธาไลน์, มก./ล.	150
ความเป็นด่างทั้งหมด, มก./ล.	290
บีโอดี, มก./ล.	430
ของแข็งแขวนลอย, มก./ล.	220

ที่มา : Porges and Struzeski (1960)

### 3. กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation)

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง (photoreaction) ซึ่งในกระบวนการนี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts) โดยเร่งที่ผิวหน้าระหว่างสถานะที่ต่างกันของระบบที่มีมากกว่าหนึ่งสถานะ โดยทั่วไป โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนและบางพันธะของโมเลกุลจะเริ่มสลาย

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการนี้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่ 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (conduction band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกัน โดยมีแถบช่องว่างพลังงาน ซึ่งมีความกว้าง  $E_g$  กั้นอยู่

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันในเอควียสเฟส (aqueous phase) คือ กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน  $E_g$  ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่า โฮล (hole,  $h^+_{vb}$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วย  $e^-_{cb}$  ซึ่ง  $h^+_{vb}$  และ  $e^-_{cb}$  สามารถที่จะกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้อีก เรียกว่า รีคอมไบเนชัน (recombination) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของกระบวนการและที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและของเหลว (solid-liquid interface) อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ในสารละลาย เรียกรีดักชัน (reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (donor) ในสารละลายไปสู่  $h^+_{vb}$  ในแถบวาเลนซ์ เรียกออกซิเดชัน (oxidation) (Thomas, 2002) ซึ่ง  $h^+_{vb}$  ที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (strong oxidant) (วุทธินันท์, 2544)

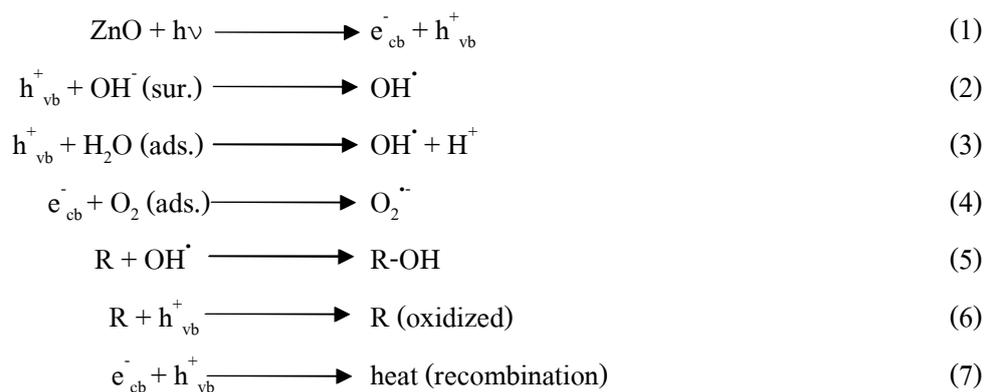
การเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันมี 2 ลักษณะ คือ

3.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย  $OH^\cdot$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $h^+_{vb}$  กับโมเลกุลของน้ำที่ดูดติดกับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ  $OH^-$  และ  $O_2^-$  หรือเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (perhydroxyl radicals :  $HO_2^\cdot$ ) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง  $e^-_{cb}$  กับ  $O_2$  ที่ดูดติดผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารปนเปื้อนในสารละลายที่ดูดติดผิวตัวเร่งปฏิกิริยากับ  $h^+_{vb}$

#### 4. กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับซิงค์ออกไซด์ (UV&ZnO)

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ (Al-Ekabi *et al.*, 1991)



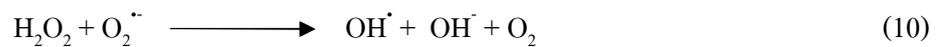
เมื่อ	$h\nu$	=	อนุภาคของแสง (photon)
	$h^+_{vb}$	=	โฮลที่แถบวาเลนซ์
	$e^-_{cb}$	=	อิเล็กตรอนที่แถบความนำ
	$\text{OH}^\cdot$	=	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radicals)
	$\text{O}_2^{\cdot-}$	=	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (superoxide ion radicals)
	R	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์ (organic molecule)

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง UV ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปยังแถบความนำเกิดเป็น  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  อิเล็กตรอนที่แถบความนำ ( $e^-_{cb}$ ) ทำปฏิกิริยากับ  $\text{O}_2$  ที่ดูดติดผิว ZnO ทำให้  $\text{O}_2$  เปลี่ยนไปเป็น  $\text{O}_2^{\cdot-}$  ส่วน  $h^+_{vb}$  สามารถรับอิเล็กตรอน (oxidize) จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในสารละลายโดยตรงหรือ  $\text{OH}^-$  ทำให้เกิด  $\text{OH}^\cdot$  และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ดูดติดผิว ZnO เปลี่ยนเป็น  $\text{OH}^\cdot$  ด้วยเช่นกัน ซึ่ง  $\text{OH}^\cdot$  เป็นสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูง (strong oxidizing agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (highly reactive) และ

ทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในสารละลายที่ดูดซับหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วน  $O_2^-$  สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น  $H_2O_2$  (ธรรมศักดิ์, 2549) ดังสมการ



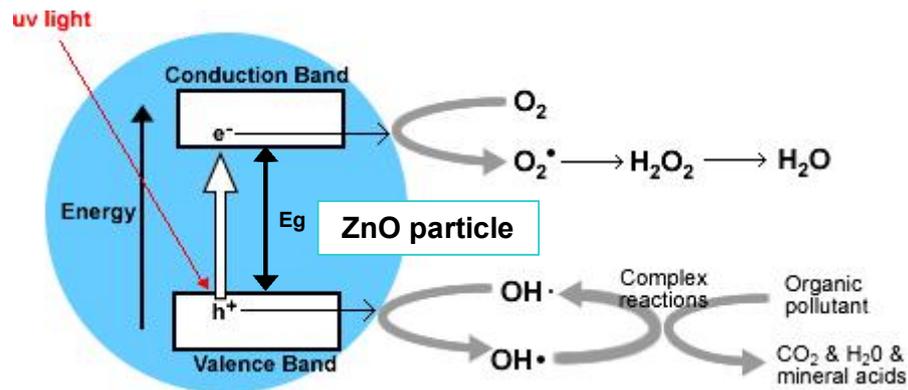
$H_2O_2$  ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ที่ดี  $H_2O_2$  สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ  $e^-_{cb}$  ทำให้เกิด  $OH^\cdot$  ดังสมการที่ 9 และ 10 หรือสามารถทำปฏิกิริยากับแสง UV โดยตรงเกิดเป็น  $OH^\cdot$  ได้ดังสมการ 11 (วุฒินันท์, 2544)



ถ้าไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนที่จะมาทำปฏิกิริยากับ  $e^-_{cb}$  ที่ผิวขั้วออกไซด์  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  จะเกิดรีคอมไบเนชันภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ  $O_2$  ในสารละลายจะทำให้  $e^-_{cb}$  ถูกดึงไปทำปฏิกิริยาตามสมการที่ 4 จึงไม่เกิดรีคอมไบเนชัน เป็นเหตุให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ลักษณะของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันแสดงดังภาพที่ 2

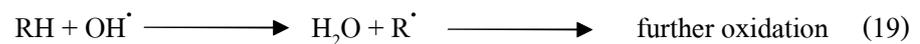
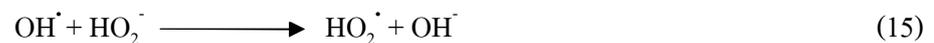
## 5. กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV& $H_2O_2$ )

อุษาพร (2545) กล่าวว่า กระบวนการออกซิเดชันโดยรังสี UV ร่วมกับ  $H_2O_2$  เป็นปฏิกิริยาขั้นเดียวโดย  $H_2O_2$  แตกตัวให้  $OH^\cdot$  ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (R) โดยมีหรือไม่มีโฟตอน กลายเป็น  $R^\cdot$  ซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาสูงและสามารถออกซิไดซ์ต่อไปได้ ปฏิกิริยาต่าง ๆ ของกระบวนการออกซิเดชันของรังสี UV ร่วมกับ  $H_2O_2$  แสดงดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ 2 ลักษณะของการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน

ที่มา : Arena Network (1995)



การย่อยสลายสารอินทรีย์อาจทำได้โดยใช้รังสี UV หรือใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> โดยตรงหรือทำให้เกิดเป็น OH<sup>•</sup> ก่อน ซึ่ง UV ความยาวคลื่น 200-280 nm สามารถให้ประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ร่วมกับหลอดปรอทที่ให้ความยาวคลื่น 254 nm ซึ่งใช้กันโดยทั่วไปและหากตัวทำปฏิกิริยามีไม่จำกัด การกำจัดพิษของสารอินทรีย์สามารถกระทำได้โดยสมบูรณ์ โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ หากสารพิษเป็นสารอินทรีย์ก็จะกลายเป็นเกลือในขั้นสุดท้าย (ธีรวิทย์, 2544)

## 6. กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับซิงค์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV&ZnO&H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

กระบวนการโดยใช้รังสี UV ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการที่นำการบำบัดโดยใช้ UV กับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ UV กับ ZnO มารวมกัน จึงมีแหล่งที่ทำให้เกิด OH<sup>·</sup> อยู่ 2 แหล่ง ได้แก่ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และ ZnO ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าการใช้ ZnO หรือ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการในหัวข้อที่ 4 และ 5 อุษาพร (2545) กล่าวว่า การเติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถทำให้เกิด OH<sup>·</sup> และ O<sub>2</sub> ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น อีกทั้ง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ยังสามารถลดการเกิดรีคอมไบเนชันได้อีกด้วย

## 7. การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ คือการเกาะติดของก๊าซหรือสารละลายบนพื้นผิวของของแข็ง สารปนเปื้อนในของเหลวที่ถูกดูดซับบนผิวของแข็ง เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่สารปนเปื้อนเกาะติดอยู่บนผิวนี้ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

กลไกของการดูดซับเป็นกระบวนการสมดุลที่มีอยู่ทั้งหมด 3 กลไก (เกรียงศักดิ์, 2546) ได้แก่

1. กลไกไฟฟ้าสถิต (electrostatic) การเกิดไฟฟ้าสถิตที่เป็นแรงดึงดูดกันระหว่างตัวดูดซับและสารปนเปื้อนโดยอาศัยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต

2. กลไกทางฟิสิกส์ มีความสำคัญมากที่สุดกลไกหนึ่งและมีแรงดูดซับหลาย ๆ ชนิด ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน, แรงดึงดูดระหว่างขั้ว, แรงแวนเดอร์วาลส์

3. กลไกทางเคมี การเกิดการดูดซับทางเคมีมีแรงดูดซับที่ค่อนข้างแรงกว่า 2 กลไกข้างต้น โดยเกี่ยวข้องกับแรงวาเลนซ์ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุบนผิวตัวกลาง ซึ่งทั้งประจุบวกและลบจะถูกแลกเปลี่ยนกันได้ การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับการดูดซับผิวทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับผิวชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับผิวทางกายภาพ

สามารถผันกลับได้ (reversible) ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนลงจะเป็นผลให้เกิดการคายสาร (desorption) ขึ้น

ในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารอินทรีย์ไปตามผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีอยู่ 4 ลักษณะที่เกิดขึ้น (เกรียงศักดิ์, 2546) ได้แก่

1. การเคลื่อนที่ของของเหลวทั้งก้อน (bulk fluid transport) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำเสียไหลผ่านผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอยู่ภายนอกของผิวฟิล์ม

2. การเคลื่อนที่บริเวณฟิล์มใกล้ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (film transport) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ทั้งก้อน

3. การกระจายภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (intraparticle หรือ pore diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำเสียไหลเข้าไปในรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) แล้วตามด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้า

4. การเกาะติดทางกายภาพ (adsorption) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำเสียผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาจนกระทั่งเกิดแรงทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างเร็ว

## 8. รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นระหว่าง 100-380 nm สามารถแบ่งออกได้เป็น UV-A UV-B และ UV-C ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 และภาพที่ 3

แหล่งกำเนิดของรังสี UV ที่สำคัญมี 2 แหล่งด้วยกัน (อุษาพร, 2545) คือ

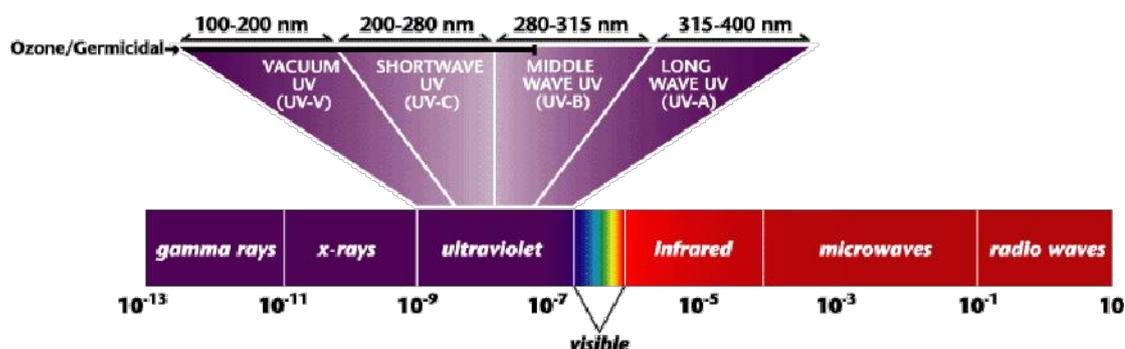
8.1 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (solar radiation) ดวงอาทิตย์สามารถปล่อยรังสีออกมาได้หลายความยาวคลื่น ซึ่งรังสี UV และคลื่นแสง (visible radiation) ที่เดินทางสู่ผิวโลกจะถูกดูดซับไว้ในชั้นบรรยากาศ โดยที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 nm เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศ ความเข้มของ

รังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะโอโซนที่ชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดซับไว้ ดังนั้นจะไม่มีรังสีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 288 nm ตกถึงพื้นโลกเลย รังสีจากดวงอาทิตย์นั้นอยู่ในช่วง UV-A และ solar UV-B (Thomas, 2002)

ตารางที่ 3 ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

สเปกตรัม	ความยาวคลื่น (nm)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )
UV-C (คลื่นสั้น)	100-280	6
UV-B (คลื่นปานกลาง)	280-315	21
UV-A (คลื่นยาว)	315-400	86
แสงที่มองเห็น	400-780	580
รังสีอินฟราเรด	780-10 <sup>6</sup> (1 มิลลิเมตร)	677

ที่มา : Detlef and Harald (2002)



ภาพที่ 3 ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่าง ๆ

ที่มา : R-Can Environmental Inc. (2006)

8.2 แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (artificial source) วัตถุที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2500 °K สามารถที่จะปล่อยรังสี UV ได้ ชนิดของรังสี UV สามารถแบ่งได้โดยชนิดของแก๊ส ดิสชาร์จอาร์คหรือหลอดฟลูออเรสเซนต์หรือแหล่งกำเนิดของแสง ซึ่งทั้งหมดสามารถปล่อยความยาวคลื่นในช่วงที่ต่ำกว่า 260 nm ได้และสามารถทำให้เกิดโอโซนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคได้

รังสี UV ที่แผ่ออกมามีทั้งผลบวกและผลลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของรังสี UV ที่ได้รับเข้าไปของแต่ละคน ผลทางด้านบวกนั้น รังสี UV สามารถสังเคราะห์วิตามิน D3 ซึ่งช่วยป้องกันโรคกระดูกผุ เป็นประโยชน์ทางด้านอายุรแพทย์ ส่วนผลทางด้านลบ ได้แก่ ทำให้ผิวแห้ง ปวดแสบปวดร้อน เกิดริ้วรอย ทำให้ตาพร่ามัวและทำให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง

## 9. ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide photocatalyst: ZnO)

ในกระบวนการโฟโตคะตะลิสติกออกซิเดชัน กลุ่มโลหะที่เป็นโลหะออกไซด์มักนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการนี้ โดยทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโลหะออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่พบว่ามีการนำมาใช้กันรองลงมาจาก  $\text{TiO}_2$  ก็คือ ZnO สมบัติทางกายภาพและเคมีของ ZnO แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางกายภาพและเคมีของซิงค์ออกไซด์

สมบัติทางกายภาพ	สมบัติทางเคมี
1. มีลักษณะเป็นของแข็ง	1. จุดหลอมเหลว 1975 องศาเซลเซียส
2. สีขาว ค่อนข้างเหลือง	2. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 5.607 ที่ 20 องศาเซลเซียส
3. ไม่มีกลิ่น	3. ไม่ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ แต่ละลายในกรดอะซิติก แอมโมเนีย แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนต
4. น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 81.37	

ที่มา : OSHA (n.d.)

ZnO มักจะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากมีเสถียรภาพต่อสารเคมี มีความคงตัว มีประสิทธิภาพสูง (Kansal, 2006) ไม่ติดไฟ มีช่องว่างพลังงาน Eg ไม่สูง ดูดซับแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำและค่าใช้จ่ายต่ำ

## 10. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพสูง โดยมีอำนาจสูงกว่าคลอรีน คลอรีนไดออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยมีออกซิเดชันโพเทนเชียล (oxidation potential) เท่ากับ 1.8 โวลต์ มีใช้กันในระดับร้อยละ 30 หรือ 50 โดยน้ำหนัก (เกรียงศักดิ์, 2546) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถดูดซับแสง UV ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 300 nm สมบัติทางกายภาพและเคมีของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> แสดงดังตารางที่ 5 และค่าออกซิเดชันโพเทนเชียลของสารออกซิเดนต์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สมบัติทางกายภาพ	สมบัติทางเคมี
1. มีลักษณะเป็นของเหลว	1. จุดเดือด 100 องศาเซลเซียส
2. ไม่มีสี	2. จุดหลอมเหลว -11.1 องศาเซลเซียส
3. กลิ่นฉุน	3. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.0
4. น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 34.0	4. ความหนาแน่นไอเท่ากับ 1.2
	5. ความหนืดเท่ากับ 5 มิลลิปาสคาล.วินาที ที่ 25 องศาเซลเซียส
	6. ละลายได้ในน้ำและอีเทอร์

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (n.d.)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้หลายชนิดทั้งในอากาศ น้ำดินและสลัดจ์ เช่น ใช้กำจัดพิษของไซยาไนด์ในน้ำเสีย กำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน บำบัดน้ำเสียจากการล้างอัดฟิล์มซึ่งมีซัลไฟด์และเงินปนเปื้อนอยู่ กำจัดก๊าซซัลเฟอร์และไนโตรเจนออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกจากกระบวนการเผาถ่านหิน (ธีรวิทย์, 2544) ในทางอุตสาหกรรม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ได้ถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมในยาข้อมผม ใช้ในการฟอกย้อมสีเยื่อกระดาษและผ้า ส่วนผลกระทบต่อสุขภาพ ได้แก่ ทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังถึงผิวไหม้ เมื่อความเข้มข้นสูง ทำลายระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหารและระบบประสาท (Thomas, 2002)

ตารางที่ 6 ค่าออกซิเดชันโพเทนเชียลของสารออกซิเดนต์ต่าง ๆ

สารออกซิเดนต์	ค่าออกซิเดชันโพเทนเชียล, โวลต์
ฟลูออรีน	3.0
ไฮดรอกซิลเรดิคัล	2.8
โอโซน	2.1
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1.8
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	1.7
คลอรีนไดออกไซด์	1.5
คลอรีน	1.4

ที่มา : US Peroxide's Commercial Office (n.d.)

## 11. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันมีหลายอย่างด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นทำให้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ตาม ได้แก่ พีเอช ปริมาณของ ZnO ความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น ความเข้มแสง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย เป็นต้น

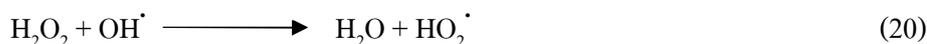
11.1 พีเอช เป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากพีเอชมีผลต่อความสามารถ ในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย เพราะ ประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเมื่อพีเอชสูงหรือต่ำ โดยประจุที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นบวกที่พีเอชต่ำและเป็นลบที่พีเอชสูงและนอกจากนั้น Tang *et al.* (1995) พบว่า  $h^+_{vb}$  มีอิทธิพล ต่อกระบวนการเมื่อพีเอชต่ำ ในขณะที่  $OH^\cdot$  มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาเมื่อพีเอชสูง เช่นเดียวกับ Goncalves *et al.* (1999) ได้กล่าวไว้ว่า ในสารละลายที่เป็นด่าง  $OH^\cdot$  ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการ แลกเปลี่ยนประจุระหว่าง  $OH^\cdot$  และ  $h^+_{vb}$  ส่วนสารละลายที่เป็นกรดและกลาง ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะ เกิดที่  $h^+_{vb}$  ได้โดยตรง

11.2 ปริมาณของ ZnO อนุภาค ZnO ในสารละลายทำหน้าที่ให้  $OH^\cdot$  ปฏิกิริยาและเร่งให้ เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ZnO ไม่เพียงแต่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ทำหน้าที่เป็นตัว กลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะ การยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับ

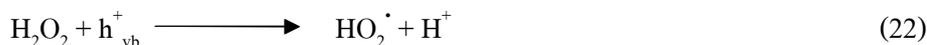
ปริมาณและขนาดของอนุภาค ZnO ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยควบคุมการเกิดปฏิกิริยา โดยทั่วไป ตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพสูงจะต้องมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 5-1000 ตารางเมตร/กรัม (สมชัย, 2546)

ปริมาณที่มากเกินไปในสารละลายจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันลดลง เนื่องจากอนุภาคของ ZnO จะขัดขวางแสง UV ที่ส่องลงไปในสารละลาย ทำให้ปริมาณ ZnO ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงและปริมาณ OH<sup>•</sup> ลดลง

11.3 ความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เมื่อความเข้มข้นของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัด จะเพิ่มขึ้น เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นทำให้มี OH<sup>•</sup> ที่พร้อมทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่ถ้ามีความเข้มข้น สูงเกินไปหรือมี H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ส่วนเกิน ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับ OH<sup>•</sup> ก่อให้เกิดเป็นน้ำและ O<sub>2</sub> ทำให้ปริมาณของ OH<sup>•</sup> ลดลง ดังสมการ



สำหรับกระบวนการที่ใช้รังสี UV ร่วมกับ ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่เติมลงไป ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะไปทำปฏิกิริยากับ e<sub>cb</sub><sup>-</sup> ดังสมการที่ 9 ทำให้ไม่เกิดการรวมตัวกันของ e<sub>cb</sub><sup>-</sup> และ h<sub>vb</sub><sup>+</sup> แต่ถ้ามีปริมาณ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> มากเกินไปก็อาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง เนื่องจาก H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> อาจไปทำปฏิกิริยากับ h<sub>vb</sub><sup>+</sup> ดังสมการ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ h<sub>vb</sub><sup>+</sup> มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ OH<sup>•</sup> ลดลง อีกทั้ง HO<sub>2</sub><sup>•</sup> ที่ได้มีความสามารถในการออกซิเดชันน้อยกว่า OH<sup>•</sup> มาก

11.4 ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น ข้อมูลวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำ เช่น คลอโรฟอร์ม ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นด้วย (Ince, N.H. and D.T. Gonenc, 1997)

11.5 อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการเกิดรีคอมไบเนชันของ  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  อาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหรือจากการลดลงของพลังงานการกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (Serpone and Pelizzetti, 1989) แต่ในบางงานวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่เกิดจากพลังงานความร้อนที่สารละลายได้รับจากรังสี UV มีผลกระทบน้อยต่อการบำบัดสีย้อม (วุทธิพันธ์, 2544)

11.6 ปริมาณออกซิเจนละลาย อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายเพิ่มขึ้น (Thomas, 2002) ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก เพราะ  $O_2$  จะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ  $e^-_{cb}$  ที่แถบความนำ ทำให้เกิด  $O_2^-$  และจะทำปฏิกิริยากับ  $H^+$  ต่อไปได้เป็น  $H_2O_2$  และด้วยเหตุนี้ส่งผลให้  $O_2$  ทำหน้าที่เป็นตัวยึดเวลารีคอมไบเนชันของ  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  นอกจากนี้  $O_2$  ยังทำให้เกิด  $OH^\bullet$  (อุษาพร, 2545)

11.7 ความเข้มแสง เนื่องจากความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง (ความเข้มแสงคือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา; อนุภาคแสง 1 โฟตอนที่มีความถี่  $\nu$  มีพลังงาน  $E = h\nu$  คิดเป็น 1 ควอนตัม) ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น  $E_T$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ/พลังงานของแสง 1 โฟตอน} \\ &= E_T / h\nu \end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \text{ความเข้มของแสง} / h\nu$$

ไอน์สไตน์ได้ตั้งสมมติฐานว่า 1 โฟตอนจะทำเกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ดังนั้นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนแปรผันตามจำนวนโฟตอนและความเข้มแสง

เพื่อที่จะกระตุ้น ZnO ให้เกิด  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  ต้องใช้ความยาวคลื่นแสงประมาณ 390 nm หรือต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มแสงและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่ เมื่อถึงจุดจำกัดของการ

เคลื่อนย้ายมวล (mass transfer limit) อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพควอนตัมของการสลายตัว (quantum efficiency of degradation = สัดส่วนสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำและจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง (Ollis, 1991)

จากข้อมูลงานวิจัยของวูทชินันท์ (2544) เมื่อความเข้มแสงลดลง มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากจำนวนโฟตอนที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำแปรผันตรงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป ถ้าความเข้มแสงต่ำ จำนวนโฟตอนจะต่ำด้วย อนุภาคของสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นน้อยลง  $e^-_{cb}$  และ  $h^+_{vb}$  จึงเกิดขึ้นน้อยลง ทำให้  $OH^\cdot$  และการออกซิเดชันโดยตรงระหว่าง  $h^+_{vb}$  และโมเลกุลของสารที่ต้องการบำบัดน้อยลงตามไปด้วย และเมื่อความเข้มแสงเป็นศูนย์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงมากจนแทบไม่เกิดปฏิกิริยา เนื่องจากไม่มีโฟตอนที่ใช้ในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา

11.8 ปริมาณอ็อกซิเจน-ลบในสารละลาย โดยปกติแล้วน้ำเสียจะมีสารอนินทรีย์ประจุลบ และประจุบวกประกอบอยู่ด้วย นอกเหนือจากสารอินทรีย์ เช่น เฟอร์ริก, เฟอร์รัส, แมงกานีส, คลอไรด์, คาร์บอเนต, ไบคาร์บอเนต, ซัลเฟต, ไนเตรทและฟอสเฟต ซึ่งอ็อกซิเจนบางชนิดจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาและบางชนิดจะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา น้ำเสียที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์ หากมีความเข้มข้นของโลหะสูงในน้ำเสียนั้น อาจจะต้องทำการบำบัดขั้นต้นเพื่อกำจัดโลหะออกบางส่วน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายตัวของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (Venkatadri and Peters, 1993)

## 12. งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน

การใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันมีหลายกรณีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการใช้แสง UV เพียงอย่างเดียว ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวหรือการใช้แสง UV ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ได้แก่  $TiO_2$  (วูทชินันท์, 2544; วิไลวรรณ, 2548)  $ZnO$  (Evgenidou *et al.*, 2005; Kaniou *et al.*, 2005; Mrowetz *et al.*, 2006) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารออกซิเดนต์ควบคู่กันไปด้วย ได้แก่  $H_2O_2$  และ โอโซน ( $O_3$ ) (เสริย์และคณะ, ม.ป.ป.; Vlasta *et al.*, 1995, Behnajady *et al.*, 2004; Muruganandham and Swaminathan, 2004; Azam and Hamid, 2006; Dominguez *et al.*, 2005; Evgenidou *et al.*, 2005, Mrowetz *et al.*, 2006) โดย Kaniou (2005) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา  $TiO_2$  และ  $ZnO$  ในการกำจัดซัลฟาเมทาซีน (sulfamethazine) พบว่า  $ZnO$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดดีกว่า  $TiO_2$  ส่วน Behnajady *et al.* (2004)

พบว่าการใช้แสง UV และ  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียต่ำกว่าการใช้ UV ร่วมกับ  $H_2O_2$  และยังได้มีผู้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ UV ร่วมกับ  $H_2O_2$ , UV ร่วมกับ  $TiO_2$  และ  $H_2O_2$  และ UV ร่วมกับ  $TiO_2$  ในการกำจัดบีโอดี, ซีโอดีและสีจากโรงงานไม้อัดแผ่นเรียบ ซึ่งพบว่า การใช้ UV ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดบีโอดี, ซีโอดีและสีได้ดีที่สุดเท่ากับ 50%, 81.65% และ 84.38% ตามลำดับ (อุษาพร, 2545) เช่นเดียวกันกับ Domínguez *et al.* (2005) พบว่า การใช้ UV ร่วมกับ  $TiO_2$  และ  $H_2O_2$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี, ทีโอดีและสีของแอซิดเรด 88 (acid red 88 azo dye) ได้ดีกว่าการใช้ UV ร่วมกับ  $TiO_2$  และเมื่อมีการใช้ UV ร่วมกับ  $O_3$  ในการกำจัดซีโอดีของสารปราบศัตรูพืช พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมากกว่าการใช้  $O_3$  เพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ จำนวนมากที่นำมาใช้ในงานวิจัย เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS),  $Fe_2O_3$  หรือ  $SnO_2$  (Muruganandham *et al.*, 2005)

กระบวนการนี้สามารถใช้กำจัดสีย้อมได้ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟเยลโล 17 (reactive yellow 17) และสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 (reactive blue 19) โดยใช้ UV ร่วมกับ  $TiO_2$  พบว่า สีย้อมรีแอคทีฟเยลโล 17 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบโมโนอะโซ (monoazo) ถูกกำจัดได้ดีกว่าสีย้อมรีแอคทีฟบลู 19 ที่มีโครงสร้างแบบแอนทราควิโนน (anthraquinone) (วูทชินันท์, 2544) หรือการใช้ UV ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟออเรนจ์ 4 (reactive orange 4) ซึ่งเป็นสีย้อมรีแอคทีฟคลอโรไตรเอซีน (chlorotriazine reactive azo dye) หรือสีแอซิดออเรนจ์ 7 (acid orange 7: AO7) (Behnajady *et al.*, 2004; Muruganandham and Swaminathan, 2004) นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดฟีนอล (Brezová *et al.*, 1995) และยังสามารถลดความเป็นพิษของโครเมียม ( $Cr^{6+}$ ) และตะกั่ว (เสริย์ และคณะ, ม.ป.ป.; วิไลวรรณ, 2548)

การบำบัดโลหะหนักหรือสีย้อมผ้าเพียงอย่างเดียวด้วยกระบวนการนี้ ในงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่า มีประสิทธิภาพดี แต่เมื่อศึกษาโดยรวมเอาสีย้อมผ้าและโลหะหนักเข้าด้วยกัน วิไลวรรณ (2548) พบว่า มีข้อจำกัดในการบำบัดโลหะหนัก เนื่องจากแสงจะถูกดูดซับทั้งจากอนุภาค  $TiO_2$  และสีย้อมผ้าที่อยู่ในสารละลาย ทำให้การส่องผ่านของแสงลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงลดลงด้วย

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยานี้ได้มีผู้ทำการศึกษาไว้หลายกรณีเช่นกัน ได้แก่ พีเอช ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของสารออกซิแดนท์ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการกำจัด ความเข้มแสง ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง (วูทชินันท์, 2544; เสริย์ และคณะ, ม.ป.ป.; Brezová *et al.*, 1995; Behnajady *et al.*, 2004; Muruganandham and Swaminathan, 2004) วูทชินันท์ (2544) พบว่า ที่

สภาพต่างสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเฮลโล 17 และสีย้อมรีแอคทีฟลู 19 ได้ดี ส่วนการกำจัดสีโอดีจากสารปราบศัตรูพืชเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชมากกว่า 7 เช่นเดียวกับ Behnajady *et al.* (2004) พบว่าที่สภาพเป็นกลางหรือด่าง ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม AO7 และรีแอคทีฟเรด 22 (reactive red 22) เกิดขึ้นได้ดี ตามลำดับ เนื่องจากในสารละลายที่เป็นด่าง  $\text{OH}^-$  สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าที่สภาพเป็นกลางและกรด แต่วิไลวรรณ (2548) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเฮลโล 17 เกิดขึ้นได้ดีที่สุดที่พีเอช 3 ส่วนในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟออเรนจ์ 4 และการลดพิษของ  $\text{Cr}^{6+}$  ประสิทธิภาพจะดีขึ้นเมื่อมีสภาพเป็นกรด (เสรีย์ และคณะ, ม.ป.ป.; Muruganandham and Swaminathan, 2004) เช่นเดียวกับอุษาพร (2545) พบว่า การกำจัดบีโอดี, ซีโอดีและสีจากน้ำเสียโรงงาน ไม้อัดแผ่นเรียบมีประสิทธิภาพดีที่พีเอช 3

ส่วนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้ามีการเติมในปริมาณที่มากขึ้น ประสิทธิภาพของการกำจัดจะดีขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น (Kansal *et al.*, 2006) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณที่เหมาะสม ถ้าเติมมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะไปขัดขวางแสง UV (วุทธินันท์, 2544; Behnajady *et al.*, 2004; Muruganandham and Swaminathan, 2004) สำหรับปริมาณของสารออกซิแดนซ์ที่ได้มีผู้ทำการศึกษาผลของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในการกำจัดสีย้อมชนิดโมโนเอโซประจุลบแอซิดเรด 27 (acid red 27 monoazo anionic dye) และการเกิดกระบวนการไมเนอรัลไลเซชัน (mineralization) ของมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Yang *et al.*, 2005; Behnajady *et al.*, 2006) สอดคล้องกันกับ Behnajady and Modirshahla (2005) และ Daneshvar *et al.* (2005) ที่ได้ทำการศึกษากำจัดสีของซีไอแอซิดออเรนจ์ 7 (C.I. acid orange 7) และแอซิดเรด 27 (acid red 27) ตามลำดับ เนื่องจาก  $\text{OH}^-$  เพิ่มมากขึ้น ซึ่ง Behnajady *et al.* (2006) พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมชนิดโมโนเอโซประจุลบแอซิดเรด 27 เท่ากับ 0.05 มก./ล. แต่ขณะเดียวกันก็พบว่า เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพิ่มมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง (Azam and Hamid, 2006) ซึ่ง Kaniou (2005) ได้อธิบายไว้ว่า โดยปกติแล้วสารปนเปื้อนจะเกาะติดบนผิวของ  $\text{TiO}_2$  ทำให้เกิดการกำจัดได้ และเมื่อเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  ในปริมาณที่มากเกินไป  $\text{H}_2\text{O}_2$  ส่วนเกินจะไปแย่งพื้นที่ผิวในการเกาะติดระหว่างสารปนเปื้อนและ  $\text{TiO}_2$  จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดน้อยลง อีกเหตุผลหนึ่งก็คือ  $\text{OH}^-$  จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ได้เป็น  $\text{HO}_2^{\cdot}$  ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า  $\text{OH}^-$  (Daneshvar *et al.*, 2005) เช่นเดียวกับ Muruganandham *et al.* (2005) พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมชนิดเอโซรีแอคทีฟเฮลโล 14 (reactive yellow 14 azo dye: RY 14) เท่ากับ 20 มิลลิโมล แต่ถ้าปริมาณความเข้มข้นมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง แต่  $\text{H}_2\text{O}_2$  ไม่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้

UV ร่วมกับ ZnO ซึ่งตรงกันข้ามกับผลของ Evgenidou *et al.* (2005) พบว่า  $H_2O_2$  ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดน้อยลง

สำหรับความเข้มข้นของสารที่ต้องการกำจัด ได้มีผู้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสี ย้อมรีแอคทีฟแบลค 5 (reactive black 5) และทีโอซี พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความขุ่นเพิ่มขึ้น ความเข้มแสงที่ส่งลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาจะลดน้อยลง ดังนั้น ประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งสีและทีโอซีก็ลดลงด้วย (Tang and Chen, 2004) เช่นเดียวกันกับ Behnajady and Modirshahla (2005) ที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีของซีไอแอชคอรอนจ์ 7 โดยใช้ UV ร่วมกับ  $H_2O_2$

รูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำจัดสารปนเปื้อน อุษาพร (2545) พบว่า  $TiO_2$  แบบที่ยึดติดตัวกลางมีความเหมาะสมในการบำบัดมากกว่าแบบแขวนลอย และนอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาชนิดของแหล่งกำเนิดแสง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสีของเมธิลีนบลู (methylene blue) ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $TiO_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้หลอดปรอทความดันไอต่ำ เช่นเดียวกันกับ Kansal *et al.* (2006) พบว่า การใช้ ZnO โดยมีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมดีกว่าการใช้หลอด UV แต่ Muruganandham and Swaminathan (2004) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบการใช้แสงอาทิตย์กับหลอด UV พบว่า แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและย่อยสลายต่ำกว่าการใช้หลอด UV เป็นแหล่งกำเนิดแสง

นอกจากจะทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการนี้แล้ว ในอีกด้านหนึ่งก็ได้มีผู้ทำการศึกษาตัวยับยั้งปฏิกิริยา ได้แก่ NaOH, โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และ โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ซึ่งไปยับยั้งอัตราการกำจัดสีรีแอคทีฟออเรนจ์ 4 (reactive orange 4) (Muruganandham and Swaminathan, 2004) เอทานอลจะยับยั้งอัตราการกำจัด AO7 (Behnajady *et al.*, 2004) และ  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  จะยับยั้งอัตราการกำจัดฟีนอล (Brezová *et al.*, 1995)

สำหรับความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเป็นระบบบำบัดขั้นต้นนั้น อุษาพร (2548) กล่าวว่า กระบวนการนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดขั้นต้น ควรที่จะผ่านระบบอื่นก่อนที่จะเข้ากระบวนการ ตารางที่ 7 แสดงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน

ตารางที่ 7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน

Catalyst	Substrate	Light source	Reaction time / Flow rate	Type of reactor	Condition	Efficiency / Final concentration	Effect of ions	Reference
Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / TiO <sub>2</sub>	Textile wastewater	UV	60 min	batch	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration 300 mg/l, Fe <sup>2+</sup> 80 mg/l, pH 3, I 90 W	Decolorization 93% COD removal 56%	Not reported	จันทนภาและคณะ (2546)
TiO <sub>2</sub>	Methylene blue	UV	6 h	Not reported	dye concentration 5 μM, pH 4, I 30 mW/cm <sup>2</sup>	Decolorization มากกว่า 90%	Not reported	Kuo & Ho (2001)
		Sunlight			dye concentration 30 μM, pH 7, I 113 μW/cm <sup>2</sup>	Decolorization มากกว่า 90%		
ZnO-mediated	C.I. reactive red 22 (RR22)	Sunlight	30 ml/min	Thin film flat bed photoreactor	ZnO 3 g, dye concentration 200 μM, volume 500 ml, pH 10, I 808-1070 W/m <sup>2</sup>	Decolorization 52.7%	Not reported	Roselin <i>et al.</i> (2002)

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Catalyst	Substrate	Light source	Reaction time / Flow rate	Type of reactor	Condition	Efficiency / Final concentration	Effect of ions	Reference
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Direct yellow 86	low pressure Hg UV lamps	80 ml/min	Continuous annular photoreactor	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration 150 mg/l, dye concentration 50 mg/l, pH 3, I 88 W/m <sup>2</sup>	Decolorization มากกว่า 90%	Not reported	Shen & Wang (2002)
Suspended TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Cibacron navy P-2R-01	Osram-Vitaluks UV lamp	100 min	Open batch 1000 ml	TiO <sub>2</sub> 0.76 g/l, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> concentration 0.02 M, dye concentration 50 g/l, pH 5	Decolorization 52%	Not reported	Genç (2004)
SnO <sub>2</sub> /layer silicate nanocomposites	Salicylic acid	High-pressure Hg lamp 150 W	1 h	Not reported	SnO <sub>2</sub> /layer silicate suspension 0.15 mmol/l	76%	Not reported	Lászlo (2004)

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Catalyst	Substrate	Light source	Reaction time / Flow rate	Type of reactor	Condition	Efficiency / Final concentration	Effect of ions	Reference
TiO <sub>2</sub> (immobilized)	C.I. acid red 27 (AR 27)	4 low pressure Hg UV lamps (30 W)	20 ml/min	Tubular continuous flow photoreactor	TiO <sub>2</sub> 4 g/l, pH 3, AR concentration 30 mg/l, I 58.5 W/m <sup>2</sup> , ความยาว reactor 80 cm	Decolorization 42% Degradation 28%	Not reported	Behnajady <i>et al.</i> (2006)
ZnO	Methyl orange (MO) Rhodamine 6G (R6G)	UV Solar light	MO: 4 h R6G: 3 h MO: 90 min R6G: 90 min	Not reported	MO: 25 mg/l, ZnO 1 g/l, pH 8 R6G: 25 mg/l, ZnO 0.5 g/l, pH 10 MO: 25 mg/l, ZnO 1 g/l, pH 8 R6G: 25 mg/l, ZnO 0.5 g/l, pH 10	COD removal 89% COD removal 75% COD removal 80% COD removal 77%	Not reported	Kansal <i>et al.</i> (2006)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### สารเคมี

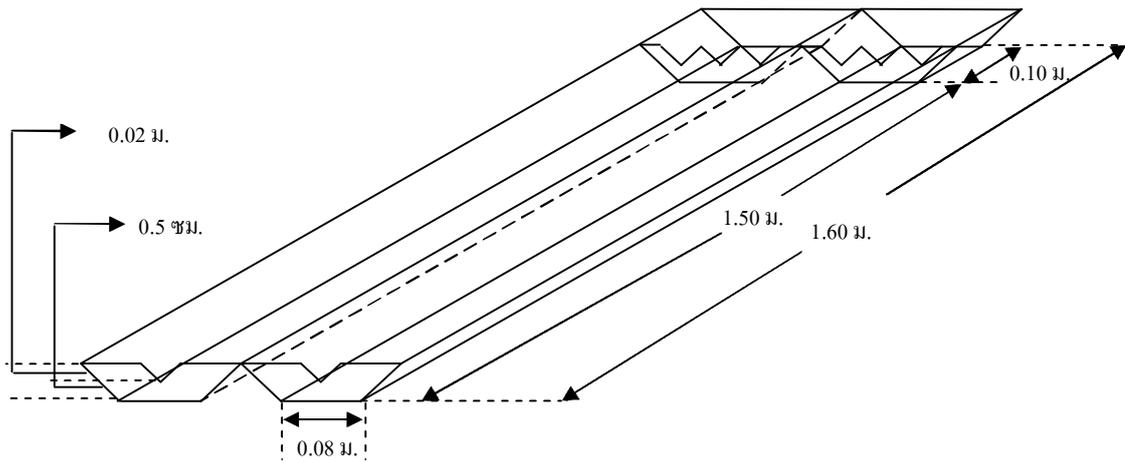
1. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 99.0% Analytical Reagent Grade UNIVAR Ajax Finechem
2. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 30% w/w Analytical Reagent Grade UNIVAR Ajax Finechem
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้นของบริษัท J.T.Baker Analytical Reagent Grade
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ของบริษัท Merck Analytical Reagent Grade

### อุปกรณ์

1. ชุดทดลองถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน มีรายละเอียดดังนี้

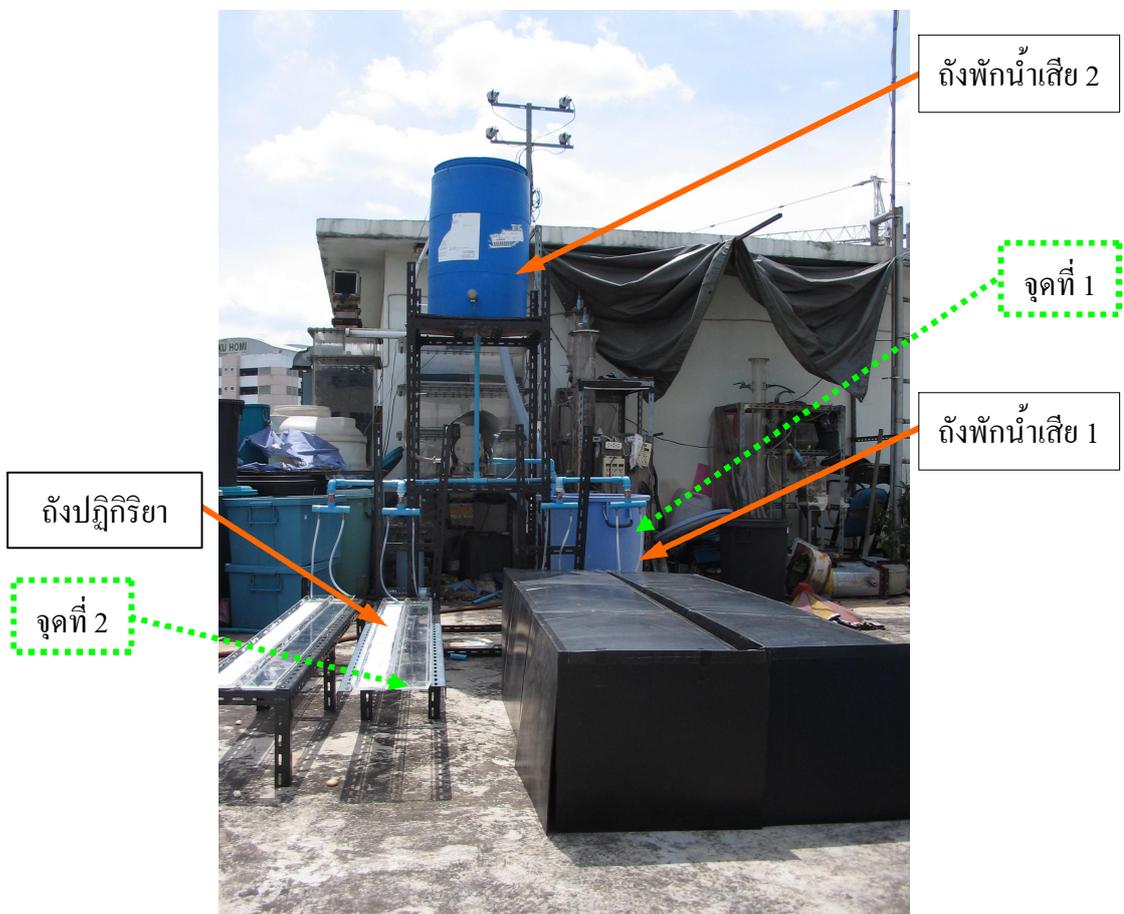
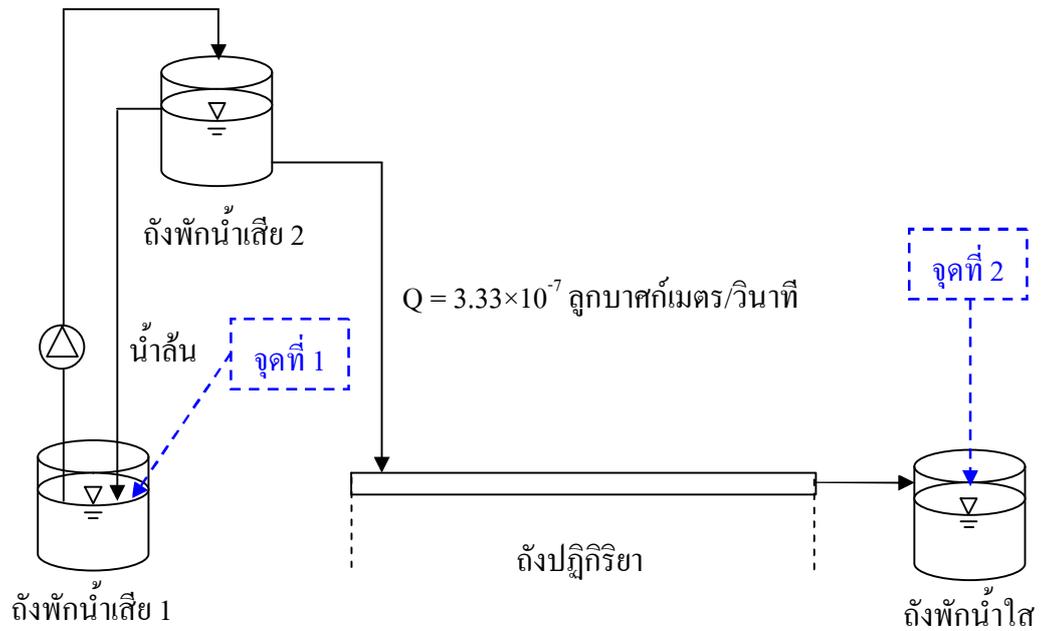
1.1 ชุดทดลองถึงปฏิกิริยาทำจากแผ่นอะคริลิกพลาสติก (acrylic plastic) ใส มีลักษณะเป็นรางจำนวน 2 รางประกอบติดกัน มีความกว้าง 0.16 เมตร ความยาวทั้งราง 1.60 เมตรและความสูง 0.02 เมตร โดยที่แต่ละรางมีความกว้าง 0.08 เมตรและความยาวบริเวณที่บรรจุกระจกซึ่งเคลือบด้วย ZnO 1.50 เมตรและมีถึงพิกน้ำรูปทรงสี่เหลี่ยมความกว้าง 0.08 เมตร ความยาว 0.10 เมตรและความสูง 0.02 เมตร ติดอยู่กับตัวรางที่ปลายด้านหนึ่ง โดยด้านบนของแผ่นกั้นน้ำก่อนเข้าสู่บริเวณที่บรรจุกระจกมีลักษณะเป็นฟันปลา ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งปิดไว้ด้วยฝาย (weir) ชนิดสามเหลี่ยมมุม 90 องศา (V-notch weir 90°) ความสูงจากก้นรางถึงสันฝาย 0.5 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 4

1.2 แผ่นกระจกเคลือบด้วย ZnO ความกว้าง 0.08 เมตรและความยาว 0.30 เมตร พื้นที่ผิวแต่ละอันเท่ากับ 240 ตารางเซนติเมตร ในแต่ละรางจะบรรจุกระจกจำนวน 5 แผ่น



ภาพที่ 4 ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

องค์ประกอบของชุดทดลองดังกล่าวและจุดเก็บตัวอย่างน้ำแสดงดังภาพที่ 5 องค์ประกอบต่าง ๆ ของชุดทดลองได้นำไปติดตั้งที่ชั้นดาดฟ้า อาคารภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ น้ำเสียที่อยู่ในถังพักน้ำเสีย 1 จะถูกสูบขึ้นไปยังถังพักน้ำเสีย 2 และน้ำเสียจะถูกปล่อยลงมาเข้าสู่ถังปฏิกิริยาที่บรรจุแผ่นกระจกเคลือบด้วย ZnO โดยน้ำเสียจะไหลในลักษณะแบบฟิล์มไหล (film flow) สุดท้ายน้ำจะไหลออกสู่ถังพักน้ำใส



ภาพที่ 5 องค์ประกอบของชุดทดลองบำบัดน้ำเสียและจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์

2. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 827 pH lab ยี่ห้อ Metrohm
4. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (conductivity meter) รุ่น 160 ยี่ห้อ ORION
5. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer) รุ่น U-2800 ยี่ห้อ HITACHI
6. เครื่องมือวิเคราะห์ที่ไอซี (TOC analyzer) รุ่น TOC-5000A ยี่ห้อ SHIMADZU
7. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) ยี่ห้อ Frozen
8. เตาอบที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (oven) ยี่ห้อ Fisher Scientific
9. เครื่องกวนผสม (flocculator) ยี่ห้อ STUART Scientific
10. เครื่องซั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น TR-254 ยี่ห้อ Denver Instrument
11. เครื่องซั่ง 2 ตำแหน่ง รุ่น MP 3000 ยี่ห้อ Chyo
12. เครื่องอังน้ำ (water bath) ยี่ห้อ Memmert
13. Stirring hotplate Framo-Gerätetechnik M21/1
14. เครื่องเติมอากาศ (air pump) รุ่น ACO-9903
15. เครื่องดูดสุญญากาศ (suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
16. โถทำแห้ง (desicator) พร้อมด้วยสารดูดความชื้น

17. เครื่องวัดความเข้มแสง (UV-light meter) Model UV-340 ของบริษัท อินเวอร์ทรอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด

### ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มี 2 ประเภท ได้แก่

1. น้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋องเจือจางให้ได้ 25% เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

2. น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำอัดลมของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ซึ่งน้ำเสียที่ใช้นี้เป็นน้ำเสียรวมซึ่งได้ผ่านการใช้จากกิจกรรมต่าง ๆ ก่อน ที่จะปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดของโรงงาน เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดังกล่าวและการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการดังกล่าวในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

### พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและการวิเคราะห์ลักษณะตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดลอง

ตัวอย่างน้ำที่เก็บมาแล้วจะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

1. พีเอช (pH)
2. ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)
3. สี (color) โดยสังเกตจากค่าการดูดกลืนแสง
4. บีโอดี (biological oxygen demand, BOD)
5. ซีโอดี (chemical oxygen demand, COD)
6. ทีโอดี (total organic carbon, TOC)

## 7. ของแข็งละลายน้ำ (total dissolved solids, TDS)

โดยใช้วิธีวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 8 และขั้นตอนการวิเคราะห์ตาม Standard Method

ตารางที่ 8 วิธีการเก็บรักษาและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการเก็บรักษา	วิธีการวิเคราะห์
พีเอช	วัดทันทีที่จุดเก็บ	เครื่องวัดพีเอช
ค่าการนำไฟฟ้า	วัดทันทีที่จุดเก็บ	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า
สี		เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
บีโอดี	แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C	เอชดีโมดิฟิเคชัน
ซีโอดี	เก็บในขวดแก้ว แช่เย็นไว้ก่อน เติม H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> จนตัวอย่างน้ำมีพีเอชน้อยกว่า 2	รีฟลักซ์แบบปิด
ทีโอดี		เครื่องวัดทีโอดี
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ	เก็บในขวดแก้วหรือขวดพลาสติก แช่เย็นที่ 4°C	การกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และทำให้แห้งที่ 105°C

### การเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO

สำหรับการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO 1 ด้าน ทำได้โดยนำสารแขวนลอย ZnO ซึ่งเตรียมได้จากการนำ ZnO ไปละลายในน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตรต่อกระจก 1 แผ่น หลังจากนั้นทำให้ตะกอนฟุ้งขึ้นด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เเทลงบนแผ่นกระจกที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

## วิธีการ

ในการศึกษานี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ พีเอชเริ่มต้น, ปริมาณของ ZnO เริ่มต้นและความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เริ่มต้น ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

1. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

การศึกษานี้ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ (batch) โดยนำน้ำสังเคราะห์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ทั้งที่ทำการปรับพีเอชเป็น 12 และไม่ปรับพีเอช ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 3 มา กวนผสมเป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่กำหนดจึงนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ, สีและทีโอซี โดยทำการทดลองทั้งในที่ที่ไม่มีแสงและที่มีแสง ช่วงเวลาตั้งแต่ 10.30 น. ถึง 14.30 น. ในวันที่แดดจัด สภาวะที่ทำการศึกษาได้แก่

1.1 การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว โดยกำหนดปริมาณของ ZnO ที่ใช้เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร

1.2 การใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว โดยกำหนดความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  ที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิโมลาร์

1.3 การใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  โดยกำหนดปริมาณของ ZnO ที่ใช้เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  ที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิโมลาร์

ในแต่ละชุดการทดลองจะมีชุดควบคุม (blank) ที่ไม่มีการเติม ZnO และ  $H_2O_2$  สภาวะต่าง ๆ และขั้นตอนของการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 9 และภาพที่ 6 ตามลำดับ

**ตารางที่ 9** สถานะต่าง ๆ ของการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

สถานะ	ปริมาณของ ZnO (กรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (มิลลิโมลาร์)	รูปแบบ
ZnO เพียงอย่างเดียว	1.5		แขวนลอย
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว		20	ของเหลว
ZnO ร่วมกับ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1.5	20	แขวนลอย/ของเหลว

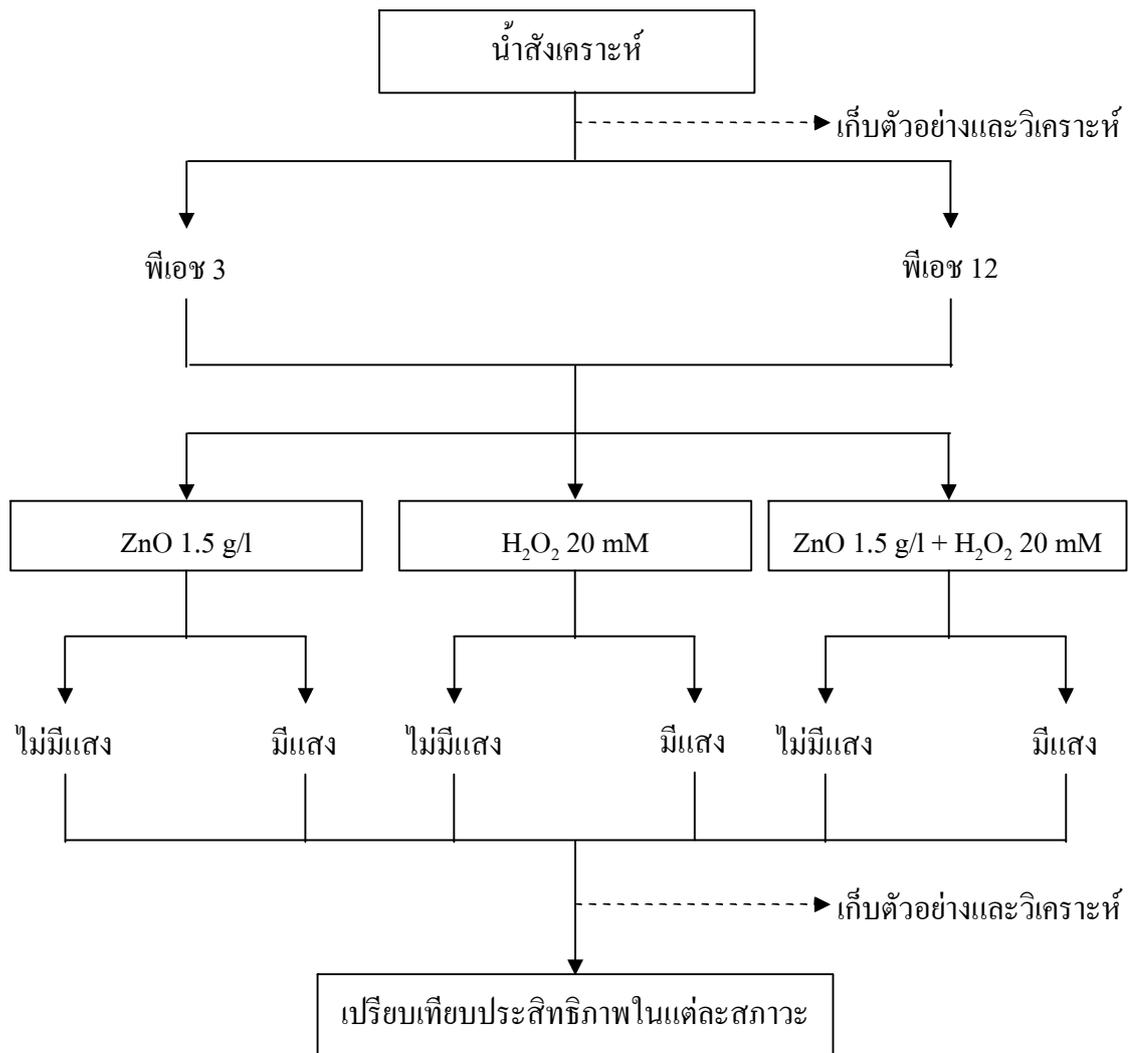
2. การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1 การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นนี้ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบเบดซ์ โดยใช้น้ำเสียจริงปริมาตร 500 มิลลิลิตรมาควนผสมเป็นระยะเวลา 30 นาที เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่กำหนด จึงนำน้ำเสียไปวิเคราะห์พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำและซีไอดี ซึ่งพีเอชเริ่มต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่ 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยกำหนดให้ปริมาณของ ZnO เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร ทำการทดลองทั้งในที่ที่ไม่มีแสงและที่ที่มีแสง ช่วงเวลาตั้งแต่ 10.30 น. ถึง 14.30 น. ในวันที่แดดจัด

2.2 การศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นนี้ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ 2.1 ซึ่งปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร ในขั้นตอนนี้จะนำผลการทดลองพีเอชเริ่มต้นที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาจาก 2.1 มาใช้



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

2.3 การศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นนี้ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ 2.1 และ 2.2 เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่กำหนดจึงนำน้ำเสียไปวิเคราะห์พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมด ละลายน้ำและทีโอซีซึ่งความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ ในขั้นตอนนี้จะนำผลการทดลองพีเอชเริ่มต้นและปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาจาก 2.1 และ 2.2 มาใช้ ตามลำดับ

ในแต่ละชุดการทดลองจะมีชุดควบคุมที่ไม่มีสารเติม ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ค่าตัวแปรที่ทำการทดลองและช่วงค่าแปรผันและขั้นตอนของการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 10 และภาพที่ 7 ตามลำดับ

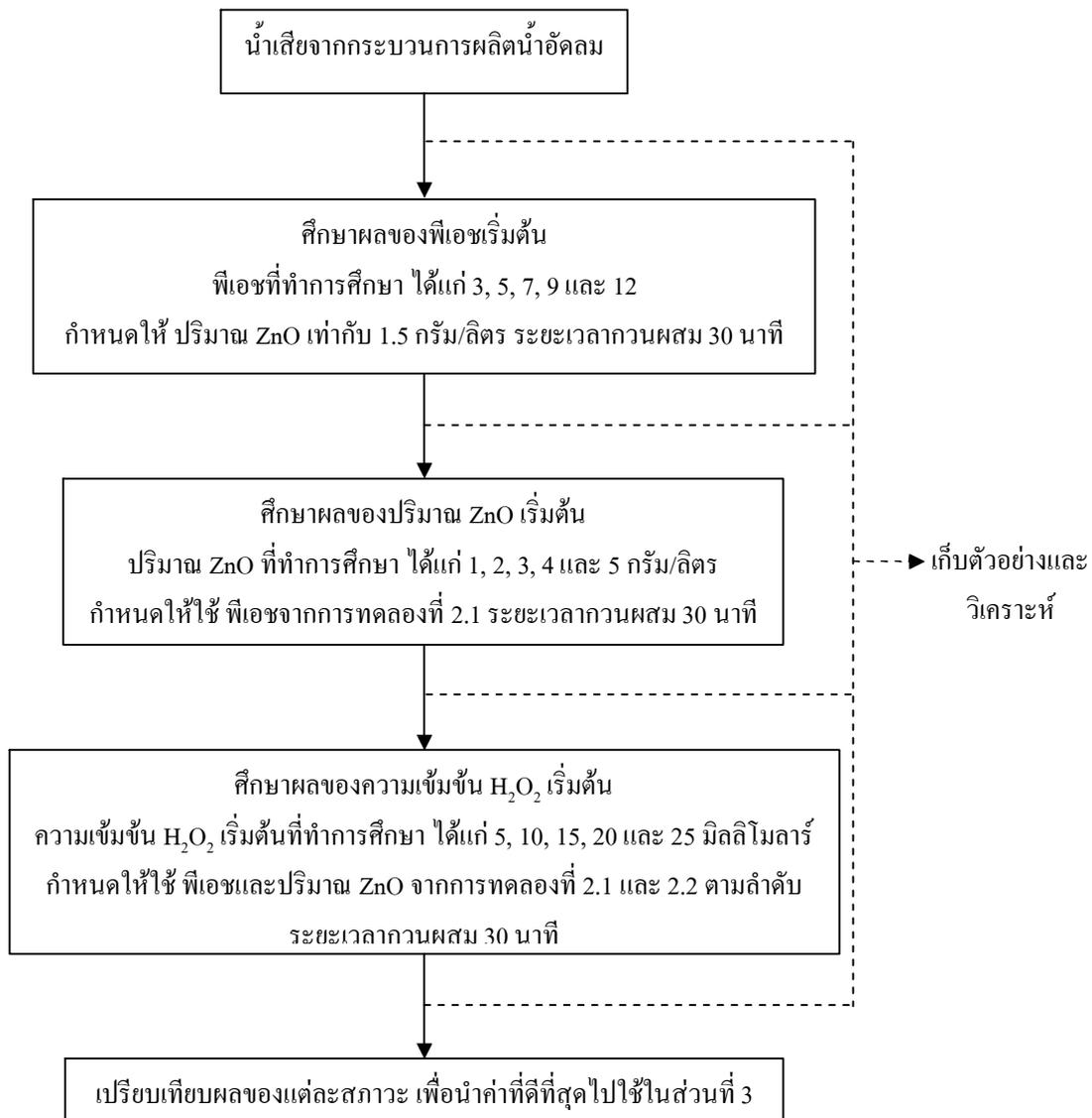
**ตารางที่ 10** ค่าตัวแปรที่ทำการทดลองและช่วงค่าแปรผันของการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	ค่าแปรผัน	ค่าคงที่	หน่วย
พีเอชเริ่มต้น	3, 5, 7, 9 และ 12	ZnO 1.5 กรัม/ลิตร	
ปริมาณ ZnO เริ่มต้น	1, 2, 3, 4 และ 5	พีเอชจากขั้นตอนที่ 2.1	กรัม/ลิตร
ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เริ่มต้น	5, 10, 15, 20 และ 25	พีเอชจากขั้นตอนที่ 2.1 ปริมาณ ZnO จากขั้นตอนที่ 2.2	มิลลิโมลาร์

3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เพียงอย่างเดียวในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษานี้ทำการทดลองในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง โดยปล่อยน้ำเสียให้ไหลผ่านรางที่มีแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา ZnO และแผ่นกระจกเปล่า ซึ่งเป็นชุดควบคุมด้วยอัตราการไหล (Q)  $3.33 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยนำพีเอชเริ่มต้นและปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ดีที่สุดจาก 2.1 และ 2.2 มาใช้ ตามลำดับ การทดลองแต่ละชุดนั้นจะทำการเปรียบเทียบกันในที่ที่ไม่มีแสงและที่มีแสง หลังจากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการแล้วไปวิเคราะห์พีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำและทีโอซี



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

การศึกษานี้ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับ 3.1 โดยนำพีเอชเริ่มต้น, ปริมาณ ZnO เริ่มต้นและความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นที่ดีที่สุดจาก 2.1, 2.2 และ 2.3 มาใช้ ตามลำดับ

ชุดการทดลองและขั้นตอนการศึกษาในส่วนนี้แสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 8 ตามลำดับ รวมทั้งได้สรุปพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในแต่ละการทดลอง ลักษณะการทดลองแต่ละรูปแบบ และกระบวนการที่เกิดขึ้นและขั้นตอนการทดลองทั้งหมดและดังตารางที่ 12 ตารางที่ 13 และภาพที่ 9 ตามลำดับ

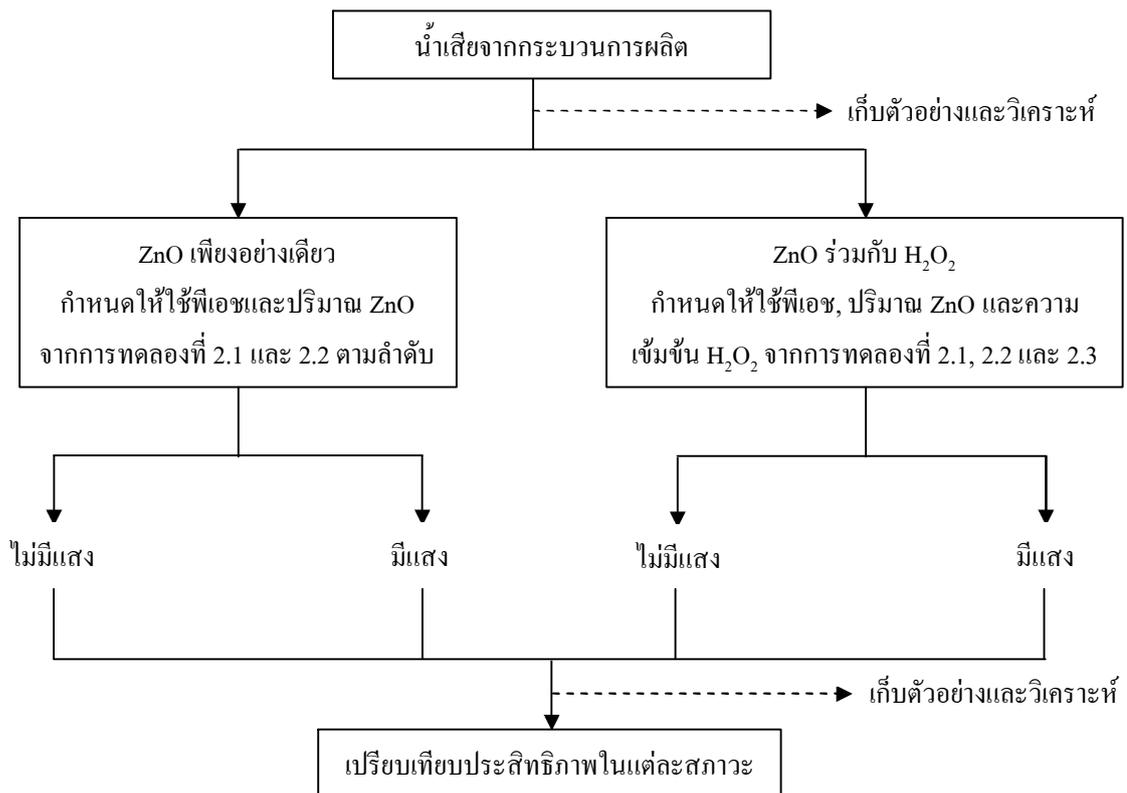
**ตารางที่ 11** ชุดการทดลองที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

ชุดการทดลอง	พีเอช	ปริมาณ ZnO	ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	สภาวะที่ทำการทดลอง	รูปแบบการทดลอง
ZnO	จาก 2.1	จาก 2.2	-	มีแสง	1. น้ำเสียที่ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกไม่เคลือบ ZnO 2. น้ำเสียที่ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกเคลือบ ZnO
				ไม่มีแสง	1. น้ำเสียที่ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกไม่เคลือบ ZnO 2. น้ำเสียที่ไม่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกเคลือบ ZnO
ZnO/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	จาก 2.1	จาก 2.2	จาก 2.3	มีแสง	1. น้ำเสียที่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกไม่เคลือบ ZnO 2. น้ำเสียที่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกเคลือบ ZnO
				ไม่มีแสง	1. น้ำเสียที่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกไม่เคลือบ ZnO 2. น้ำเสียที่เติม H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + แผ่นกระจกเคลือบ ZnO

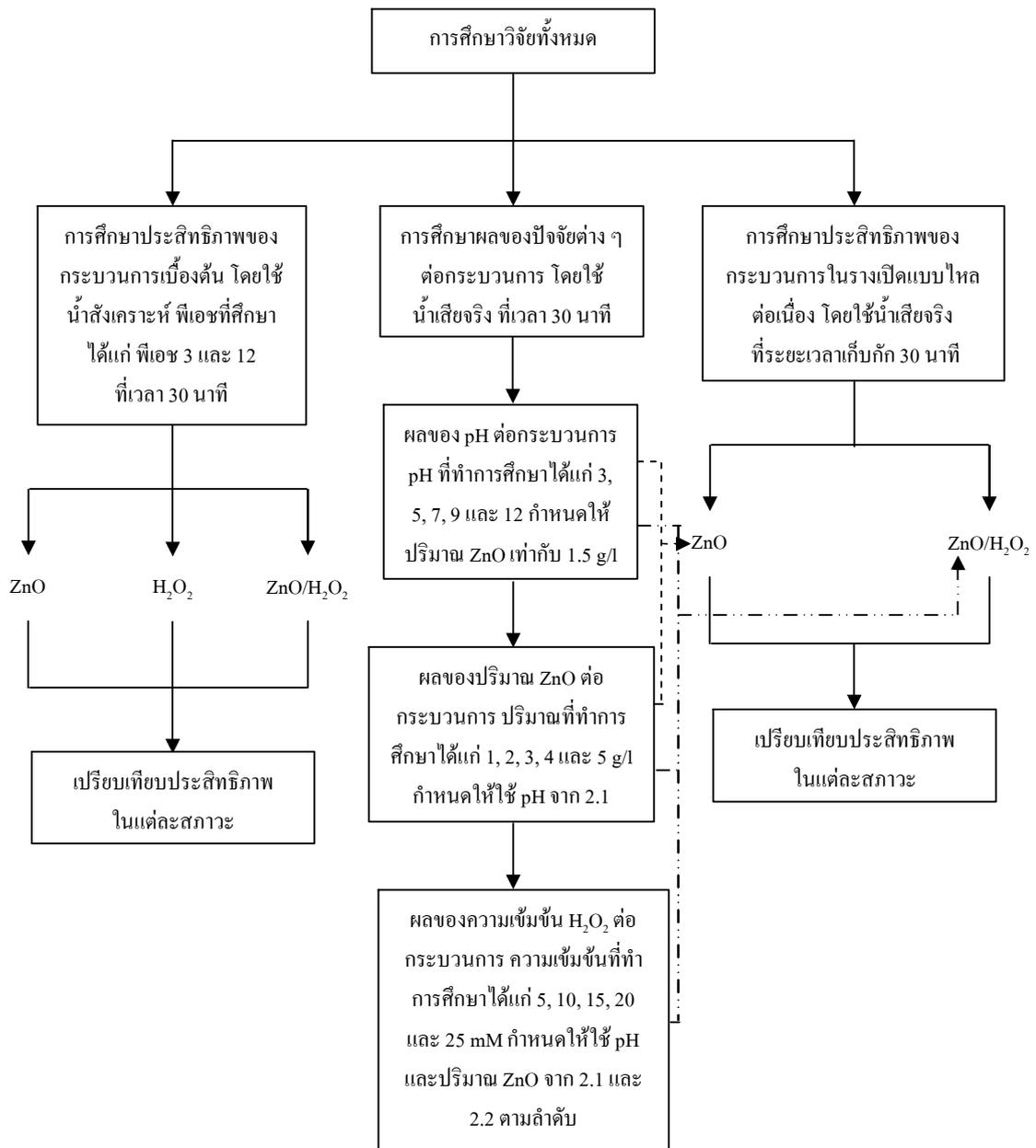
หมายเหตุ – คือ ไม่มีการเติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

**ตารางที่ 12** สรุปพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในแต่ละการทดลอง

พารามิเตอร์	การทดลอง ส่วนที่ 1	การทดลองส่วนที่ 2			การทดลอง ส่วนที่ 3
		พีเอช	ZnO	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
พีเอช	✓	✓	✓	✓	✓
ค่าการนำไฟฟ้า	✓	✓	✓	✓	✓
สี	✓				
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ	✓	✓	✓	✓	✓
ซีโอดี		✓	✓		
ทีโอซี	✓			✓	✓



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง



ภาพที่ 9 สรุปขั้นตอนการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ 13 ลักษณะการทดลองแต่ละรูปแบบและกระบวนการที่เกิดขึ้น

ลำดับที่	แสง UV		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		ZnO		กระบวนการที่เกิดขึ้น
	มี	ไม่มี	เติม	ไม่เติม	เคลือบ	ไม่เคลือบ	
1	✓			✓		✓	ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง
2	✓			✓	✓		กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดย ZnO เพียงอย่างเดียว
3	✓		✓			✓	กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว
4	✓		✓		✓		กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดย ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดย H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
5		✓		✓		✓	ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง
6		✓		✓	✓		การดูดซับผิวของ ZnO เพียงอย่างเดียว
7		✓	✓			✓	กระบวนการออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว
8		✓	✓		✓		การดูดซับผิวของ ZnO และกระบวนการออกซิเดชันของ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>

## การวิเคราะห์ข้อมูล

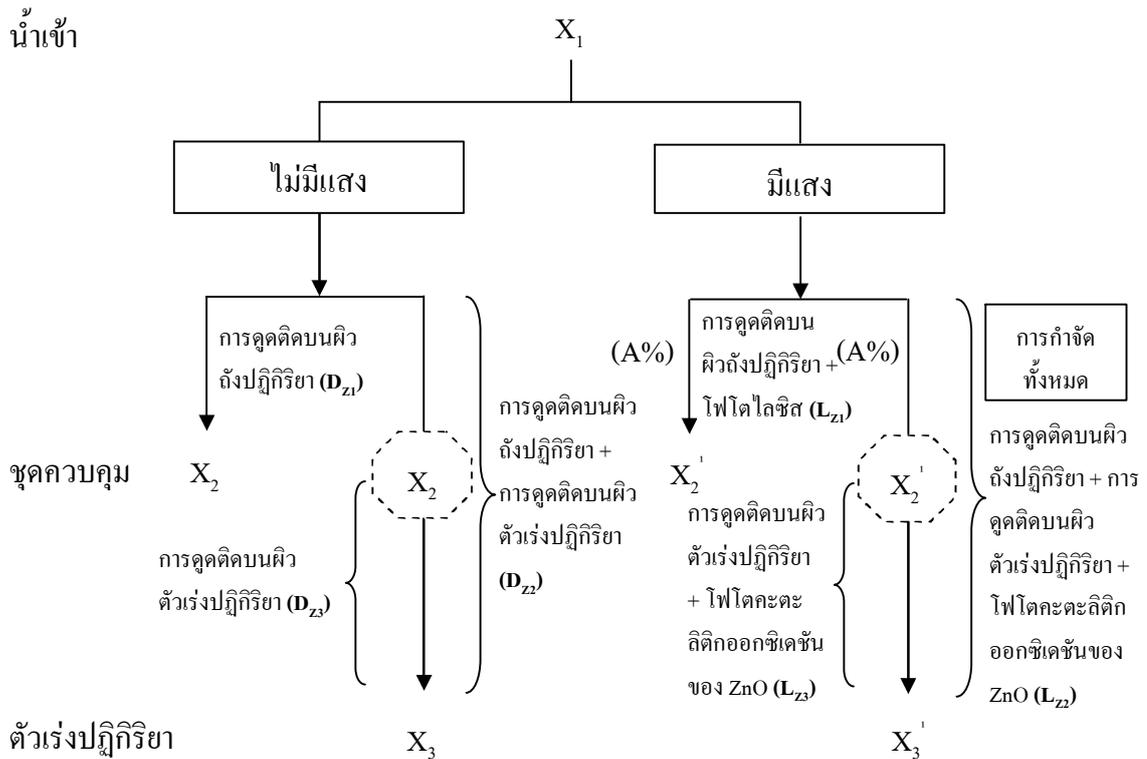
ในการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นของสี ซีโอดีและทีโอซีที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว นั้นต้องนำค่าที่ได้มาปรับค่าเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่แท้จริง โดยคิดจากร้อยละการระเหยของน้ำในแต่ละชุดควบคุม Alex *et al.* (2003) กล่าวว่า การระเหยของน้ำเนื่องจากอุณหภูมิ ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ซีโอดีและทีโอซีเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากประสิทธิภาพที่แท้จริง เพราะฉะนั้นต้องนำการระเหยของน้ำไปปรับเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริง โดยการคำนวณประสิทธิภาพที่แท้จริงในแต่ละขั้นตอนที่ใช้สำหรับการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 3 แสดงดังต่อไปนี้

1. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนและวิธีการคำนวณโดยการใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว การใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียวและการใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  แสดงดังภาพที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ

2. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนและวิธีการคำนวณโดยการใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวแสดงดังภาพที่ 10 เช่นเดียวกันกับการทดลองในส่วนที่ 1 แต่การใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  จะแตกต่างจากการทดลองแรก เนื่องจากในการทดลองแรกทำการเติม ZnO พร้อมกันกับ  $H_2O_2$  แต่การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการเติม  $H_2O_2$  ก่อนที่ไหลผ่านแผ่นกระจกที่เคลือบด้วย ZnO โดยประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนและวิธีการคำนวณแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกไซด์ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยที่  $X_1$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

$X_2$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่ไม่มีแสง

$X_3$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ของที่ไม่มีแสง

$D_{z1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสง

$$= \left( \frac{X_1 - X_2}{X_1} \right) \times 100\%$$

$D_{z2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสง

$$= \left( \frac{X_1 - X_3}{X_1} \right) \times 100\%$$

$D_{Z3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวในที่ที่ไม่มีแสง

$$= D_{Z2} - D_{Z1}$$

$X_{2L}$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A%

$X_{3L}$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ของที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A%

$X_2'$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่มีมีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A%

$$= X_{2L} \times (1 - A\%)$$

$X_3'$  = ความเข้มข้นของซีโอดี, ทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ของที่ที่มีมีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย A%

$$= X_{3L} \times (1 - A\%)$$

A% = ร้อยละการระเหย

$$= \left( \frac{TDS_{XL}}{TDS_{X0}} - 1 \right) \times 100\%$$

$TDS_{XL}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมในที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$TDS_{X0}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นในที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$L_{Z1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{X_1 - X_2'}{X_1} \right) \times 100\%$$

$L_{Z2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{X_1 - X_3'}{X_1} \right) \times 100\%$$

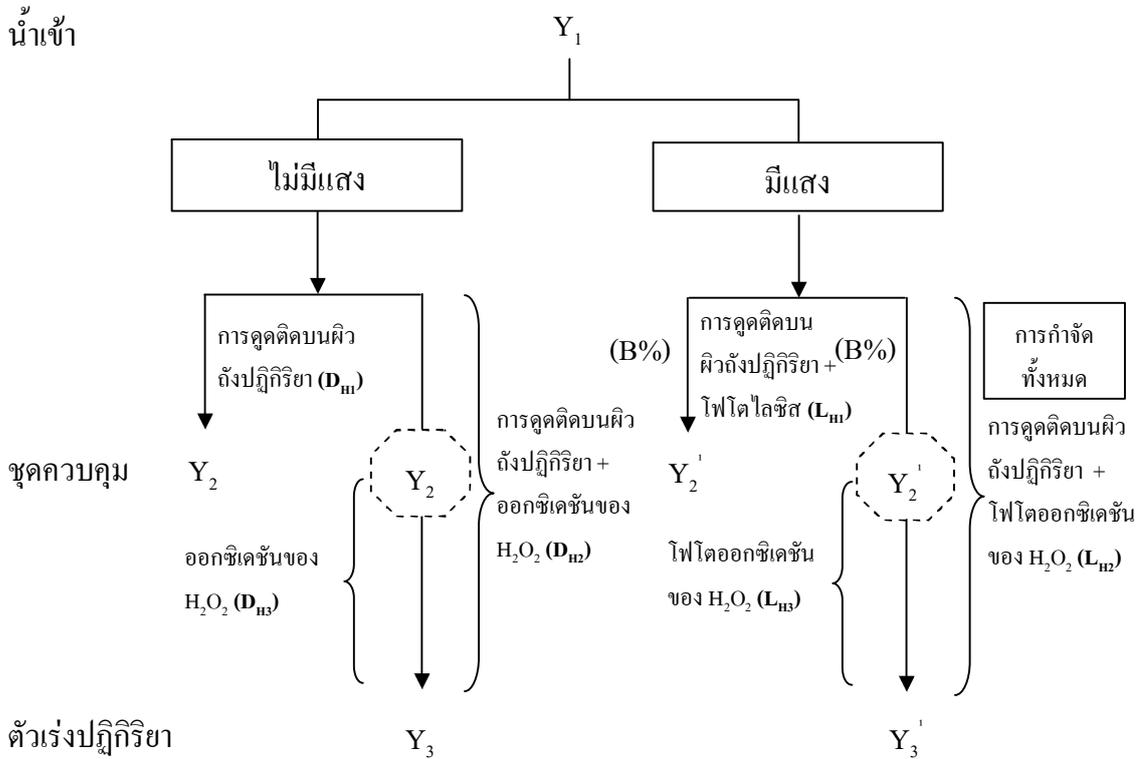
$L_{Z3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= L_{Z2} - L_{Z1}$$

$P_{ZnO}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO เพียง  
 อย่างเดียว

$$= L_{Z2} - D_{Z2}$$

$$= L_{Z2} - D_{Z3} \text{ ในกรณีที่ } D_{Z1} \approx 0$$



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารออกซิเดนต์

โดยที่ Y<sub>1</sub> = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

Y<sub>2</sub> = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่ไม่มีแสง

Y<sub>3</sub> = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ของที่ไม่มีแสง

D<sub>H1</sub> = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสง

$$= \left( \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \right) \times 100\%$$

$D_{H_2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชัน  
ของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง

$$= \left( \frac{Y_1 - Y_3}{Y_1} \right) \times 100\%$$

$D_{H_3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง  
=  $D_{H_2} - D_{H_1}$

$Y_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมที่ที่มีแสงที่ไม่  
ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B%

$Y_{3L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ของที่ที่มี  
แสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B%

$Y_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่ที่มีแสง  
หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B%

$$= Y_{2L} \times (1 - B\%)$$

$Y_3'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม  $H_2O_2$  ของที่ที่มี  
แสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย B%

$$= Y_{3L} \times (1 - B\%)$$

B% = ร้อยละการระเหย

$$= \left( \frac{TDS_{YL} - 1}{TDS_{Y0}} \right) \times 100\%$$

$TDS_{YL}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$TDS_{Y0}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$L_{H_1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส  
ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{Y_1 - Y_2'}{Y_1} \right) \times 100\%$$

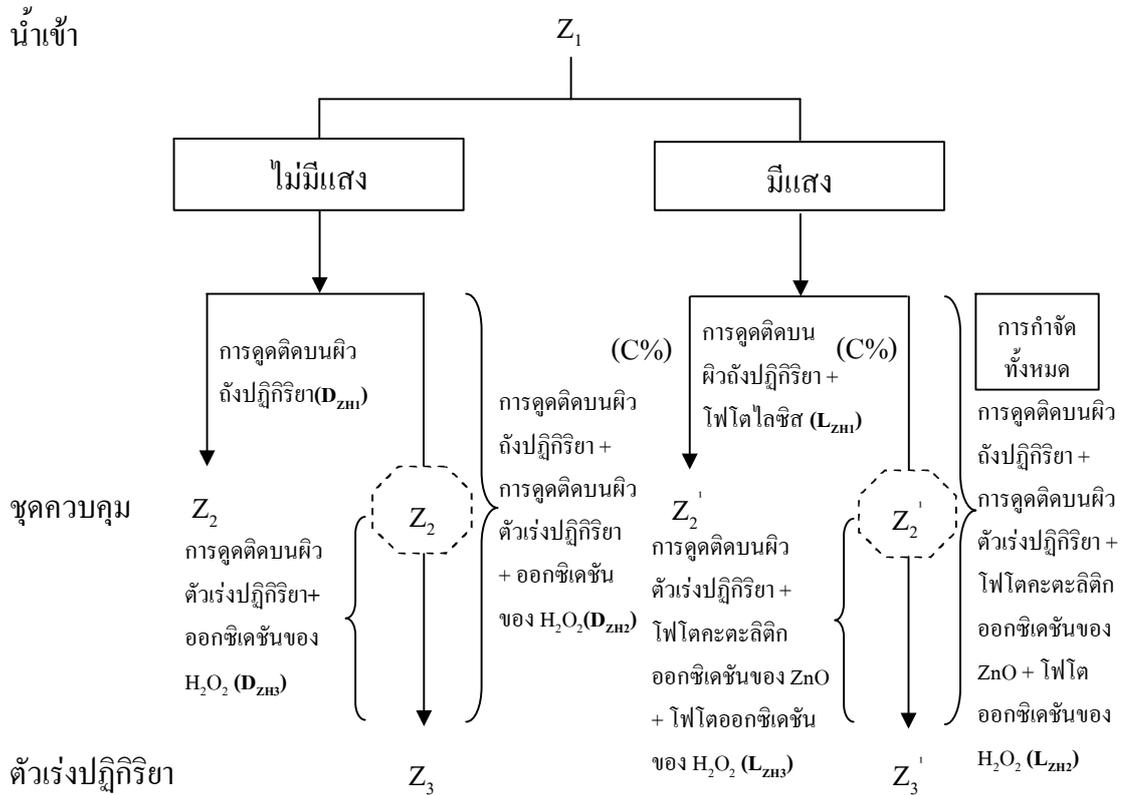
$L_{H_2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการ  
โฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{Y_1 - Y_3'}{Y_1} \right) \times 100\%$$

$L_{H_3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง  
(ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= L_{H_2} - L_{H_1}$$

$$\begin{aligned}
 P_{H_2O_2} &= \text{ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน} H_2O_2 \text{ เพียงอย่างเดียว} \\
 &= L_{H_2} - D_{H_2} \\
 &= L_{H_3} - D_{H_3}
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $ZnO$  ร่วมกับ  $H_2O_2$

โดยที่  $Z_1$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้น

$Z_2$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของทีที่ไม่มีแสง

$Z_3$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงมีการเติม  $ZnO$  และ  $H_2O_2$  ของทีที่ไม่มีแสง

$D_{ZH1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาในทีที่ไม่มีแสง

$$= \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \right) \times 100\%$$

$D_{ZH2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง

$$= \left( \frac{Z_1 - Z_3}{Z_1} \right) \times 100\%$$

$D_{ZH3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง

$$= D_{ZH2} - D_{ZH1}$$

$Z_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C%

$Z_{3L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO ของที่ที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C%

$Z_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงในชุดควบคุมของที่ที่มีแสงหลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C%

$$= Z_{2L} \times (1 - C\%)$$

$Z_3'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) และค่าการดูดกลืนแสงที่มีการเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย C%

$$= Z_{3L} \times (1 - C\%)$$

$C\%$  = ร้อยละการระเหย

$$= \left( \frac{TDS_{ZL}}{TDS_{Z0}} - 1 \right) \times 100\%$$

$TDS_{ZL}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$TDS_{Z0}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นที่ที่มีแสง (มก./ล.)

$L_{ZH1}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{Z_1 - Z_2'}{Z_1} \right) \times 100\%$$

$L_{ZH2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{Z_1 - Z_3'}{Z_1} \right) \times 100\%$$

$L_{ZH3}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= L_{ZH2} - L_{ZH1}$$

$P_{phot}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตไลซิสเพียงอย่างเดียว

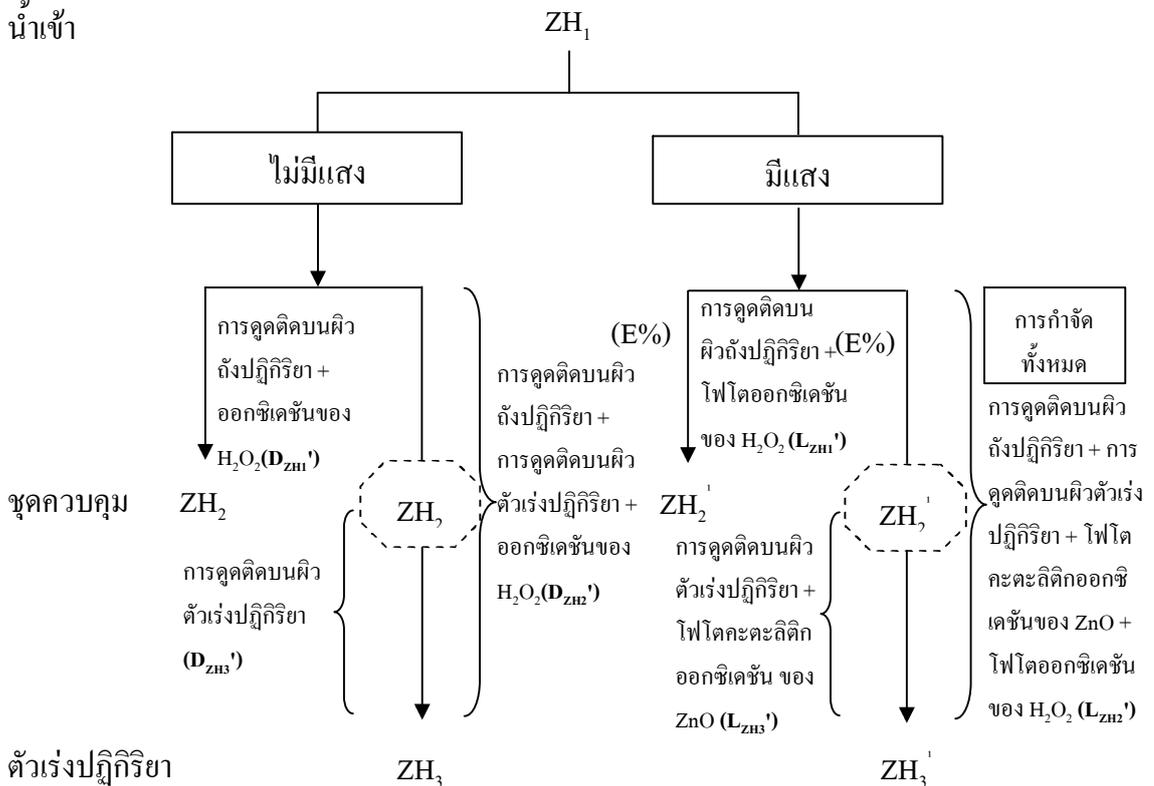
$$= L_{ZH1} - D_{ZH1}$$

$P_{ZnO+H2O2}$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$

$$= L_{ZH2} - D_{ZH2}$$

$$= L_{ZH3} - D_{ZH3}$$

น้ำเข้า



ภาพที่ 13 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในแบบจำลองร่างเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

- โดยที่  $ZH_1$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) เริ่มต้น
- $ZH_2$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมของที่ไม่มีแสง
- $ZH_3$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) มีการเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ของที่ไม่มีแสง
- $D_{ZH1}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดติดบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ไม่มีแสง
- $$= \left( \frac{ZH_1 - ZH_2}{ZH_1} \right) \times 100\%$$
- $D_{ZH2}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดติดบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดติดบนผิวดัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ไม่มีแสง
- $$= \left( \frac{ZH_1 - ZH_3}{ZH_1} \right) \times 100\%$$
- $D_{ZH3}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดติดบนผิวดัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียวในที่ไม่มีแสง
- $$= D_{ZH2}' - D_{ZH1}'$$
- $ZH_{2L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E%
- $ZH_{3L}$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ที่มีการเติม ZnO ของที่มีแสงที่ไม่ได้ปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E%
- $ZH_2'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ในชุดควบคุมของที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E%
- $$= ZH_{2L} \times (1 - C\%)$$
- $ZH_3'$  = ความเข้มข้นของทีโอซี (มก./ล.) ที่มีการเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ในที่มีแสง หลังจากทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย E%
- $$= ZH_{3L} \times (1 - C\%)$$
- $E\%$  = ร้อยละการระเหย
- $$= \left( \frac{TDS_{ZHL} - 1}{TDS_{ZH0}} \right) \times 100\%$$
- $TDS_{ZHL}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในชุดควบคุมที่มีแสง (มก./ล.)
- $TDS_{ZH0}$  = ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเริ่มต้นที่มีแสง (มก./ล.)

$L_{ZH1}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{ZH_1 - ZH_2'}{ZH_1} \right) \times 100\%$$

$L_{ZH2}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดทั้งหมดจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา, การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= \left( \frac{ZH_1 - ZH_3'}{ZH_1} \right) \times 100\%$$

$L_{ZH3}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่มีแสง (ทำการปรับค่าด้วยร้อยละการระเหย)

$$= L_{ZH2}' - L_{ZH1}'$$

$P_{H2O2}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว

$$= L_{ZH1}' - D_{ZH1}'$$

$P_{ZnO+H2O2}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$

$$= L_{ZH2}' - D_{ZH2}'$$

$P_{ZnO}'$  = ประสิทธิภาพการกำจัดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO เพียงอย่างเดียว

$$= L_{ZH3}' - D_{ZH3}'$$

## ผลและวิจารณ์

### 1. การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบื้องต้น

ในการศึกษานี้ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ โดยใช้ น้ำสังเคราะห์ ทั้งที่ทำการปรับพีเอชเป็น 12 และไม่ปรับพีเอชอยู่ที่ประมาณ 3 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งสถานะที่ทำการศึกษา ได้แก่ การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว การใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียวและการใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO เริ่มต้น 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 20 มิลลิโมลาร์

#### 1.1 ลักษณะของน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋องที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำสังเคราะห์ โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ พีเอช, การนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ, สีและทีโอซี มีค่าเฉลี่ยดังนี้ 3.18, 346.67 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร, 11813.33 มก./ล., 1.79 และ 39546.67 มก./ล. ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 14

#### ตารางที่ 14 ลักษณะของน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋อง

พารามิเตอร์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย ± SD (N)
พีเอช	3.29	3.10	3.18 ± 0.10 (3)
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	370.00	309.00	346.67 ± 32.93 (3)
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ (มก./ล.)	125376.00	111216.00	118213.33 ± 7081.45 (3)
สี	2.06	1.56	1.79 ± 0.25 (3)
ทีโอซี (มก./ล.)	41653.33	37120.00	39546.67 ± 2283.54 (3)

จากตารางที่ 14 พบว่า น้ำสังเคราะห์มีพีเอชต่ำหรือเป็นกรด เนื่องจากส่วนประกอบของน้ำอัดลมมีกรดฟอสฟอริกและกรดคาร์บอนิกเป็นองค์ประกอบสำคัญ ค่าการนำไฟฟ้าก็ต่ำเช่นกัน นอกจากนี้ ในน้ำอัดลมยังมีส่วนประกอบที่เป็นน้ำตาลและสีที่มาจากคาราเมล ซึ่งเป็นสีที่ได้

จากสารอินทรีย์ประเภทน้ำตาลเช่นเดียวกันละลายอยู่ในน้ำ จึงทำให้ในน้ำสังเคราะห์หิมของแข็งทั้งหมดละลายน้ำและสีสูงเช่นเดียวกับทีโอซี ซึ่งมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในน้ำตัวอย่างมีสารอินทรีย์อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น น้ำตาลและกรดอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นต้น

## 1.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอชก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 3 สภาวะ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 15

**ตารางที่ 15** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้นหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

ตัวอย่างน้ำ	การเปลี่ยนแปลงพีเอช		
	ZnO (I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=38°C)	$H_2O_2$ (I=3140 $\mu W/cm^2$ , T=41°C)	ZnO + $H_2O_2$ (I=3020 $\mu W/cm^2$ , T=39°C)
น้ำเข้า	3.29	3.10	3.14
ชุดควบคุมในที่ไม่มีแสง	3.08	3.12	3.16
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	7.01	3.01	6.51
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	10.83	10.49	10.45
ชุดควบคุมในที่มีแสง	2.94	2.87	3.08
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	6.38	2.87	6.45
มีแสง / ปรับพีเอช	10.77	9.43	10.54

**หมายเหตุ** ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO และ  $H_2O_2$

จากผลการทดลองดังตารางที่ 15 พบว่า ในที่ที่ไม่มีแสง เมื่อไม่ทำการปรับพีเอช เมื่อใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอช แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและเมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  โดยพีเอชสูงขึ้นจาก 3.29 และ 3.14 เป็น 7.01 และ 6.51 ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับในที่มีแสง เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีการเปลี่ยนแปลงพีเอช โดยพีเอชสูงขึ้นเป็น 6.38 และ 6.45 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ZnO มีความ

เป็นค่า (Mrowetz and Selli, 2006) จึงทำให้น้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO มีพีเอชสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วน  $H_2O_2$  มีความเป็นกรด จึงไม่ทำให้พีเอชเปลี่ยนแปลงมากนัก สำหรับในที่ที่มีแสง เมื่อทำการปรับพีเอชเป็น 12 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอชในทุกสภาวะ โดยพีเอชจะลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมานั้นจะเป็นกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในเตรท ซัลเฟต คลอไรด์ (Ray and Beenackers, 1998) น้ำ รวมทั้ง  $CO_2$  (Zhao and Yang, 2003; Malato *et al.*, 2002) ซึ่งถ้าอยู่ในน้ำเสีย จะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) จึงทำให้พีเอชลดลงเล็กน้อย จากการทดลองนี้ สามารถบอกได้ว่าที่พีเอช 12 หรือในสภาวะต่างสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าที่พีเอช 3 หรือสภาวะกรด

### 1.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งละลายน้ำก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 3 สภาวะ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 16

ในการทดลองนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสงและไม่มีแสง เนื่องจากเรานำค่าของแข็งละลายน้ำของชุดควบคุมที่สูงกว่าของแข็งละลายน้ำของน้ำเข้ามาคำนวณร้อยละการระเหยของน้ำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซีที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) เนื่องจากการระเหยของน้ำส่งผลให้สีและทีโอซีมีความเข้มข้นมากกว่าปกติ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนกว่าค่าการนำไฟฟ้า จากผลการทดลองดังตารางที่ 16 พบว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงน้อยกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสง จึงทำให้ร้อยละการระเหยของน้ำน้อยลงเช่นกัน เนื่องจากไม่มีแสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยา โดยร้อยละการระเหยของน้ำในชุดควบคุมที่ไม่มีแสงเท่ากับ 2.91%, 0% และ 0.82% เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว,  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว และ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ตามลำดับและในที่ที่มีแสงมีร้อยละการระเหยเท่ากับ 5.29%, 0% และ 6.32% เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว,  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว และ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ตามลำดับ

**ตารางที่ 16** ร้อยละการระเหยของน้ำ โดยพิจารณาจากของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

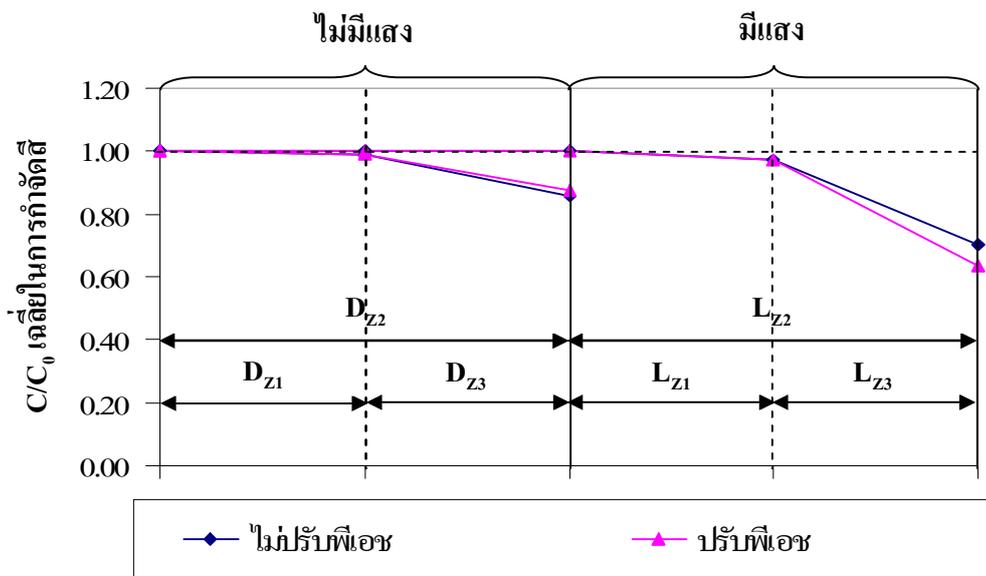
ตัวอย่างน้ำ	ความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำและร้อยละการระเหยของน้ำ					
	ZnO		$H_2O_2$		ZnO+ $H_2O_2$	
	(I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=38°C)		(I=3140 $\mu W/cm^2$ , T=41°C)		(I=3020 $\mu W/cm^2$ , T=39°C)	
	มก./ล.	%	มก./ล.	%	มก./ล.	%
น้ำเข้า	118048.00	0.00	125376.00	0.00	111216.00	0.00
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	121488.00	2.91	121328.00	0.00	112128.00	0.82
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	116608.00	0.00	120747.00	0.00	112389.00	1.16
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	119264.00	1.71	112277.00	0.00	112256.00	1.00
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	124288.00	5.29	121184.00	0.00	118240.00	6.32
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	120240.00	1.86	120613.33	0.00	116606.00	4.85
มีแสง / ปรับพีเอช	120091.00	2.49	123450.67	0.00	120704.00	8.53

**หมายเหตุ** ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO และ  $H_2O_2$

#### 1.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์

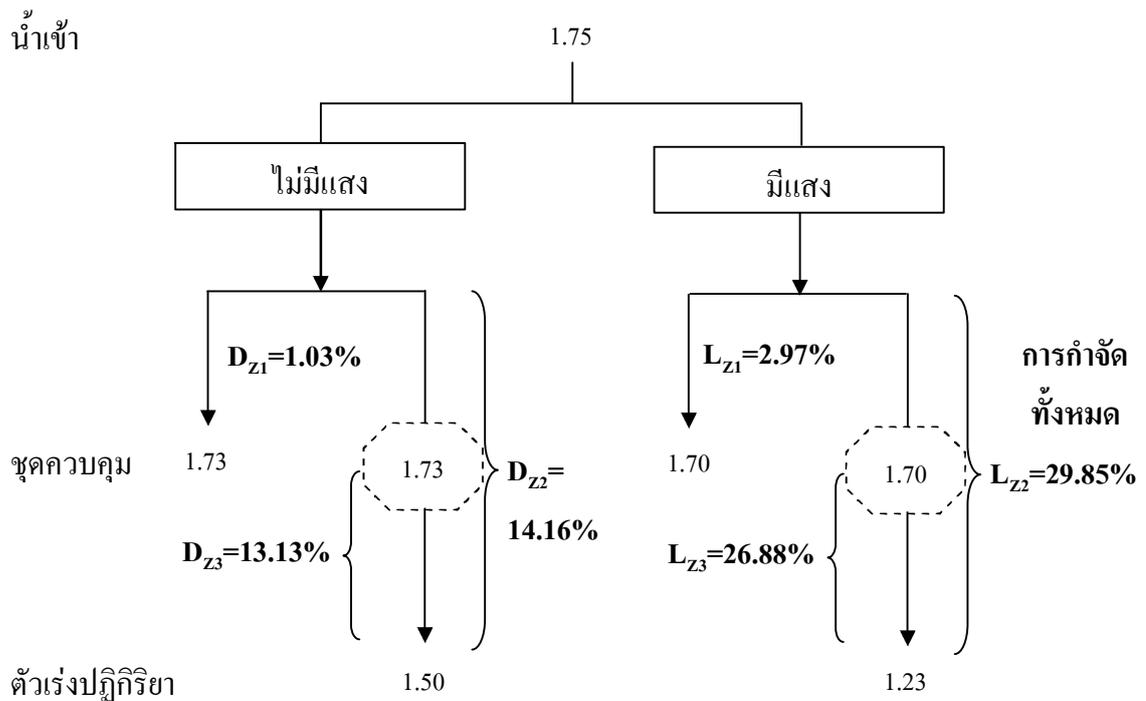
##### 1.4.1 การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์สีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร สามารถสรุปออกมาได้ดังภาพที่ 14, 15 และ 16 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เมื่อไม่ปรับพีเอช ในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.86 และ 0.70 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 14.16% และ 29.85% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสี เมื่อทำการปรับพีเอช ในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.88 และ 0.66 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 12.44% และ 36.47% ตามลำดับ



ภาพที่ 14 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

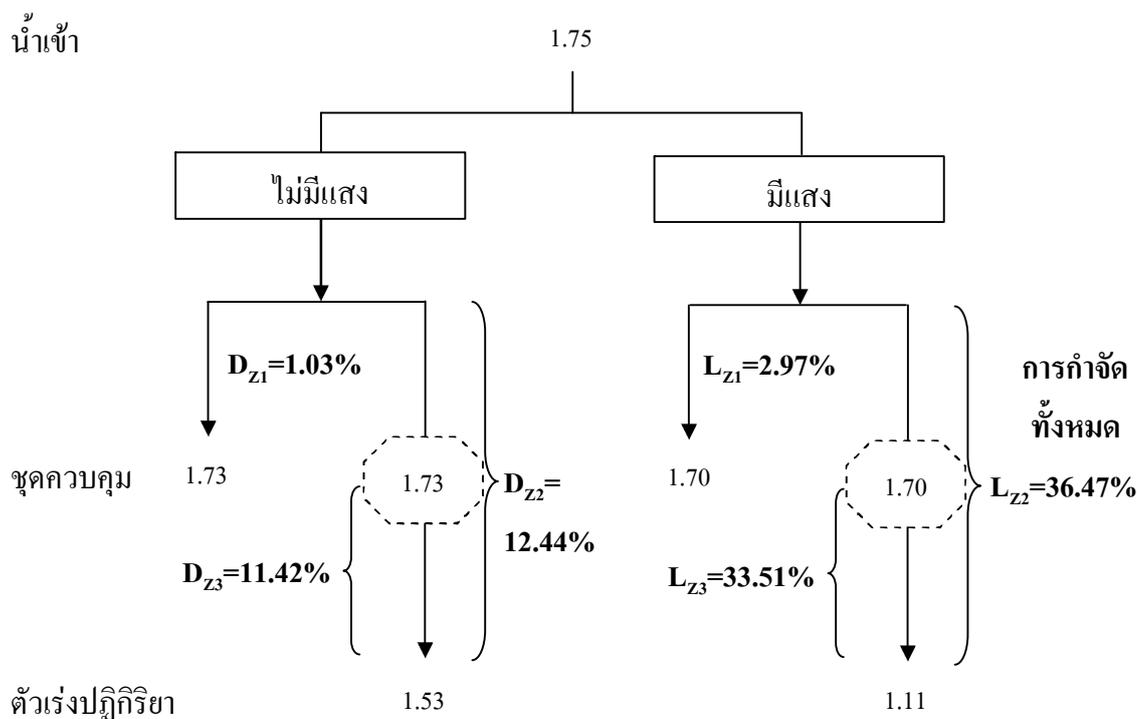
ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 15 และ 16 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นในชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติม ZnO ในที่ที่ไม่มีแสงมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา ( $D_{z1}$ ) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่าเกิดการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาน้อยมาก ส่วนในที่ที่มีแสง ประสิทธิภาพมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส ( $L_{z1}$ ) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่าประสิทธิภาพสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากมีกระบวนการโฟโตไลซิสเกิดขึ้น และเมื่อเติม ZnO ลงไป สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและไม่ปรับพีเอช ( $D_{z2}$ ) เท่ากับ 14.16% (13.18-14.73%) และ 12.44% (11.07-14.10%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $D_{z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ( $D_{z3}$ ) ที่ไม่ปรับและไม่ปรับพีเอชเท่ากับ 13.13% (12.16-13.70%) และ 11.42% (10.05-13.07%) ตามลำดับ สำหรับในที่ที่มีแสงนั้น เมื่อเติม ZnO ลงไป กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและ



ภาพที่ 15 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ซึ่งก็คือประสิทธิภาพการกำจัดรวมของกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้น ( $L_{z2}$ ) ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 29.85% (26.71-31.15%) และ 36.47% (36.30-36.70%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $L_{z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ( $L_{z3}$ ) ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 26.88% (23.74-28.54%) และ 33.51% (33.33-37.33%) ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) ประสิทธิภาพของ  $L_{z2}$  และ  $D_{z2}$  ที่ได้ เมื่อนำมาลบกันจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 15.70% และ 24.03% ที่ไม่ทำการ



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการปรับพีเอชที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

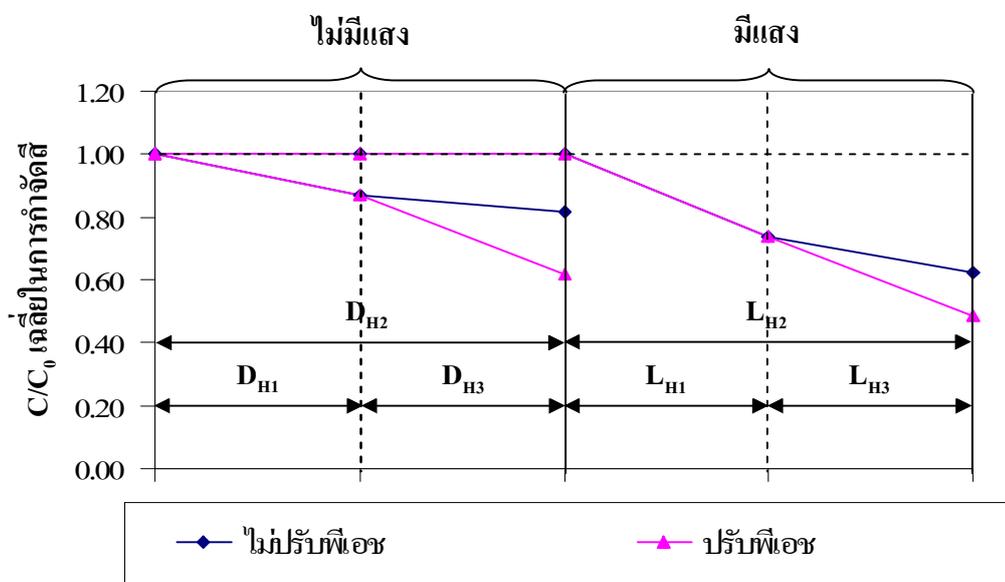
หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

ปรับและทำการปรับพีเอช ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าการดูดซับ

#### 1.4.2 การใช้ $H_2O_2$ เพียงอย่างเดียว

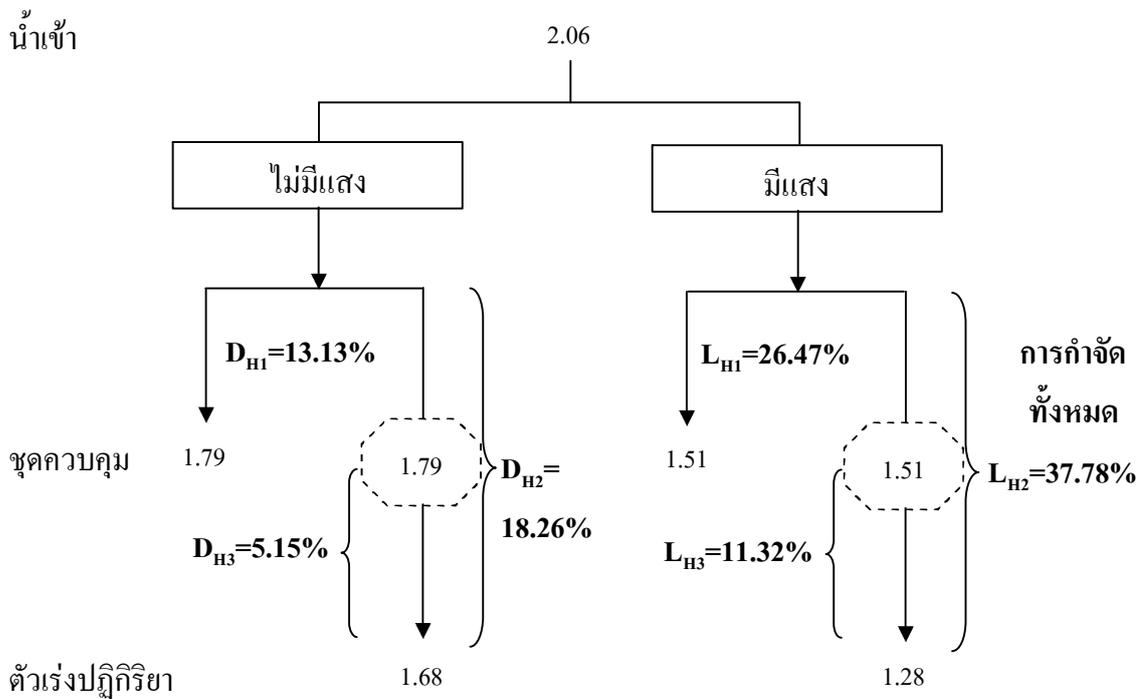
ผลการวิเคราะห์สีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียวเป็นสารออกซิแดนซ์ที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังภาพที่ 17, 18 และ 19 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมื่อไม่ปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.82 และ 0.62 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 18.26% และ 37.78%

ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมื่อทำการปรับพีเอช ในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.62 และ 0.48 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 38.03% และ 51.50% ตามลำดับ



ภาพที่ 17 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

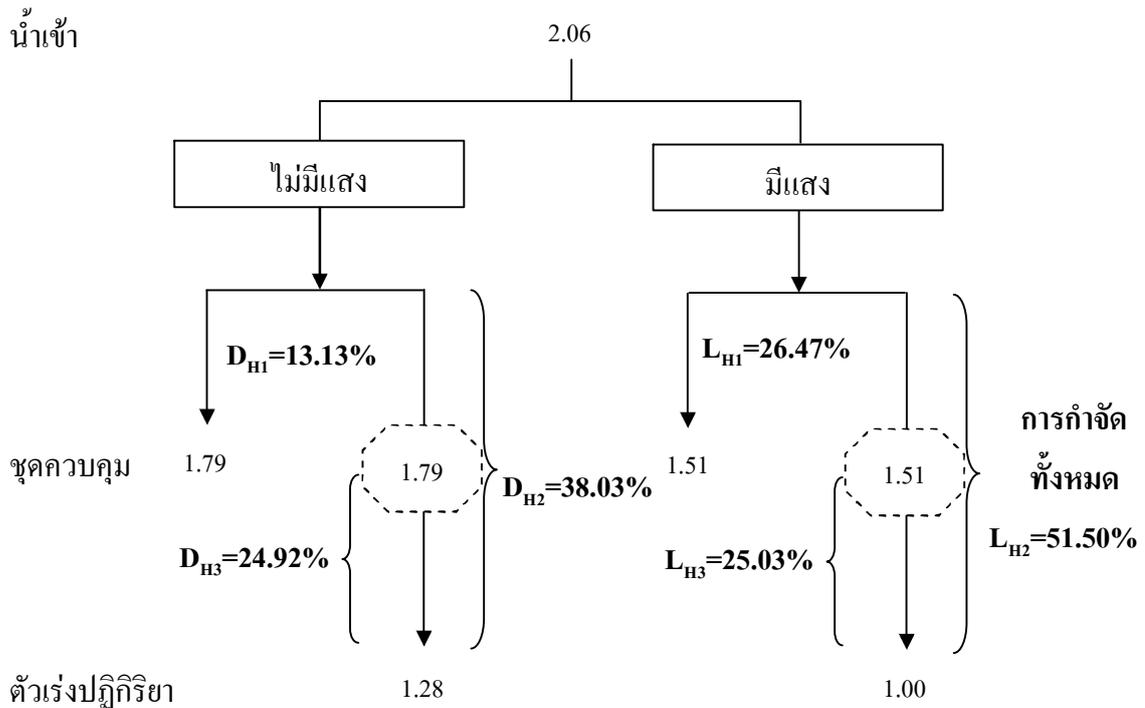
ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 18 และ 19 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นในชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติม  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสงมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา ( $D_{H1}$ ) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่าการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาเท่ากับ 13.13% ส่วนในที่ที่มีแสง ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส ( $L_{H1}$ ) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง อาจเนื่องมาจากมีกระบวนการโฟโตไลซิสเกิดขึ้นเท่ากับ 26.47% และเมื่อเติม  $H_2O_2$  ลงไป สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช ( $D_{H2}$ ) เท่ากับ 18.26% (15.54-22.34%) และ 38.03% ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $D_{H1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจากกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว ( $D_{H3}$ ) ที่ไม่ปรับพีเอชเท่ากับ 5.15% (2.43-9.23%) ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา และเมื่อปรับพีเอชมี



**ภาพที่ 18** ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็นสารออกซิแดนต์ ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$

ประสิทธิภาพเท่ากับ 24.92% จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับพีเอช กระบวนการออกซิเดชันของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เกิดได้ดีกว่าเมื่อไม่ปรับพีเอช สำหรับในที่มีแสงนั้น เมื่อเติม  $\text{H}_2\text{O}_2$  ลงไป กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ซึ่งก็คือ ประสิทธิภาพการกำจัดรวมของกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้น ( $L_{\text{H}_2}$ ) ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 37.78% (37.40-38.32%) และ 51.50% ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $L_{\text{H}_1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $L_{\text{H}_3}$ ) ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 11.32% (10.93-11.85%) และ 25.03% ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) ซึ่งในการทดลองนี้ไม่มีร้อยละการ



**ภาพที่ 19** ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนท์ ทำการปรับพีเอชที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

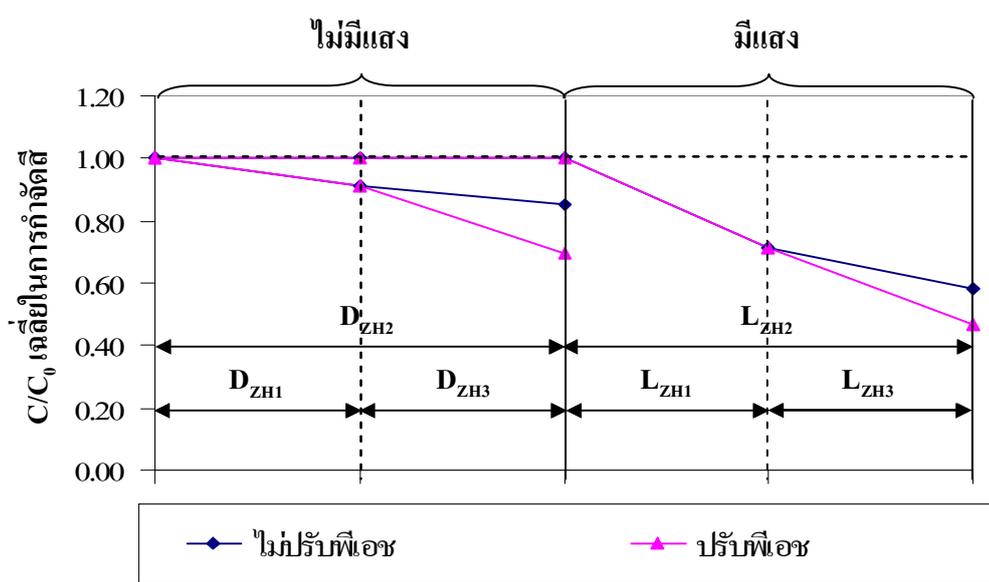
หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม  $H_2O_2$

ระเหยของน้ำ ประสิทธิภาพของ  $L_{H2}$  และ  $D_{H2}$  ที่ได้ เมื่อนำมาลบกันจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 19.52% และ 13.37% ที่ไม่ทำการปรับและทำการปรับพีเอช ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เกิดขึ้นได้ดีกว่าการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง

#### 1.4.3 การใช้ ZnO ร่วมกับ $H_2O_2$

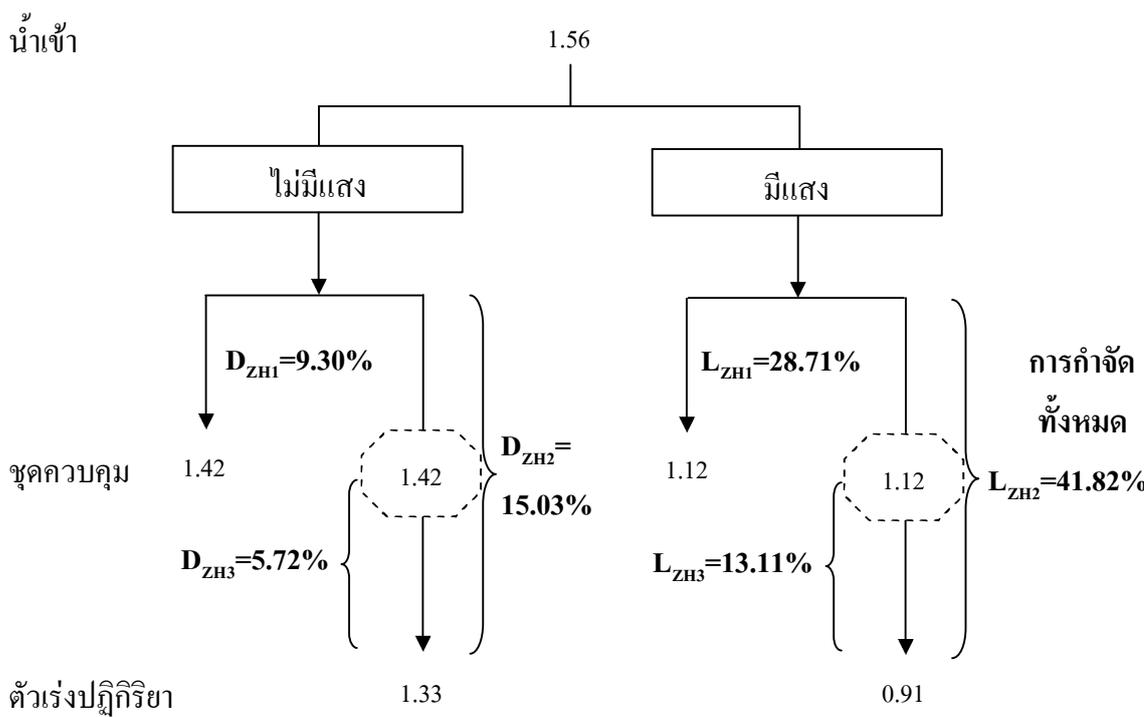
ผลการวิเคราะห์สีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ทั้งที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมา

ได้ดังภาพที่ 20, 21 และ 22 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เมื่อไม่ปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสง และในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.85 และ 0.58 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือเท่ากับ 15.03% และ 41.82% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดสีเมื่อทำการปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.70 และ 0.47 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 30.31% และ 52.94% ตามลำดับ



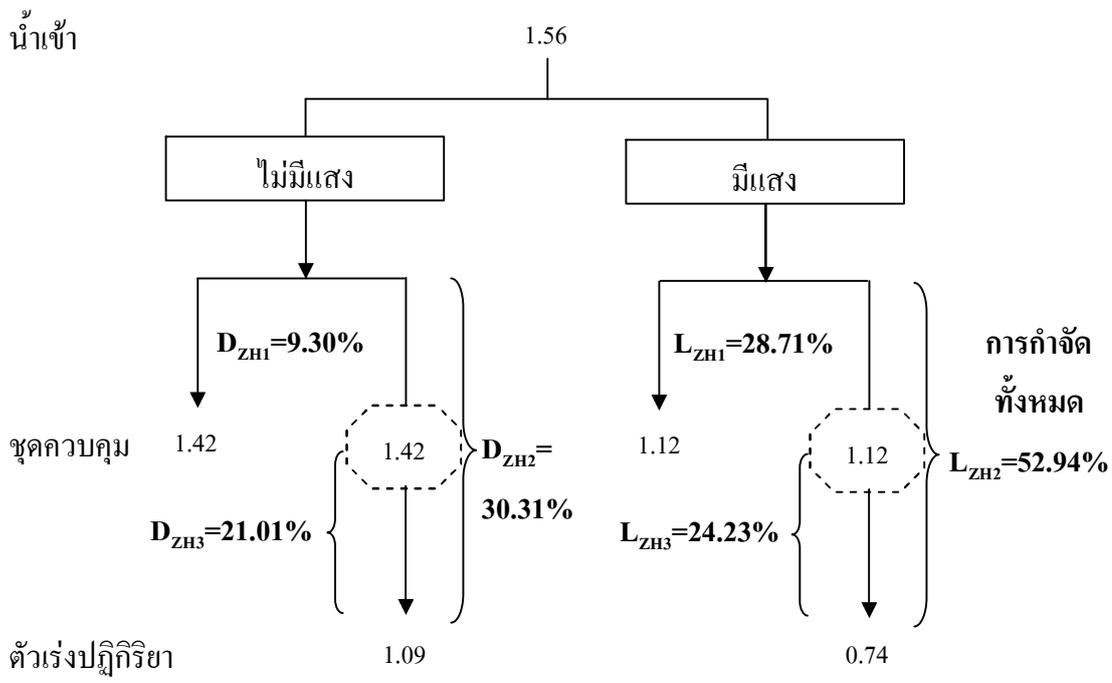
ภาพที่ 20 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 21 และ 22 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นในชุดควบคุม ซึ่งไม่มีการเติม ZnO และ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่ไม่มีแสงมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา (D<sub>ZH1</sub>) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่าการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาเท่ากับ 9.30% ส่วนในที่ที่มีแสงประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส (L<sub>ZH1</sub>) เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง อาจเนื่องมาจากมี



ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

กระบวนการโฟโตไลซิสเกิดขึ้นเท่ากับ 28.71% และเมื่อเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ลงไป สำหรับในกรณีที่ไม่มีแสง กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา และกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช ( $D_{ZH2}$ ) เท่ากับ 15.03% (14.83-15.09%) และ 30.31% (28.01-31.71%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $D_{ZH1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ( $D_{ZH3}$ ) ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 5.72% (5.53-5.79%) และ 21.01% (18.70-22.41%) ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของการกำจัดสีจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O$  เมื่อไม่ปรับพีเอชน้อยกว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดสีจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาอย่างเดียว และเมื่อทำการปรับพีเอช ประสิทธิภาพการกำจัดสีจากการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  มากกว่าประสิทธิภาพจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาสำหรับในที่มีแสงนั้น เมื่อเติม ZnO และ



ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ลงไป กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวดัเร่งปฏิกิริยา กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ซึ่งก็คือ ประสิทธิภาพการกำจัดรวมของกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้น (L<sub>ZH2</sub>) ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 41.82% (39.96-43.67%) และ 52.94% (50.96-56.14%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับ ประสิทธิภาพจาก L<sub>ZH1</sub> ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวดัเร่งปฏิกิริยา กระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO (L<sub>ZH3</sub>) ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 13.11% (11.25-14.69%) และ 24.23% (22.25-27.43%) ตามลำดับ ซึ่งมี ประสิทธิภาพน้อยกว่าประสิทธิภาพการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส โดย ประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex et al., 2003) ซึ่งในการทดลองนี้มีร้อยละการระเหยของน้ำเท่ากับ 6.32% ประสิทธิภาพของ L<sub>ZH2</sub> และ D<sub>ZH2</sub> ที่ได้ เมื่อนำมาลบกันจะได้ ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการ

โฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เท่ากับ 26.79% และ 22.63% ที่ไม่ทำการปรับและทำการปรับพีเอช ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเกิดได้ดีกว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 3 สภาวะเมื่อปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 17 และภาพที่ 23 และ 24 และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 18 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ทั้งที่ไม่ปรับพีเอชและทำการปรับพีเอช ในสภาวะนี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ  $3.01 \times 10^{-4}$  ต่อวินาทีและ  $4.18 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับและเมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำที่สุดทั้งที่ไม่ปรับพีเอชและทำการปรับพีเอช ซึ่งในสภาวะนี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ปรับและปรับพีเอชน้อยกว่าการใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  เท่ากับ  $1.97 \times 10^{-4}$  ต่อวินาทีและ  $2.52 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับ

**ตารางที่ 17** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำ

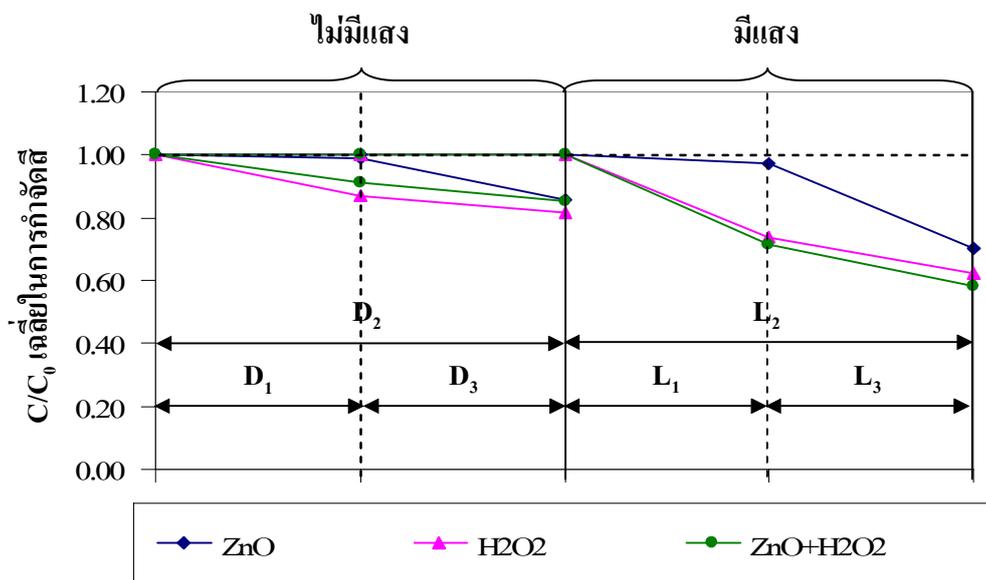
สังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

ตัวอย่างน้ำ	ประสิทธิภาพในการกำจัดสี					
	ZnO		$H_2O_2$		ZnO+ $H_2O_2$	
	(I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=38°C)		(I=3140 $\mu W/cm^2$ , T=41°C)		(I=3020 $\mu W/cm^2$ , T=39°C)	
	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>
น้ำเข้า	1.75	1.00	2.06	1.00	1.56	1.00
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	1.73	0.99	1.79	0.87	1.42	0.91
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	1.50	0.86	1.71	0.83	1.33	0.85
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	1.53	0.88	1.28	0.62	1.09	0.70
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	1.70	0.97	1.51	0.74	1.12	0.71
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	1.23	0.70	1.27	0.62	0.91	0.58
มีแสง / ปรับพีเอช	1.11	0.64	1.00	0.48	0.74	0.47

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO และ  $H_2O_2$

**ตารางที่ 18** ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

ตัวอย่างน้ำ	$k_{ZnO}$ (I=2980 $\mu W/cm^2, T=38^\circ C$ )	$k_{H_2O_2}$ (I=3140 $\mu W/cm^2, T=41^\circ C$ )	$k_{ZnO+H_2O_2}$ (I=3020 $\mu W/cm^2, T=39^\circ C$ )
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	$8.51 \times 10^{-5}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$9.03 \times 10^{-5}$
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	$7.36 \times 10^{-5}$	$2.64 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-4}$
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	$1.97 \times 10^{-4}$	$2.66 \times 10^{-4}$	$3.01 \times 10^{-4}$
มีแสง / ปรับพีเอช	$2.52 \times 10^{-4}$	$4.02 \times 10^{-4}$	$4.18 \times 10^{-4}$

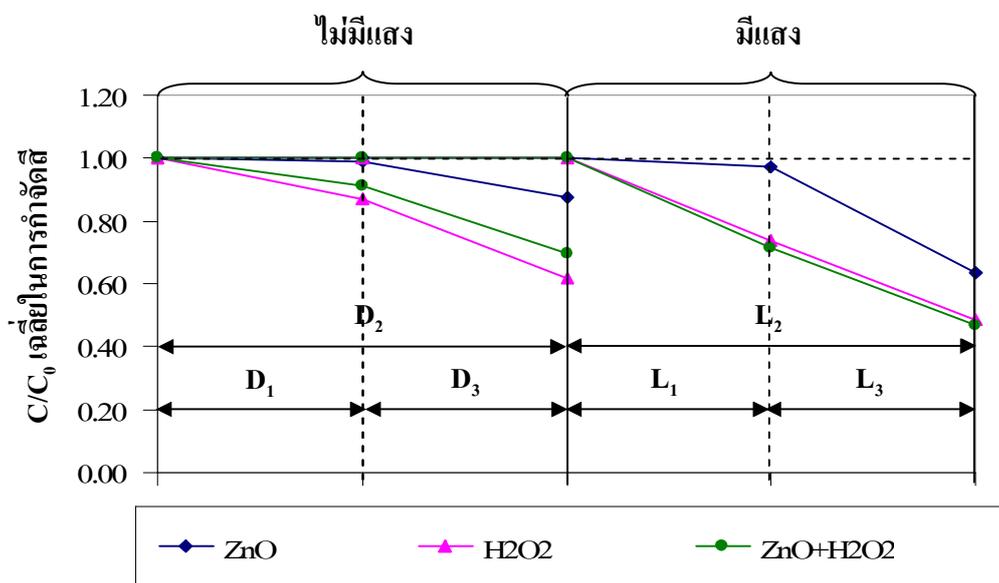


**ภาพที่ 23** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ หลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

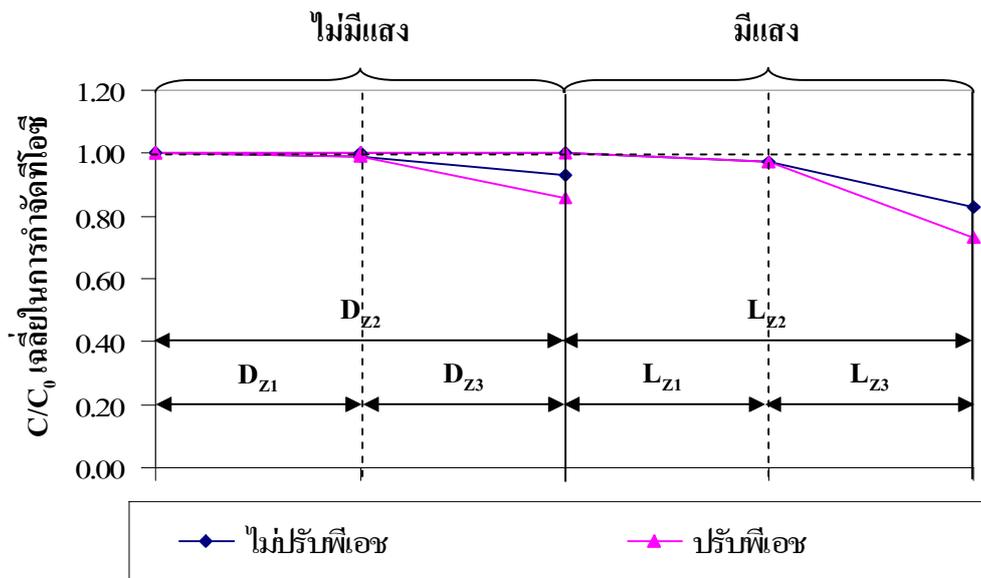
## 1.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์

### 1.5.1 การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์ที่ไอซีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวทั้งที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร สามารถสรุปออกมาได้ดังภาพที่ 25, 26 และ 27 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี เมื่อไม่ปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.93 และ 0.83 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 7.41% และ 17.62% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี เมื่อทำการปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.86 และ 0.73 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 13.89% และ 26.57% ตามลำดับ

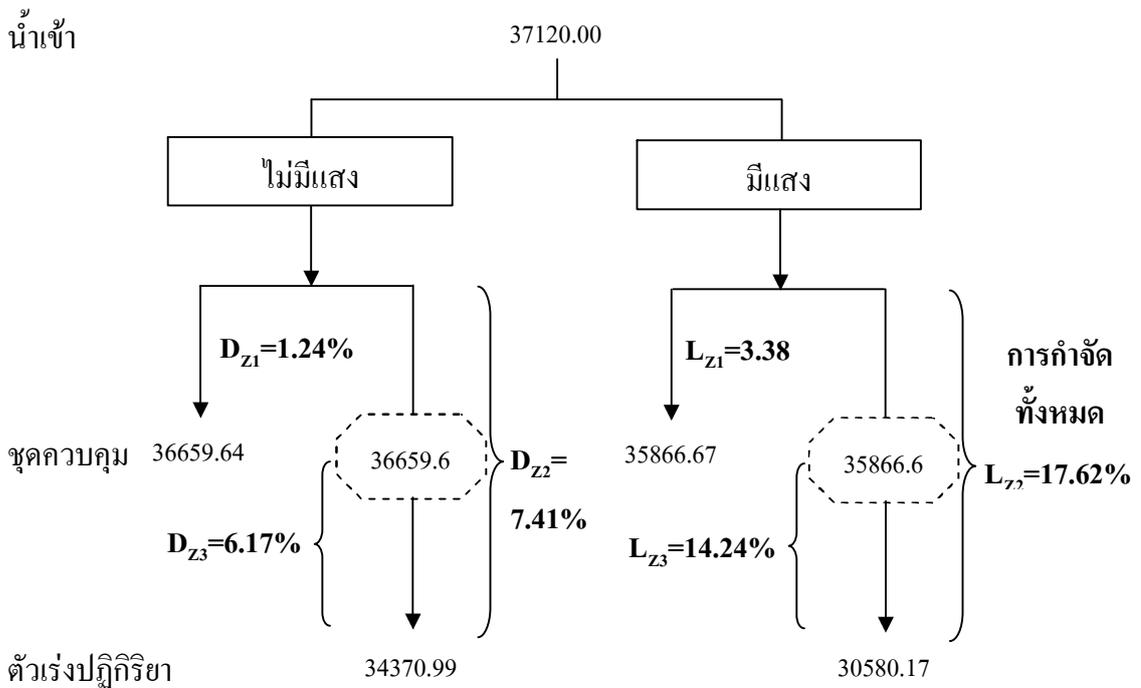


ภาพที่ 24 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)



ภาพที่ 25 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 26 และ 27 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{z1}$  เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่าเกิดการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาน้อยมาก ส่วนประสิทธิภาพของกระบวนการ  $L_{z1}$  เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีแสงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากมีกระบวนการโฟโตไลซิสเกิดขึ้นและเมื่อเติม ZnO ลงไป สำหรับในกรณีที่ไม่มีแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{z2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 7.41% (2.70-12.12%) และ 13.89% (10.30-17.77%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพของ  $D_{z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพของ  $D_{z3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 6.17% (1.46-10.88%) และ 12.65% (9.06-16.53%) ตามลำดับ สำหรับในที่มีแสงนั้น เมื่อเติม ZnO ลงไป ประสิทธิภาพการกำจัดรวม  $L_{z2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 17.62% (14.44-20.80%) และ 26.57% (19.92-30.40%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $L_{z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพของกระบวนการ  $L_{z3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 14.24% (11.06-17.42%) และ 23.19% (16.54-27.02%) ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการ



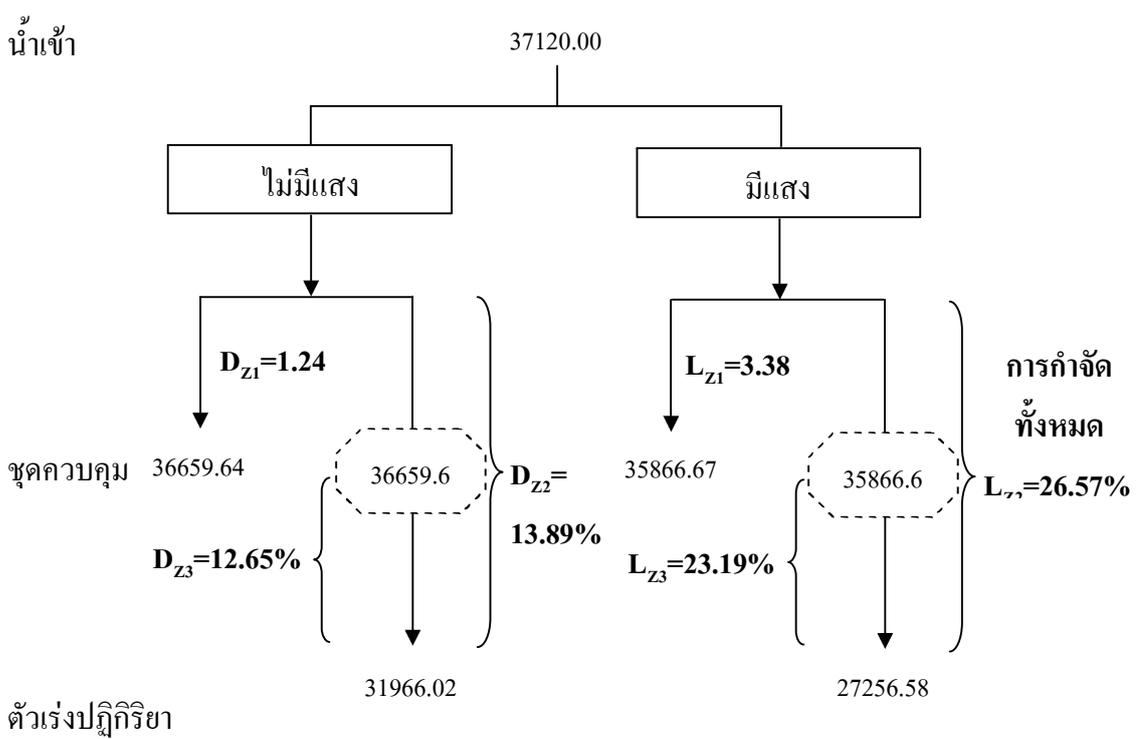
ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

ในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex et al., 2003) ประสิทธิภาพของ  $L_{z2}$  และ  $D_{z2}$  ที่ได้ เมื่อนำมาลบกันจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 10.21% และ 12.68% ที่ไม่ทำการปรับและทำการปรับพีเอชตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าการดูดซับ

1.5.2 การใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์ที่โอซีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียวทั้งที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังภาพที่ 28, 29

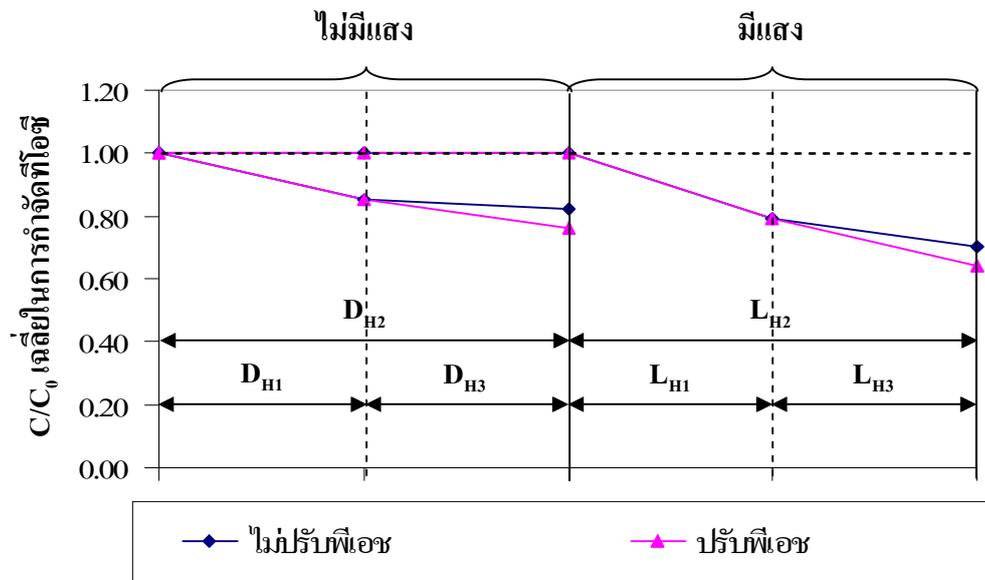


ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (N=3)

หมายเหตุ ชดเชยคือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

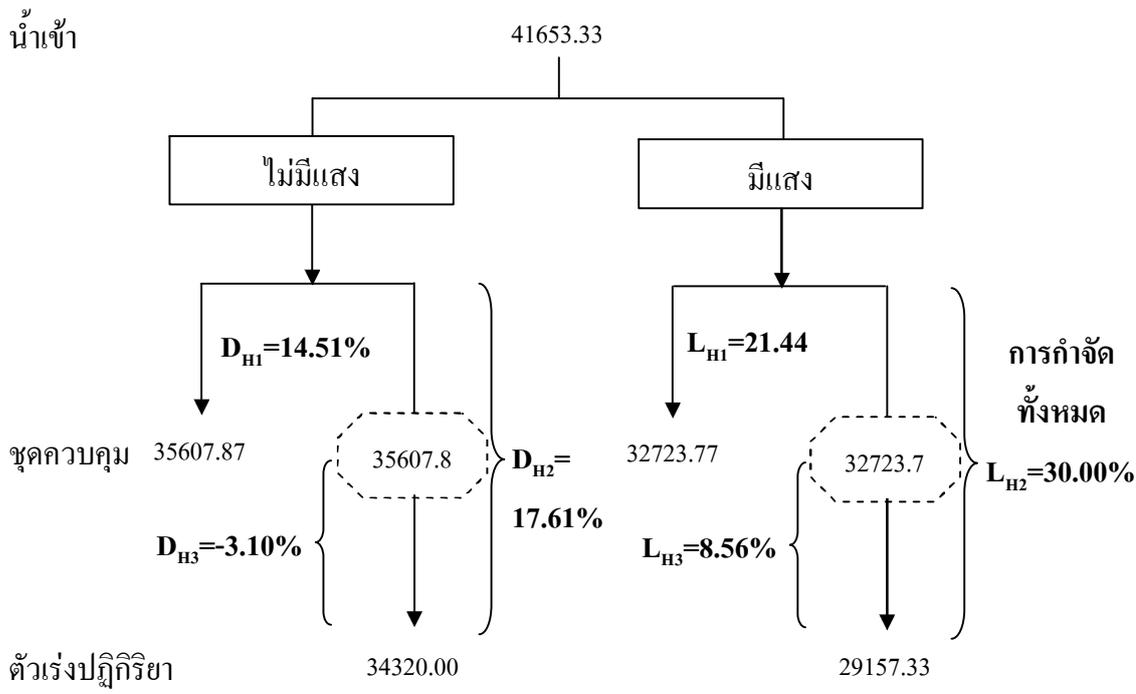
และ 30 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี เมื่อไม่ปรับพีเอช ในที่ที่ไม่มีแสงและที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.82 และ 0.70 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 17.61% และ 30.00% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี เมื่อทำการปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.76 และ 0.64 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 24.21% และ 36.04% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 29 และ 30 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{H1}$  เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบที่มีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาเท่ากับ 14.51% ส่วนประสิทธิภาพของกระบวนการ  $L_{H1}$  เท่ากับ 21.44% และเมื่อเติม  $H_2O_2$  ลงไป สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{H2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 17.61% และ 24.29% (24.20-24.38%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $D_{H1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก



ภาพที่ 28 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิเดนต์ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

กระบวนการ  $D_{H3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 3.10% และ 9.78% (9.69-9.87%) ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพจาก  $D_{H1}$  สำหรับในที่ที่มีแสงนั้น เมื่อเติม  $H_2O_2$  ลงไป ประสิทธิภาพการกำจัดรวม  $L_{H2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 30.00% และ 36.04% (35.08-37.00%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพของ  $L_{H1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจากกระบวนการ  $L_{H3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ 8.56% และ 14.60% (13.64-15.56%) ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพของ  $L_{H1}$  อย่างเดียว โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) ซึ่งในการทดลองนี้ไม่มีร้อยละการระเหยของน้ำ ประสิทธิภาพของ  $L_{H2}$  และ  $D_{H2}$  ที่ได้เมื่อนำมาลบกันจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 12.39% และ 11.75% ที่ไม่ทำการปรับและทำการปรับพีเอช ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เกิดขึ้นได้ดีกว่าการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ในที่ที่ไม่มีแสง

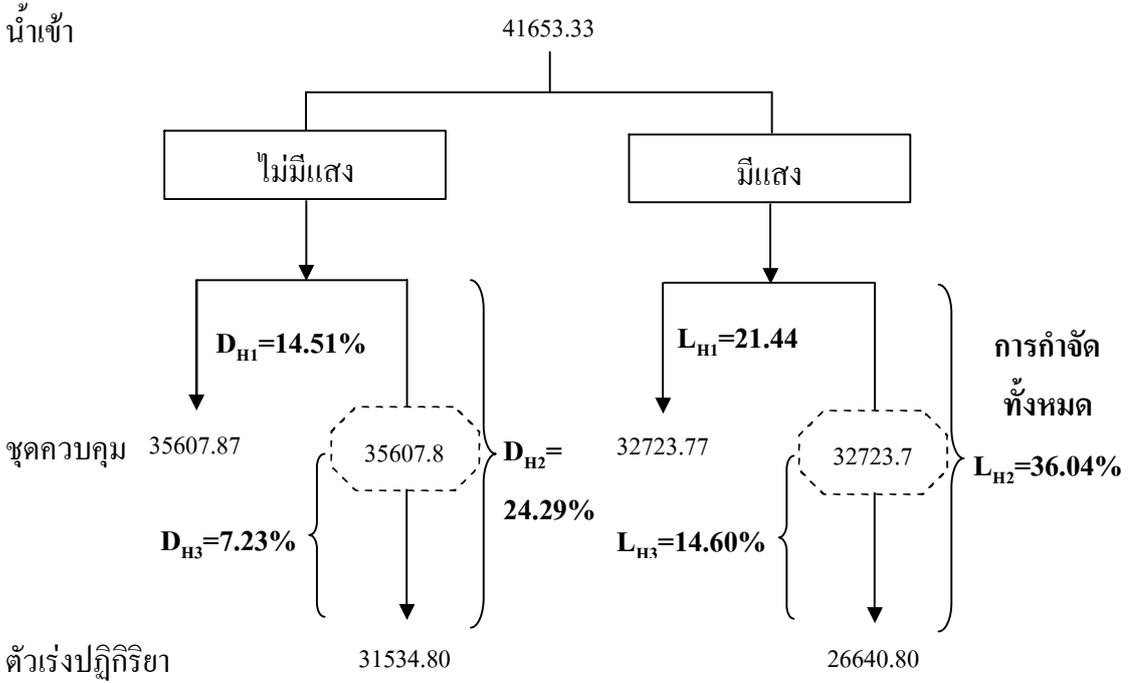


ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์ ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

หมายเหตุ ชดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม  $H_2O_2$

1.5.3 การใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$

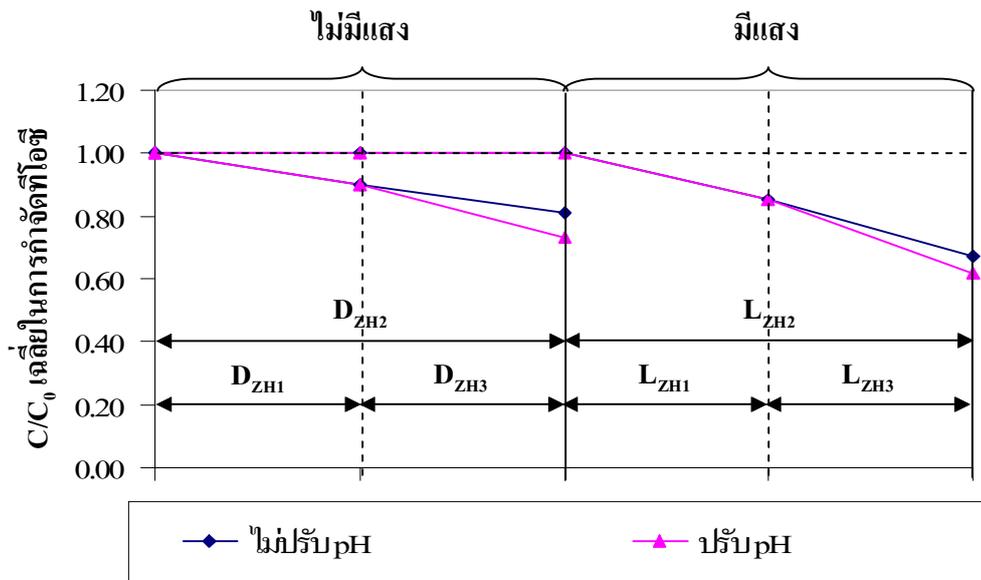
ผลการวิเคราะห์ที่โอซีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ทั้งที่ปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังภาพที่ 31, 32 และ 33 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี เมื่อไม่ปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.81 และ 0.67 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 19.18% และ 33.24% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี เมื่อทำการปรับพีเอชในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง  $C/C_0$  เหลือเท่ากับ 0.73 และ 0.62 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหลือได้เท่ากับ 27.26% และ 37.88% ตามลำดับ



ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิเดนต์ ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส (N=3)

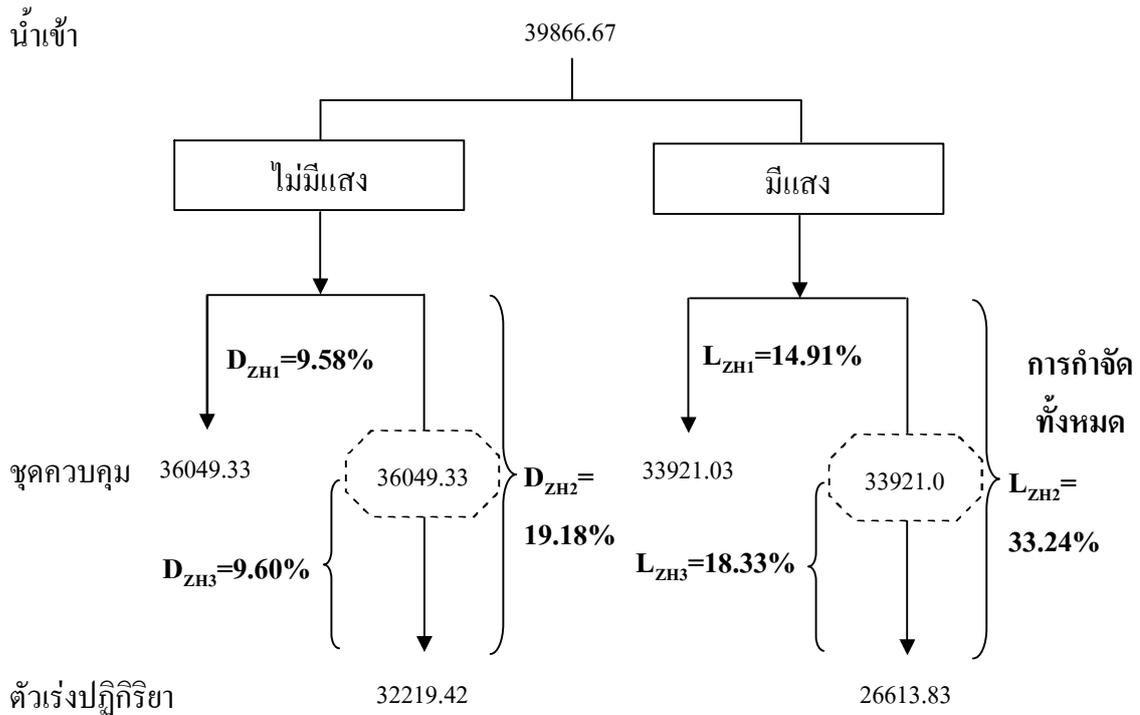
หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม  $H_2O_2$

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 32 และ 33 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{ZH1}$  เมื่อพิจารณาทั้งที่ทำการปรับพีเอชและไม่ปรับพีเอชนั้นพบที่มีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาเท่ากับ 9.58% ส่วนประสิทธิภาพของกระบวนการ  $L_{ZH1}$  เท่ากับ 14.91% และเมื่อเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ลงไป สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{ZH2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 19.18% (17.96-20.40%) และ 27.26% (25.02-29.50%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $D_{ZH1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก  $D_{ZH3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 9.60% (8.38-10.82%) และ 18.18% (15.44-19.92%) ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของการกำจัดที่โอซีจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เมื่อไม่ปรับพีเอช แต่เมื่อทำการปรับพีเอช ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีจากการดูดซับบนผิวตัวเร่ง



ภาพที่ 31 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

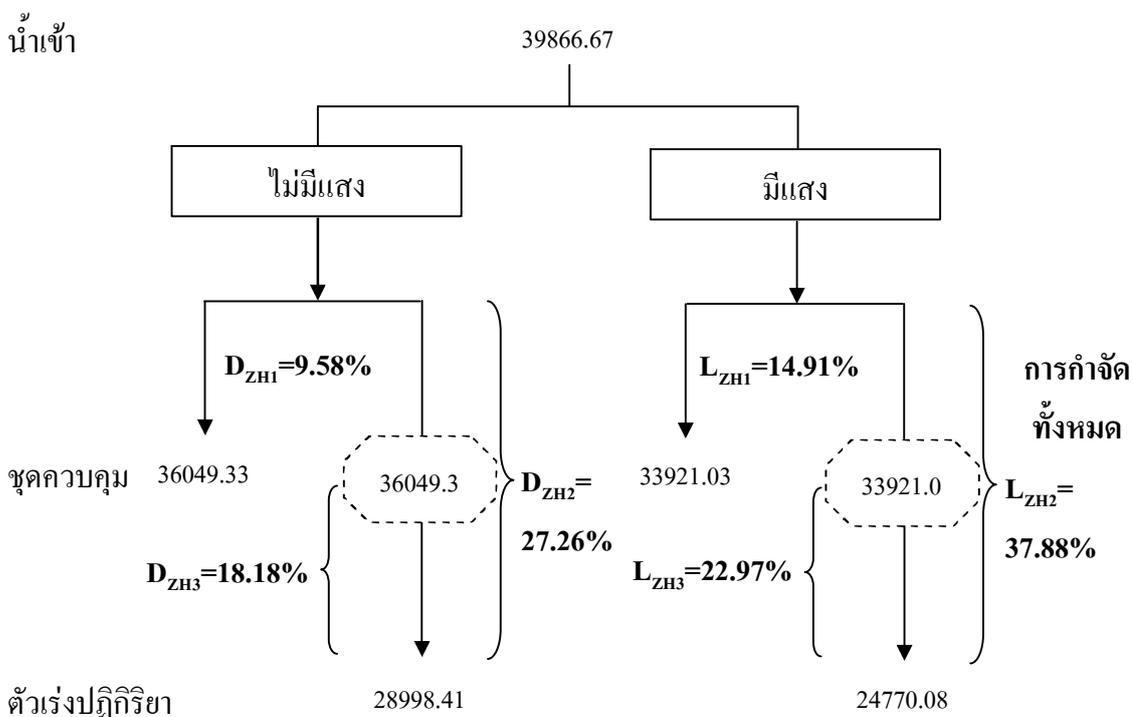
ปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  มากกว่าประสิทธิภาพจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา สำหรับในที่ที่มีแสงนั้น เมื่อเติม ZnO และ  $H_2O_2$  ลงไป ประสิทธิภาพการกำจัดรวม  $L_{ZH2}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 33.24% (29.90-37.49%) และ 37.88% (37.00-37.49%) ตามลำดับ เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $L_{ZH1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพของ  $L_{ZH3}$  ที่ไม่ปรับและปรับพีเอชเท่ากับ 18.33% (14.09-22.58%) และ 22.97% (22.09-22.58%) ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่า เมื่อไม่ปรับพีเอช ประสิทธิภาพของการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสใกล้เคียงกับการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  แต่เมื่อปรับพีเอช การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา, กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เกิดได้ดีกว่าการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิส โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex et al., 2003) ซึ่งในการทดลองนี้มีร้อยละการระเหยของน้ำเท่ากับ



ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ไม่ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

6.32% ประสิทธิภาพของ  $L_{ZH2}$  และ  $D_{ZH2}$  ที่ได้ เมื่อนำมาลบกันจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เท่ากับ 14.06% และ 10.62% ที่ไม่ทำการปรับและทำการปรับพีเอช ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เกิดได้ดีกว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$

ผลการวิเคราะห์ที่ไอซีในน้ำสังเคราะห์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 3 สภาวะ เมื่อปรับและไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 19 และภาพที่ 34 และ 35 และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 20 ซึ่งจะเห็นว่า การใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีสูงสุดทั้งที่ไม่ปรับ



ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ทำการปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (N=3)

พีเอชและทำการปรับพีเอช ในสภาวะนี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ปรับและปรับพีเอช เท่ากับ  $2.22 \times 10^{-4}$  ต่อวินาทีและ  $2.65 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับและเมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีจะต่ำที่สุดทั้งที่ไม่ปรับพีเอชและทำการปรับพีเอช โดยในสภาวะนี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ปรับและปรับพีเอชน้อยกว่าการใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เท่ากับ  $1.10 \times 10^{-4}$  ต่อวินาทีและ  $1.75 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้งหมดเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดสีและที่โอซีในที่ที่มีแสงสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสงทั้งที่ทำการปรับและไม่ปรับพีเอชในทุกสภาวะ โดยในสภาวะที่ใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว เกิดเนื่องจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันในที่ที่มีแสง แต่ในที่ที่ไม่มีแสงมีเพียงการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นเท่านั้น นอกจากนั้นยังพบอีกว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและที่โอซีของน้ำสังเคราะห์ ซึ่งเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี

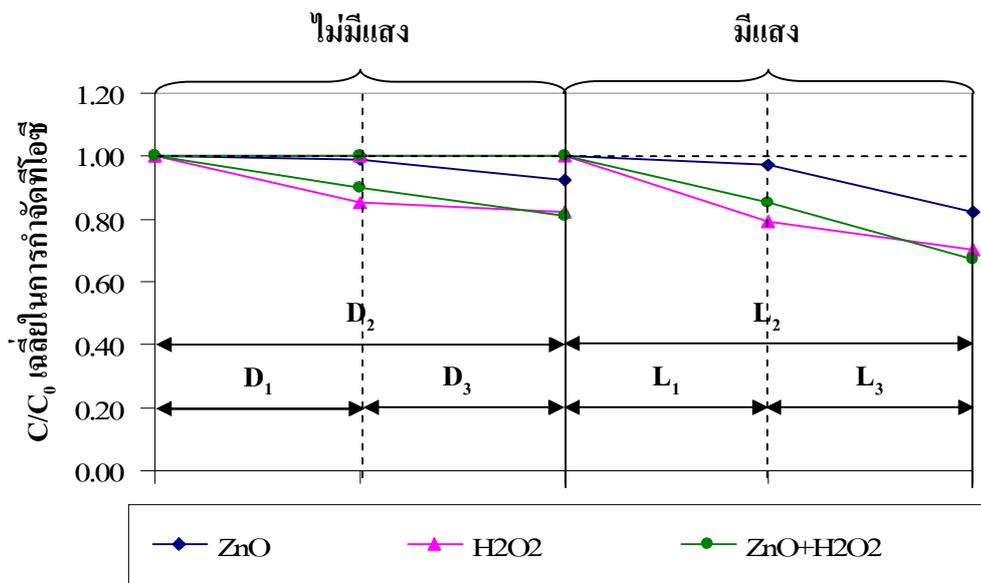
**ตารางที่ 19** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

ตัวอย่างน้ำ	ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี					
	ZnO (I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=38°C)		$H_2O_2$ (I=3140 $\mu W/cm^2$ , T=41°C)		ZnO+ $H_2O_2$ (I=3020 $\mu W/cm^2$ , T=39°C)	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
น้ำเข้า	37120.00	1.00	41653.33	1.00	39866.67	1.00
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	36659.64	0.99	35607.87	0.85	36049.33	0.90
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	34370.99	0.93	34320.00	0.82	32219.42	0.81
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	31966.02	0.86	31534.80	0.76	28998.41	0.73
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	35866.67	0.97	32723.77	0.79	33921.03	0.85
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	30580.17	0.83	29157.33	0.70	26613.83	0.67
มีแสง / ปรับพีเอช	27256.58	0.73	26640.80	0.64	24770.08	0.62

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม ZnO และ  $H_2O_2$

**ตารางที่ 20** ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

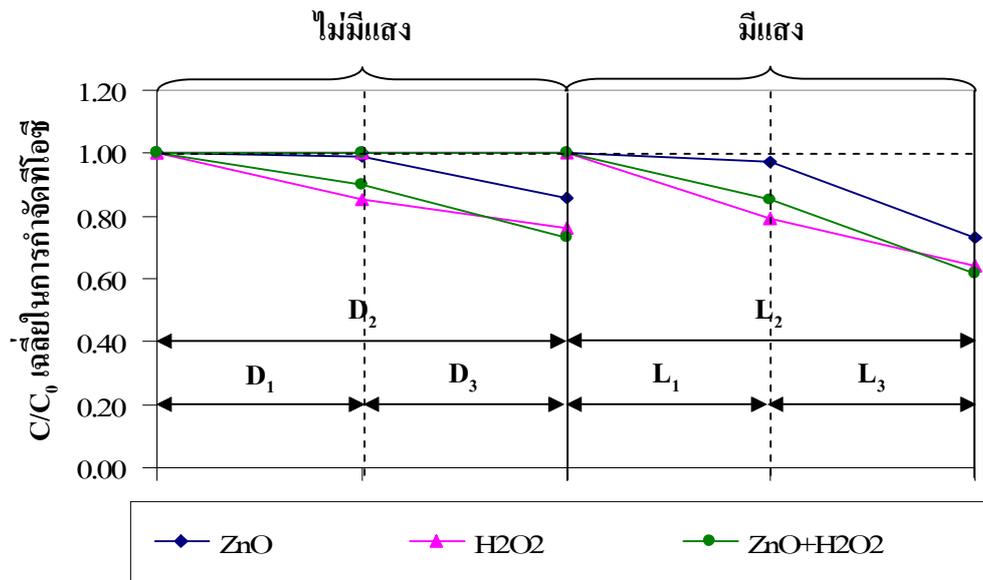
ตัวอย่างน้ำ	$k_{ZnO}$	$k_{H_2O_2}$	$k_{ZnO+H_2O_2}$
	(I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=38°C)	(I=3140 $\mu W/cm^2$ , T=41°C)	(I=3020 $\mu W/cm^2$ , T=39°C)
ไม่มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	$4.03 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-4}$
ไม่มีแสง / ปรับพีเอช	$8.37 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-4}$
มีแสง / ไม่ปรับพีเอช	$1.10 \times 10^{-4}$	$1.98 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-4}$
มีแสง / ปรับพีเอช	$1.75 \times 10^{-4}$	$2.48 \times 10^{-4}$	$2.65 \times 10^{-4}$



ภาพที่ 34 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไม่ปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

และทีโอซี เมื่อทำการปรับพีเอชเป็นค่าที่ 12 จะมากกว่าการไม่ปรับพีเอชหรือพีเอชเป็นกรด ซึ่งในการทดลองนี้ คือ พีเอช 3 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่มีสภาพด่างจะมีปริมาณ OH<sup>-</sup> จำนวนมากกว่าน้ำที่มีสภาพเป็นกรด จึงทำให้เกิด OH<sup>•</sup> ซึ่งเป็นสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูงในปริมาณที่สูงตามไปด้วย ดังสมการที่ 2 อีกประการหนึ่ง ค่า zero point charge (zpc) ของ ZnO เท่ากับ  $9.0 \pm 0.3$  พื้นที่ผิวของ ZnO เป็นประจุบวก เมื่อพีเอชต่ำกว่า 9 และเมื่อพีเอชสูงกว่านี้ พื้นที่ผิวจะเป็นประจุลบจาก OH<sup>-</sup> ที่ถูกดูดซับ ปริมาณ OH<sup>-</sup> จำนวนมากบนผิวอนุภาคก็จะทำให้เกิด OH<sup>•</sup> ได้เช่นเดียวกัน

ในสถานะที่ใช้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพรวมในที่ที่มีแสงสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง เนื่องจากมีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่มีแสง ซึ่งกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถเกิดขึ้นได้โดยมีหรือไม่มีโฟตอนก็ได้ (อุษาพร, 2545) โดยเมื่อโฟตอนทำปฏิกิริยากับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะแตกตัวให้ OH<sup>•</sup> ซึ่งเป็นสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูง และถ้าไม่มีโฟตอน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะแตกตัวให้ HO<sub>2</sub><sup>•</sup> ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ OH<sup>•</sup> ต่อไปจนได้ HO<sub>2</sub><sup>-</sup> และเมื่อ HO<sub>2</sub><sup>-</sup> เกิดการรวมตัวกันได้เป็น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพื่อใช้ในปฏิกิริยาต่อไป ดังสมการที่ 12, 13, 15 และ



ภาพที่ 35 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีของน้ำสังเคราะห์ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปรับพีเอช ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร และความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=3)

16 แต่ในที่ที่ไม่มีแสงมีเพียงการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เกิดขึ้นเท่านั้น เพราะฉะนั้น กระบวนการออกซิเดชันสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ในกรณีที่ไม่มีโฟตอน เพียงอย่างเดียวทำให้ OH<sup>•</sup> ที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยกว่าในที่ที่มีแสง นอกจากนั้นยังพบว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีและทีโอซีของน้ำสังเคราะห์ โดยเมื่อทำการปรับพีเอชเป็นค่าที่พีเอช 12 ประสิทธิภาพรวมในการกำจัดดีมากว่าการไม่ปรับพีเอชหรือพีเอชเป็นกรดที่ประมาณ 3 เนื่องจากความเข้มข้นของ H<sup>+</sup> และ OH<sup>-</sup> ในน้ำสังเคราะห์มีผลต่อการเกิด OH<sup>•</sup> (Yang *et al.*, 2005) พีเอชที่เป็นกรดจะมีปริมาณความเข้มข้นของ H<sup>+</sup> มาก H<sup>+</sup> อาจมีผลไปยับยั้งการเกิด OH<sup>•</sup> หรืออาจเกิด OH<sup>•</sup> ได้น้อยกว่าที่พีเอชเป็นค่า

ในสถานะที่ใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ประสิทธิภาพรวมในที่ที่มีแสงสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง เช่นเดียวกัน ซึ่งเกิดเนื่องจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ในที่ที่มีแสง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้

โดยมีหรือไม่มีโฟตอน เมื่อมีโฟตอน  $H_2O_2$  จะแตกตัวให้  $OH^\cdot$  แต่ถ้าไม่มีโฟตอน  $H_2O_2$  จะแตกตัวให้  $HO_2^\cdot$  ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ  $OH^\cdot$  ต่อไปจนได้  $HO_2^\cdot$  และเมื่อ  $HO_2^\cdot$  เกิดการรวมตัวกันจะได้  $H_2O_2$  เพื่อใช้ในปฏิกิริยาต่อไป ดังสมการที่ 12, 13, 15 และ 16 ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะลิติกต้องใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิด  $OH^\cdot$  ออกมาช่วยในการย่อยสลาย สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในที่ที่มีแสง ซึ่งมีเพียงการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวดังนี้ ปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เท่านั้น  $OH^\cdot$  ที่เกิดขึ้นจึงมีจำนวนน้อยกว่าในที่ที่มีแสง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำสังเคราะห์ โดยเมื่อทำการปรับพีเอชเป็นค่าที่ 12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่าการไม่ปรับพีเอชหรือพีเอชเป็นกรด เช่นเดียวกันกับการใช้  $ZnO$  เพียงอย่างเดียวและการใช้  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซีของน้ำสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะ พบว่าการใช้  $ZnO$  ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เนื่องจากการใช้  $ZnO$  ร่วมกับ  $H_2O_2$  เป็นกระบวนการที่นำการบำบัดโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตกับ  $H_2O_2$  และรังสีอัลตราไวโอเล็ตกับ  $ZnO$  มารวมกัน จึงมีแหล่งที่ทำให้เกิด  $OH^\cdot$  อยู่ 2 แหล่ง ได้แก่  $H_2O_2$  และ  $ZnO$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้  $ZnO$  หรือ  $H_2O_2$  เพียงอย่างเดียว อุยาพร (2545) กล่าวว่า การเติม  $H_2O_2$  สามารถทำให้เกิด  $OH^\cdot$  และ  $O_2$  ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

ผลการทดลองในส่วนนี้ทั้งหมด จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการกำจัดทั้งสีและสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $ZnO$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการกำจัดสีสามารถมีประสิทธิภาพสูงกว่าการกำจัดสารอินทรีย์

## 2. การศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี $ZnO$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.1 ลักษณะของน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

จากการวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมของบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นน้ำเสียรวมที่ผ่านการใช้จากกิจกรรมต่าง ๆ ก่อนปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดของโรงงาน โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ พีเอช, การนำไฟฟ้า, ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ, บีโอดี, ซีโอดีและทีโอซี มีค่าเฉลี่ยดังนี้ 10.98, 1366.63 ไมโครซีเมนต์/

เซนติเมตร, 2628.08 มก./ล., 1119.08 มก./ล., 1413.04 มก./ล. และ 305.41 มก./ล. ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 21 ซึ่งพบว่าน้ำเสียมีพีเอชสูงหรือเป็นด่าง เนื่องจากน้ำเสียที่ปล่อยออกมานั้น ส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มาจาก การล้างขวดน้ำอัดลมเพื่อนำมาบรรจุขวดใหม่ โดยสารเคมีที่ใช้สำหรับล้างขวดประกอบด้วย NaOH ฟอสเฟตและคลอรีน ซึ่ง NaOH และฟอสเฟตมีความเป็นด่างสูง ส่วนการนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีไอออนละลายในน้ำมาก เช่น OH<sup>-</sup> สำหรับพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้น ได้แก่ บีโอดี, ซีโอดีและทีโอดี พบว่าในน้ำเสียมีซีโอดีสูงกว่าบีโอดีสามารถอธิบายได้ว่า ในน้ำเสียนี้อินทรีย์ที่ย่อยสลายยากมากกว่าสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย

ตารางที่ 21 ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

พารามิเตอร์	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย+SD (N)
พีเอช	12.40	6.32	10.98 ± 1.08 (45)
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	4590.00	654.00	1366.63 ± 610.66 (41)
ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ (มก./ล.)	3988.00	1018.00	2628.08 ± 860.16 (26)
บีโอดี (มก./ล.)	1960.00	600.00	1119.08 ± 391.91 (14)
ซีโอดี (มก./ล.)	2720.00	200.00	1413.04 ± 632.20 (49)
ทีโอดี (มก./ล.)	505.60	213.20	305.41 ± 92.08 (9)

2.2 การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ พีเอชเริ่มต้นที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยให้ปริมาณ ZnO คงที่ที่ 1.5 กรัม/ลิตรและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ โดยใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

### 2.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช หลังสิ้นสุดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 22 โดยทำทั้งใน

สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง จากการทดลองพบว่าพีเอชที่ทำการศึกษาทุกค่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยที่พีเอชเริ่มต้น 3 ถึง 7 พีเอชจะสูงขึ้นกว่าในตอนต้น เนื่องจาก ZnO มีสมบัติเป็นด่าง (Mrowetz and Selli, 2006) รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยานั้นเกิดได้น้อย จึงทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยา ซึ่งได้แก่ กรดอนินทรีย์ต่าง ๆ ในเตรท ซัลเฟต คลอไรด์ (Ray and Beenackers, 1998) H<sub>2</sub>O รวมทั้ง CO<sub>2</sub> (Zhao and Yang, 2003; Malato *et al.*, 2002) น้อยลงไปด้วย หรืออาจไม่มีเลย แต่ที่พีเอช 9 ถึง 12 พีเอชจะลดลงเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา เนื่องจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ส่งผลให้พีเอชลดลง รวมทั้งเมื่อ CO<sub>2</sub> อยู่ในน้ำเสียจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) นอกจากนั้นจะเห็นอีกว่าปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีที่สภาวะเป็นด่าง

**ตารางที่ 22** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=3)

พีเอชเริ่มต้น	พีเอชของน้ำออก	
	ไม่มีแสง	มีแสง
	(I=0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=42°C)	(I=3360 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=42°C)
3	5.91	6.82
5	7.39	7.42
7	7.87	8.71
9	8.88	8.88
12	11.92	11.86

### 2.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งละลายน้ำ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังสิ้นสุดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 23 โดยทำทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง ในการทดลองนี้เราจะพิจารณาเฉพาะของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมของแต่ละสภาวะ เนื่องจากเราจะนำค่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมที่สูงกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำเข้ามาคำนวณหาร้อยละการระเหยของน้ำเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่แท้จริง ซึ่งให้ค่าร้อยละการ

ระเหยของน้ำที่ชัดเจนกว่าค่าการนำไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงน้อยกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสง เมื่อนำมาคำนวณหาร้อยละการระเหยพบว่า ที่ที่ไม่มีแสง ไม่มีการระเหยเกิดขึ้น เนื่องจากไม่ใช่แสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้น้อย

**ตารางที่ 23** การเปลี่ยนแปลงของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=3)

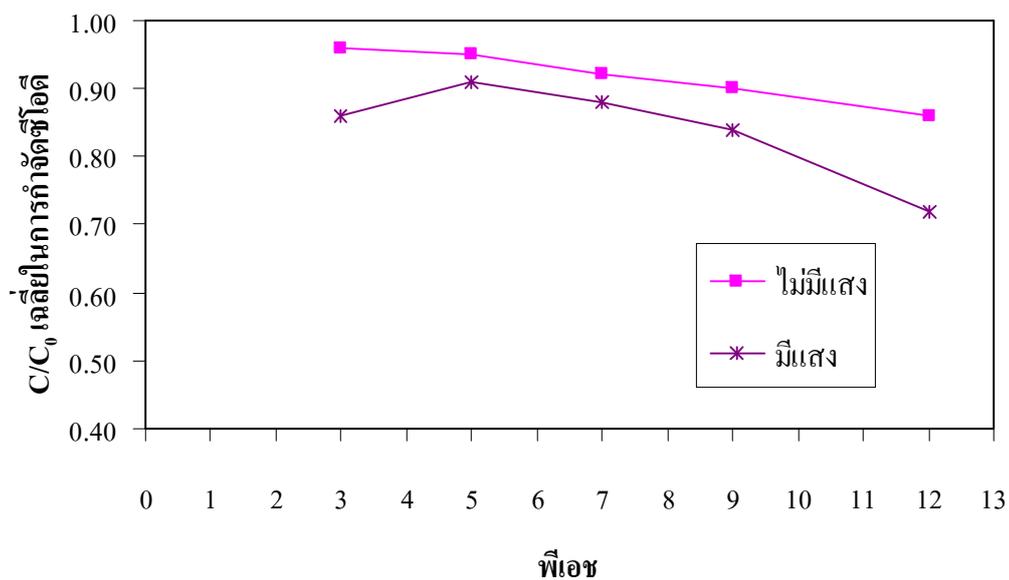
พีเอชเริ่มต้น	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก	
	ไม่มีแสง (มก./ล.)	มีแสง (มก./ล.)
	(I=0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=42°C)	(I=3360 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=42°C)
3	2744.7	4678.7
5	2926.0	4312.0
7	2356.0	4480.0
9	2694.7	4349.3
12	2754.0	4903.3

### 2.2.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่อพีเอชเริ่มต้น

ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจริงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 24 และภาพที่ 36 โดยทำการทดลองทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง ซึ่งพบว่า พีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยจะมีค่าสูงสุด เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงต่างระหว่าง 9 ถึง 12 ซึ่งซีโอดีจะลดลงได้ดีที่สุดที่พีเอช 12 โดยมีค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.72 และ  $1.85 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาที่พีเอชในช่วงกรดและกลางพบว่าซีโอดีลดลงน้อย โดยเฉพาะที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยเกิดขึ้นได้น้อยที่สุด ซึ่งมีค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.91 และ  $5.24 \times 10^{-5}$  ต่อวินาที ตามลำดับ (ค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยที่ได้ออกมาในที่ที่มีแสงนั้นจะต้องนำร้อยละการระเหยมาใช้ใน

**ตารางที่ 24** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=3)

พีเอช	ซีโอดีของน้ำออก					
	ไม่มีแสง			มีแสง		
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	k (s <sup>-1</sup> )	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	k (s <sup>-1</sup> )
3	2014.90	0.96	2.85×10 <sup>-5</sup>	1813.92	0.86	8.38×10 <sup>-5</sup>
5	1997.80	0.95	3.44×10 <sup>-5</sup>	1925.32	0.91	5.24×10 <sup>-5</sup>
7	1960.70	0.92	4.03×10 <sup>-5</sup>	1858.75	0.88	7.10×10 <sup>-5</sup>
9	1895.73	0.90	6.47×10 <sup>-5</sup>	1775.01	0.84	9.69×10 <sup>-5</sup>
12	1802.43	0.86	9.03×10 <sup>-5</sup>	1534.66	0.72	1.83×10 <sup>-4</sup>



**ภาพที่ 36** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่พีเอช 3, 5, 7, 9 และ 12 โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=3)

การคำนวณด้วย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่แท้จริง ซึ่งในการทดลองนี้มีการระเหยของน้ำในที่ไม่มีแสง 45.4% แต่ในที่มีแสง ไม่มีการระเหยเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียที่มีสภาพด่างจะมีปริมาณ  $\text{OH}^-$  จำนวนมากกว่าในน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและกลางจึงทำให้เกิด  $\text{OH}^-$  ซึ่งเป็นสารที่มีอำนาจออกซิไดซ์สูงในปริมาณที่สูงตามไปด้วย (วุทธินันท์, 2544; Augugliaro *et al.*, 2002) ดังสมการที่ 2

อีกประการหนึ่ง ค่า zero point charge (zpc) ของ ZnO เท่ากับ  $9.0 \pm 0.3$  พื้นที่ผิวของ ZnO เป็นประจุบวก เมื่อพีเอชต่ำกว่า 9 และเมื่อพีเอชสูงกว่านี้ พื้นที่ผิวจะเป็นประจุลบจาก  $\text{OH}^-$  ที่ถูกดูดซับ ปริมาณ  $\text{OH}^-$  จำนวนมากบนผิวอนุภาคก็จะทำให้เกิด  $\text{OH}^-$  ได้เช่นเดียวกัน (Kansal *et al.*, 2006; Nishio *et al.*, 2006) ผลที่ได้แตกต่างจากชาญชัย (2549) ซึ่งพบว่าที่พีเอช 3 การย่อยสลายสีซีบาร์คอนเรดเกิดได้ดีที่สุด เมื่อใช้  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกันกับการทดลองในส่วนที่ 1 ซึ่งที่พีเอชเป็นค่าสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าที่พีเอชเป็นกรด นอกจากนั้น พีเอชที่ได้ยังเป็นผลดีต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์อีกด้วย เนื่องจากน้ำเสียจริงมีพีเอชเริ่มต้นประมาณ 12 จึงไม่ต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอช ทำให้ไม่เป็นการเพิ่มภาระของแข็งทั้งหมดละลายน้ำให้แก่น้ำเสีย

2.3 การศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ทำการศึกษาได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร โดยใช้พีเอชเริ่มต้นคงที่ที่ 12 หรือพีเอชของน้ำเสียจริง ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบแบตช์ โดยใช้ น้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

### 2.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการเปลี่ยนแปลงพีเอช หลังสิ้นสุดกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 25 โดยทำการทดลองทั้งในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง จากผลการทดลองพบว่า พีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อใช้ปริมาณ ZnO ที่แตกต่างกัน

**ตารางที่ 25** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อ

กระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (N=3)

ปริมาณ ZnO เริ่มต้น (กรัม/ลิตร)	พีเอชของน้ำออก	
	ไม่มีแสง (I=0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=37°C)	มีแสง (I=2930 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=37°C)
1	11.48	11.50
2	11.45	11.43
3	11.39	11.30
4	11.43	11.36
5	11.46	11.41

### 2.3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งละลายน้ำ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังสิ้นสุดกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 26 โดยทำการทดลองทั้งในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง ในการทดลองนี้เราจะพิจารณาเฉพาะของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมของที่มีแสงและไม่มีแสงเช่นเดียวกัน เนื่องจากเราจะนำค่าของแข็งละลายน้ำของชุดควบคุมที่สูงกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำเข้ามาคำนวณหาร้อยละการระเหย เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่แท้จริง ซึ่งให้ค่าร้อยละการระเหยที่ชัดเจนกว่าค่าการนำไฟฟ้าจากผลการทดลองพบว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงน้อยกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสง เมื่อนำมา

คำนวณหาร้อยละการระเหย พบว่า ที่ที่มีแสงมีการระเหย 32.0% แต่ในที่ที่ไม่มีแสง ไม่มีการระเหยเกิดขึ้น เนื่องจากไม่ใช่แสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้น้อย

**ตารางที่ 26** การเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (N=3)

ปริมาณ ZnO เริ่มต้น (กรัม/ลิตร)	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก	
	ไม่มีแสง (มก./ล.)	มีแสง (มก./ล.)
	(I=0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=37°C)	(I=2930 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T=37°C)
1	2247.3	2785.3
2	2253.3	2614.7
3	2198.0	1489.3
4	2236.7	2601.3
5	2255.3	2804.7

### 2.3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่อปริมาณ ZnO เริ่มต้น

ผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจริงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 27 และภาพที่ 37 โดยทำการทดลองทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

จากการทดลองพบว่า ปริมาณ ZnO เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยจะมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ ZnO เริ่มต้น 4 กรัม/ลิตร โดยมีค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.72 และ  $1.82 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยจะมีค่าต่ำสุดที่ปริมาณ ZnO เริ่มต้น 1 กรัม/ลิตร โดยมีค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.90 และ  $5.85 \times 10^{-5}$  ต่อวินาที ตามลำดับ (ค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยที่ได้ออกมาในที่ที่มีแสงนั้นจะต้องนำร้อยละการระเหยมาใช้ในการคำนวณด้วย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่แท้จริง ซึ่งในการทดลองนี้มีการระเหยของน้ำ

ในที่ที่มีแสง 32% แต่ในที่ที่ไม่มีแสง ไม่มีการระเหยของน้ำเกิดขึ้น) จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO การกำจัดซีโอไซด์จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการนี้ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของ ZnO เพิ่มตามไปด้วย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO จนมากเกินไป ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดน้อยลง เนื่องจากอนุภาคของ ZnO ที่แขวนลอยอยู่ทำให้เกิดการบังแสงขณะที่ทำการทดลองได้ การบำบัดจึงลดลง (วุทธิพันธ์, 2544; Daneshvar *et al.*, 2006; Kansal *et al.*, 2006; Modirshahla and Behnajady, 2006; Nishio *et al.*, 2006)

ผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่องต่อไป โดยจะนำปริมาณ ZnO ที่ได้ไปใช้ในการเคลือบบนผิวกระจกที่ใสรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

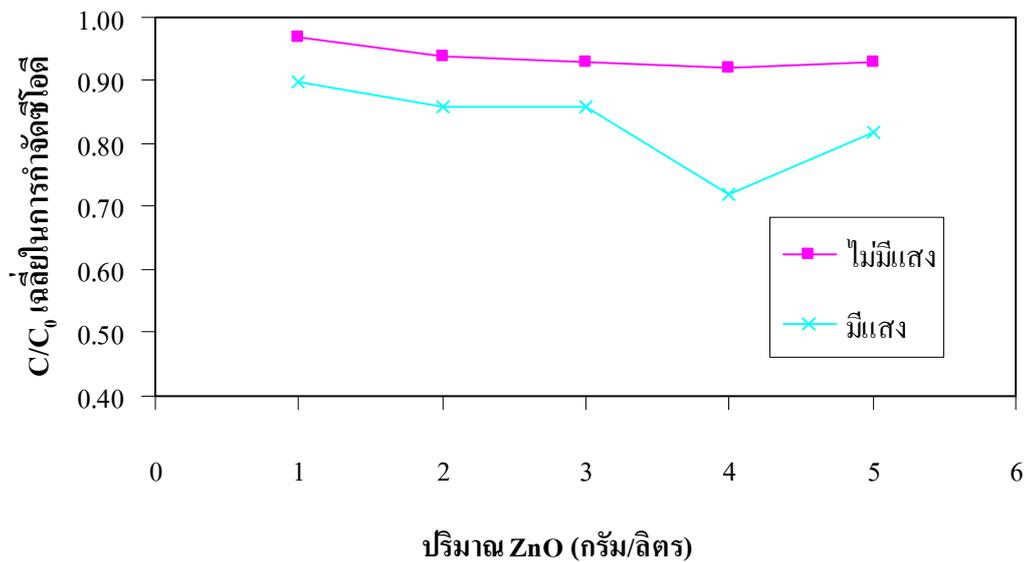
การศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นที่ทำการศึกษาได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ โดยใช้พีเอชเริ่มต้นคงที่ที่ 12 หรือพีเอชของน้ำเสียจริงและปริมาณ ZnO เริ่มต้นคงที่ที่ 4 กรัม/ลิตร ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นและผลของปริมาณ ZnO ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาแบบเบดซ์ โดยใช้ น้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

#### 2.4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการเปลี่ยนแปลงพีเอช หลังสิ้นสุดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 28 โดยทำการทดลองทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง ซึ่งพบว่า ความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นที่ทำการศึกษาทุกค่าเกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอชเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยพีเอชจะลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก  $H_2O_2$  มีความเป็นกรดหรืออาจเกิดเนื่องมาจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย

**ตารางที่ 27** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ปริมาณ ZnO 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (N=3)

ปริมาณ ZnO (กรัมต่อลิตร)	ซีโอดีของน้ำออก					
	ไม่มีแสง			มีแสง		
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	k (s <sup>-1</sup> )	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	k (s <sup>-1</sup> )
1	1978.73	0.97	1.69×10 <sup>-5</sup>	1826.12	0.90	5.85×10 <sup>-5</sup>
2	1907.27	0.94	4.03×10 <sup>-5</sup>	1756.21	0.86	8.38×10 <sup>-5</sup>
3	1899.00	0.93	4.03×10 <sup>-5</sup>	1758.03	0.86	8.38×10 <sup>-5</sup>
4	1867.10	0.92	4.63×10 <sup>-5</sup>	1476.01	0.72	1.82×10 <sup>-4</sup>
5	1892.09	0.93	4.03×10 <sup>-5</sup>	1674.80	0.82	1.10×10 <sup>-4</sup>



**ภาพที่ 37** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่ปริมาณ ZnO 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม/ลิตร โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (N=3)

ทำออกมาได้แก่ กรดอนินทรีย์ต่าง ๆ ในเตรท ซัลเฟต คลอไรด์ (Ray and Beenackers, 1998) น้ำรวมทั้ง CO<sub>2</sub> (Zhao and Yang, 2003) ซึ่งถ้าอยู่ในน้ำเสียจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

**ตารางที่ 28** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เริ่มต้น ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (N=3)

ความเข้มข้น H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> เริ่มต้น (มิลลิโมลาร์)	พีเอชของน้ำออก	
	ไม่มีแสง (I=0 μW/cm <sup>2</sup> , T=40°C)	มีแสง (I=2980 μW/cm <sup>2</sup> , T=40°C)
5	11.12	10.46
10	10.55	10.19
15	10.48	10.59
20	10.35	10.58
25	10.27	10.46

#### 2.4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งละลายน้ำ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ผลการเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังสิ้นสุดกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 29 โดยทำการทดลองทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง ในการทดลองนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมของที่มีแสงและที่ไม่มีแสง เนื่องจากเราจะนำค่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมที่สูงกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำเข้ามาคำนวณหาร้อยละการระเหยของน้ำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีที่แท้จริง ซึ่งให้ค่าร้อยละการระเหยของน้ำที่ชัดเจนกว่าค่าการนำไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงน้อยกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสง เมื่อนำมาคำนวณหาร้อยละการระเหยพบว่า ที่ที่มีแสงมีการระเหย 10.2% แต่ในที่ที่ไม่มีแสงมีการระเหยเพียง 0.5% เนื่องจากไม่ใช่แสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นได้น้อย

**ตารางที่ 29** การเปลี่ยนแปลงของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  ต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (N=3)

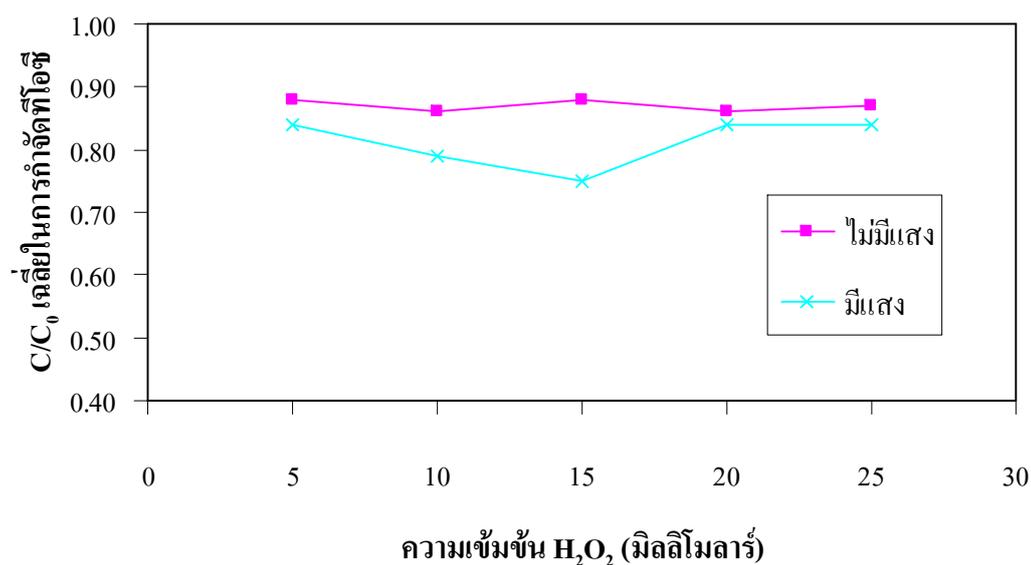
ความเข้มข้น $H_2O_2$ เริ่มต้น (มิลลิโมลาร์)	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก	
	ไม่มีแสง (มก./ล.)	มีแสง (มก./ล.)
	(I=0 $\mu W/cm^2$ , T=40°C)	(I=2980 $\mu W/cm^2$ , T=40°C)
5	2170.7	2204.7
10	2072.0	2224.7
15	2125.3	2301.3
20	2264.0	2339.3
25	2193.3	2319.3

#### 2.4.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีต่อความเข้มข้น $H_2O_2$ เริ่มต้น

ผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีในน้ำเสียจริงของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 30 และภาพที่ 38 โดยทำการทดลองทั้งในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้น 15 มิลลิโมลาร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่โอซีสูงที่สุดเฉลี่ย โดยมีค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยและค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.75 และ  $1.60 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ตามลำดับ (ค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยที่ได้ออกมาในที่ที่มีแสงนั้นจะต้องนำร้อยละการระเหยมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซีที่แท้จริง ซึ่งในการทดลองนี้มีการระเหยของน้ำในที่ที่มีแสง 10.2% แต่ในที่ที่ไม่มีแสงมีการระเหยเกิดขึ้นน้อยมากเพียงแค่ 0.5%) และยังพบอีกว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้น  $H_2O_2$  การบำบัดที่โอซีจะเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้น  $H_2O_2$  น้อย  $OH^\cdot$  ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา แต่เมื่อความเข้มข้น  $H_2O_2$  สูง  $OH^\cdot$  ที่เกิดขึ้นก็จะมากขึ้นด้วย ดังสมการที่ 9, 10 และ 11 แต่เมื่อความเข้มข้น  $H_2O_2$  มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่โอซีลดน้อยลง (Daneshvar *et al.*, 2006) เนื่องจากเมื่อความเข้มข้น  $H_2O_2$  มาก  $OH^\cdot$  จะทำปฏิกิริยากับ  $H_2O_2$  แทนที่จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดเป็น  $HO_2^\cdot$  ซึ่งเป็นสารที่ไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ  $OH^\cdot$  (Evgenidou *et*

**ตารางที่ 30** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีที่ความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่มีแสงและที่ที่ไม่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พิเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (N=3)

ความเข้มข้น $\text{H}_2\text{O}_2$ (มิลลิโมล)	ที่ไอซีของน้ำออก					
	ไม่มีแสง			มีแสง		
	มก./ล.	$C/C_0$	$k$ ( $\text{s}^{-1}$ )	มก./ล.	$C/C_0$	$k$ ( $\text{s}^{-1}$ )
5	897.68	0.88	$7.10 \times 10^{-5}$	856.77	0.84	$9.69 \times 10^{-5}$
10	881.81	0.86	$8.38 \times 10^{-5}$	810.55	0.79	$1.31 \times 10^{-4}$
15	894.59	0.88	$7.10 \times 10^{-5}$	770.18	0.75	$1.60 \times 10^{-4}$
20	875.23	0.86	$8.38 \times 10^{-5}$	855.78	0.84	$9.69 \times 10^{-5}$
25	884.39	0.87	$7.74 \times 10^{-5}$	859.85	0.84	$9.69 \times 10^{-5}$



**ภาพที่ 38** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีที่ความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิโมลาร์ โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่ที่ไม่มีแสงและที่ที่มีแสง ที่ระยะเวลา 30 นาที พิเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (N=3)

al., 2005; Azam and Hamid, 2006; Daneshvar *et al.*, 2006; Modirshahla and Behnajady, 2006; Murugandham and Swaminathan, 2006) การเพิ่มขึ้นของ  $\text{HO}_2^{\cdot}$  ทำให้เกิดการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Daneshvar *et al.*, 2005; Chen and Cao, 2006; Daneshvar *et al.*, 2006) ดังสมการที่ 14 และ 18 นอกจากนั้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  อาจไปทำปฏิกิริยากับ  $\text{h}_{\text{vb}}^+$  ดังสมการที่ 22 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำให้  $\text{h}_{\text{vb}}^+$  มีปริมาณลดลง ส่งผลให้  $\text{OH}^{\cdot}$  ลดลงด้วย (Wang and Hong, 1999) เมื่อโมเลกุลของ  $\text{HO}_2^{\cdot}$  2 โมเลกุลมารวมกันจะทำให้เกิด  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพิ่มมากขึ้นจนความเข้มข้นมากเกินไป ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อประสิทธิภาพการบำบัด ดังสมการที่ 16, 23 และ 24



ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับกิตติขศ (2548) ซึ่งพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  ต่อความเข้มข้นของฟีนอลจาก 50:1 เป็น 150:1 สามารถกำจัดฟีนอลได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  ต่อความเข้มข้นของฟีนอลเป็น 300:1 ความสามารถในการกำจัดฟีนอลลดลงและแนวโน้มในการกำจัดที่โอซิกก็เป็นอย่างเดียวกัน

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่สุดที่พีเอชเริ่มต้น 12 ปริมาณ ZnO เริ่มต้น 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  เริ่มต้น 15 มิลลิโมลาร์

### 3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง

ในการศึกษานี้ทำการทดลองในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่องที่มีแผ่นกระจกเคลือบด้วย ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและแผ่นกระจกเปล่าเป็นชุดควบคุม โดยใช้น้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม ซึ่งสภาวะที่ทำการศึกษาคือ การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและการใช้ ZnO ร่วมกับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  โดยกำหนดให้ อัตราการไหลคงที่  $3.33 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที มีระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชเริ่มต้นคงที่ที่ 12 หรือพีเอชของน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO เริ่มต้นคงที่ที่ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  เริ่มต้นคงที่ที่ 15 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นผลที่ได้จากผลของพีเอชเริ่มต้น ผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นและผลของความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{O}_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิ

เดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตามลำดับ โดยทำการทดลองทั้งในที่ที่มีแสงและไม่มีแสง ซึ่งปริมาณ ZnO ที่ใช้ในการเคลือบกระจกเมื่อล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วจะต้องมีปริมาณเท่ากับ 0.96 กรัมต่อแผ่น

### 3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอช

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพีเอชก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 2 สภาวะ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 31 พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอชในทุกสภาวะทั้งในที่ที่มีแสงและในที่ที่ไม่มีแสง โดยพีเอชจะลดต่ำกว่าน้ำเข้า เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว พีเอชจะลดลงจาก 10.27 เป็น 9.67 และ 9.77 ในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง เช่นเดียวกันกับเมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  พีเอชจะลดลงจาก 11.13 เป็น 9.62 และ 8.81 ทั้งในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง ตามลำดับ ทั้งนี้พีเอชที่ลดลงอาจเกิดเนื่องจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้มักจะเป็นกรดอนินทรีย์ต่าง ๆ ในเตรท ซัลเฟต คลอไรด์ (Ray and Beeneckers, 1998) น้ำ รวมทั้ง  $CO_2$  (Zhao and Yang, 2003) ซึ่งถ้าอยู่ในน้ำเสียจะกลายเป็นกรดคาร์บอนิก ( $H_2CO_3$ ) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า พีเอชของน้ำที่ผ่านกระบวนการ ซึ่งใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีค่าต่ำกว่าการใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  สามารถเกิดได้ดีกว่าเมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว รวมทั้ง  $H_2O_2$  มีความเป็นกรด จึงทำให้พีเอชต่ำลง

### 3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของของแข็งทั้งหมดละลายน้ำก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 2 สภาวะ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 32 ในการทดลองนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสงและไม่มีแสง เนื่องจากเราจะนำค่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมที่สูงกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำเข้ามาคำนวณร้อยละการระเหยของน้ำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีที่แท้จริง ซึ่งให้ค่าร้อยละการระเหยของน้ำที่ชัดเจนกว่าค่าการนำไฟฟ้า จากผลการทดลองดังตารางที่ 32 พบว่า ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสงน้อยกว่าของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของชุดควบคุมในที่ที่มีแสงทั้งที่ใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  จึงทำให้ร้อยละการระเหยของน้ำน้อยลงเช่นกัน โดยร้อยละการระเหยของน้ำในชุดควบคุมเมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ที่ที่มีแสง เท่ากับ 25.39% และ 22.68% ตามลำดับ ส่วนในที่ที่ไม่มีแสงมีร้อยละการระเหยของน้ำเท่ากับ 0% และ

**ตารางที่ 31** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ (N=9)

ตัวอย่างน้ำ	พีเอชของน้ำออก	
	ZnO (I=3157.5 $\mu W/cm^2$ , T=42°C)	ZnO + $H_2O_2$ (I=3233.3 $\mu W/cm^2$ , T=41.67°C)
น้ำเข้า	10.27	11.13
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	9.94	9.63
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่ไม่มีแสง	9.67	9.62
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	9.86	9.68
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่มีแสง	9.77	8.81

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO และ  $H_2O_2$  โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางที่ 32** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ (N=9)

ตัวอย่างน้ำ	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก (มก./ล.)	
	ZnO (I=3157.5 $\mu W/cm^2$ , T=42°C)	ZnO + $H_2O_2$ (I=3233.3 $\mu W/cm^2$ , T=41.67°C)
น้ำเข้า	2049.33	2736.00
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	1920.00	2925.33
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่ไม่มีแสง	2084.89	2984.00
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	2557.33	3258.67
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่มีแสง	2465.78	3249.78

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO และ  $H_2O_2$  โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

10.04% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีแสงอาทิตย์ในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ร้อยละการระเหยของน้ำน้อยลง

### 3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์

#### 3.3.1 การใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว

ผลการวิเคราะห์ที่ไอซีในน้ำเสียจริงก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว ที่อัตราการไหล  $3.33 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร สามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 33 และภาพที่ 39 และ 40 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในที่ที่ไม่มีแสงและที่มีแสง  $C/C_0$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.94 และ 0.74 ตามลำดับ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 5.26% และ 25.31% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 40 โดยประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{Z1}$  และ  $L_{Z1}$  เท่ากับ 3.06% และ 13.44% เมื่อพิจารณาพบว่า ในที่ที่ไม่มีแสงมีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาน้อยมากและน้อยกว่าในที่ที่มีแสง อาจเกิดเนื่องจากในที่ที่มีแสงมีกระบวนการโฟโตไลซิสเกิดขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นในที่ที่มีแสงมากกว่าในที่ที่ไม่มีแสง และเมื่อเติม ZnO ลงไป สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการ  $D_{Z2}$  เท่ากับ 5.26% (3.29-10.68%) เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพของ  $D_{Z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพของ  $D_{Z3}$  เท่ากับ 2.20% (0.23-7.62%) จะเห็นได้ว่าการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาได้ดีกว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งประสิทธิภาพของกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในที่ที่ไม่มีแสงจะเห็นว่าค่อนข้างน้อย สำหรับในที่ที่มีแสงนั้น เมื่อเติม ZnO ลงไป ประสิทธิภาพการกำจัดรวมของ  $L_{Z2}$  เท่ากับ 25.31% (15.71-31.63%) เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพจาก  $L_{Z1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพของ  $L_{Z3}$  เท่ากับ 11.87% (2.27-18.19%) โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่ที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) ซึ่งในการทดลองนี้มีร้อยละการระเหยของน้ำเท่ากับ 25.39% ส่วนในที่ที่ไม่มีแสง ไม่มีการระเหยของน้ำ จะเห็นได้ว่าการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตไลซิสเกิดได้ดีกว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ประสิทธิภาพของ  $L_{Z2}$  และ  $D_{Z2}$  ที่

**ตารางที่ 33** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=9)

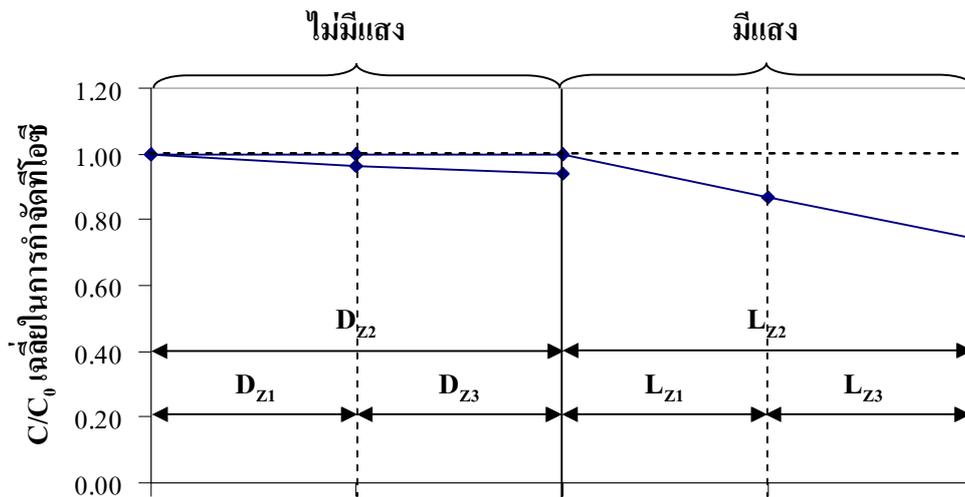
ครั้งที่	น้ำเข้า		ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO
1	319.07	1.00	310.93	0.97	306.20	0.96	294.97	0.92	268.94	0.84
2	213.20	1.00	196.93	0.92	190.42	0.89	190.75	0.89	145.77	0.68
3	390.27	1.00	386.39	0.99	377.44	0.97	312.79	0.80	274.30	0.71
ค่าเฉลี่ย	307.51	1.00	298.09	0.96	291.35	0.94	266.17	0.87	229.67	0.74
SD	89.10	0.00	95.38	0.03	92.81	0.03	65.92	0.06	71.56	0.09
ค่าต่ำสุด	213.20	1.00	196.93	0.92	197.78	0.93	190.75	0.80	147.48	0.69
ค่าสูงสุด	390.27	1.00	386.39	0.99	381.45	0.98	312.79	0.92	271.59	0.85

หมายเหตุ ชดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

ได้ เมื่อนำมาลบก็นจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 20.05% แสดงว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าการดูดซับและจากตารางที่ 33 และภาพที่ 39 และ 40 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดทีโอซีในที่ที่มีแสงสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง

### 3.3.2 การใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

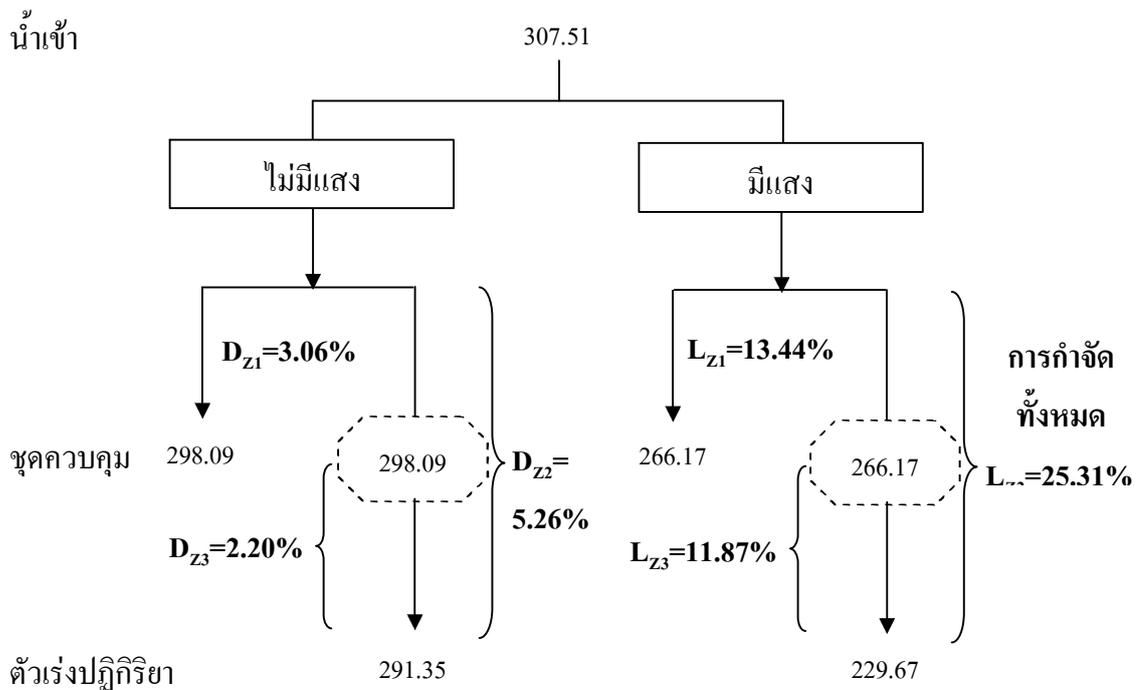
ผลการวิเคราะห์ทีโอซีในน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่อัตราการไหล  $3.33 \times 10^{-7}$  ลูกบาศก์เมตร/วินาที ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ สามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 34 และภาพที่ 41 และ 42 พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีในที่ที่ไม่มีแสงและในที่ที่มีแสง C/C<sub>0</sub> เฉลี่ย



ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริงโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอสน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=9)

เท่ากับ 0.92 และ 0.86 ตามลำดับ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้เท่ากับ 15.51% และ 32.33% ตามลำดับ

ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 42 สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ประสิทธิภาพของกระบวนการที่เกิดขึ้นหุดควบคุม ซึ่งมีการเติม  $H_2O_2$  แต่ไม่มีการเติม ZnO มาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ( $D_{ZH1}$ ) เท่ากับ 7.53% และเมื่อเติม ZnO ลงไป ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ( $D_{ZH2}$ ) เท่ากับ 15.51% (11.06-18.10%) เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพของ  $D_{ZH1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ( $D_{ZH3}$ ) เท่ากับ 7.98% (3.53-10.57%) จะเห็นได้ว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดใกล้เคียงกับการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  สำหรับในที่ที่มีแสงนั้น ประสิทธิภาพกระบวนการที่เกิดขึ้นในหุดควบคุม ซึ่งมีการเติม  $H_2O_2$  แต่ไม่มีการเติม ZnO มาจากการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน



**ภาพที่ 40** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (N=9)

**หมายเหตุ** ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

ของ  $H_2O_2$  ( $L_{ZH1}$ ) พบว่ามีประสิทธิภาพเท่ากับ 12.29% และเมื่อเติม ZnO ลงไป กระบวนการที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  และกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ซึ่งก็คือประสิทธิภาพการกำจัดรวมของกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้น ( $L_{ZH2}$ ) เท่ากับ 32.33% (29.48-39.44%) เมื่อนำประสิทธิภาพที่ได้จากกระบวนการนี้ลบกับประสิทธิภาพ  $L_{ZH1}$  ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่มาจาก การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ ZnO ( $L_{ZH3}$ ) เท่ากับ 20.40% (17.19-27.15%) โดยประสิทธิภาพของแต่ละกระบวนการในที่มีแสงต้องนำร้อยละการระเหยของน้ำมาใช้ในการคำนวณด้วยเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่แท้จริง (Alex *et al.*, 2003) ซึ่งในการทดลองนี้มีร้อยละการระเหยของน้ำเท่ากับ 22.68% ส่วนในที่มีไม่มีแสง การระเหยของน้ำเท่ากับ 10.04% จะเห็นได้ว่าการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันสามารถเกิดได้ดีกว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพของ  $L_{ZH1}$  และ  $D_{ZH1}$  ที่ได้ เมื่อนำมา

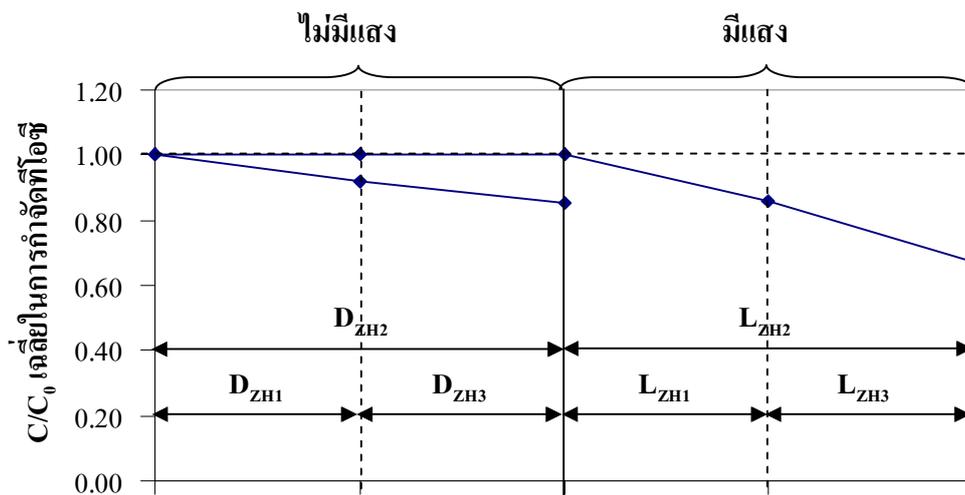
**ตารางที่ 34** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ที่เอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (N=9)

ครั้งที่	น้ำเข้า		ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	$C/C_0$	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO
1	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	414.07	0.82	467.60	0.92
2	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	182.96	0.84	181.18	0.84
3	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	262.54	0.89	243.58	0.83
ค่าเฉลี่ย	339.11	1.00	326.59	0.95	313.56	0.92	286.52	0.85	297.45	0.86
SD	149.45	0.00	155.15	0.04	145.92	0.06	92.03	0.08	150.62	0.05
ค่าต่ำสุด	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	188.18	0.73	181.18	0.83
ค่าสูงสุด	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.96	371.18	0.89	467.60	0.92

**หมายเหตุ** ชดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO และ  $H_2O_2$  โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

ลบก็นจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน  $H_2O_2$  เท่ากับ 4.76% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกของ ZnO เพียงอย่างเดียวได้จากการนำประสิทธิภาพของ  $L_{ZnO}$  และ  $D_{ZnO}$  มาลบก็นเท่ากับ 12.06% ส่วนกระบวนการรวมระหว่าง ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  คำนวณได้จากการนำประสิทธิภาพของ  $L_{ZnO}$  และ  $D_{ZnO}$  มาลบก็นจะได้ประสิทธิภาพการกำจัดจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO และกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ  $H_2O_2$  เท่ากับ 16.82% สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการเกิดขึ้นกับ ZnO มากกว่าที่เกิดขึ้นกับ  $H_2O_2$  และจากตารางที่ 34 ภาพที่ 41 และ 42 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดทีโอซีในที่ที่มีแสงสูงกว่าในที่ที่ไม่มีแสง

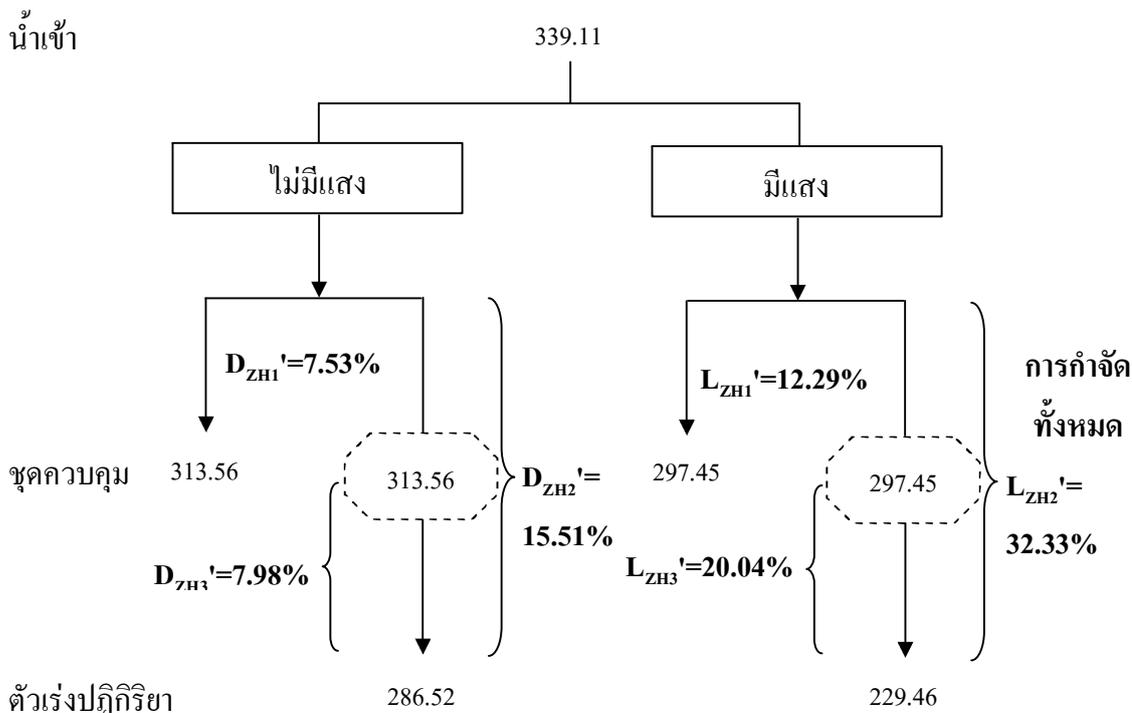
เมื่อนำค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยของการทดลองในส่วนที่ 2 ซึ่งทำการศึกษาผลของความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ในถังปฏิกรณ์แบบเบดซ์ซึ่ง ZnO อยู่ในรูปสารแขวนลอยเปรียบเทียบกับค่า  $C/C_0$  เฉลี่ยในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด



ภาพที่ 41 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที พิเศษน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (N=9)

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่ง ZnO ถูกตรึงอยู่บนผิวกระจก พบว่าค่า C/C<sub>0</sub> เฉลี่ย เมื่อใช้ ZnO ในรูปสารแขวนลอยมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีน้อยกว่าการใช้ ZnO ที่ถูกตรึงอยู่บนผิวกระจก เนื่องจาก ZnO ที่แขวนลอยจะทำให้เกิดการบังแสง อนุภาคของแสงจึงไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ที่ไอซีในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมก่อนและหลังผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ทั้ง 2 สภาวะนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี สามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 35 และภาพที่ 43 และค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 36 พบว่า การใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีมากที่สุด โดย C/C<sub>0</sub> เฉลี่ยเท่ากับ 0.67 ซึ่งมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ  $2.14 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที แต่เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีต่ำที่สุด โดย C/C<sub>0</sub> เฉลี่ยเท่ากับ 0.74 ซึ่งมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ  $1.59 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที ผลการทด



**ภาพที่ 42** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีในแต่ละขั้นตอน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (N=9)

ลองที่ได้สอดคล้องกับ Alex *et al.* (2003) ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซีระหว่างการใช้  $TiO_2$  เพียงอย่างเดียวและการใช้  $TiO_2$  ร่วมกับ  $H_2O_2$   $TiO_2$  ที่ใช้จะถูกนำไปเคลือบบนผิวกระจก พบว่าเมื่อใช้  $TiO_2$  เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% ซึ่งน้อยกว่าการใช้  $TiO_2$  ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีประสิทธิภาพเท่ากับ 83%

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมของการกำจัดที่ไอซีในที่มีแสงสูงกว่าในที่มีไม่มีแสงทั้งในสถานะที่ใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวและการใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  โดยในสถานะที่ใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวเกิดเนื่องจากในที่มีแสงมีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ซึ่งจำเป็นต้องใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อให้ได้  $OH^\cdot$  นำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่ในที่ที่ไม่มีแสงมีเพียงการดูดซับผิวถึงปฏิกิริยาและการดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นเท่านั้น ดังสมการที่ 1 และ 2 ส่วนในสถานะที่ใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ประสิทธิภาพในที่มีแสงสูงกว่าในที่มีไม่มีแสงเนื่องจากในที่มีแสงมีการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

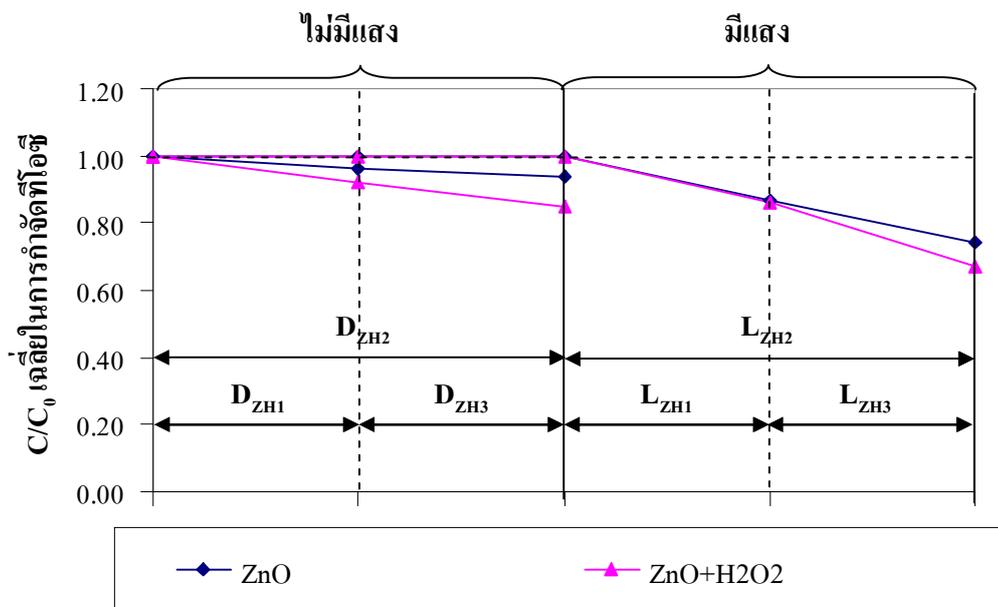
**ตารางที่ 35** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ (N=9)

ตัวอย่างน้ำ	ประสิทธิภาพการกำจัดที่ไอซี			
	ZnO (I=3157.5 $\mu W/cm^2$ , T=42°C)		ZnO + $H_2O_2$ (I=3233.3 $\mu W/cm^2$ , T=41.67°C)	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
น้ำเข้า	307.51	1.00	339.11	1.00
ชุดควบคุมในที่ที่ไม่มีแสง	298.08	0.97	313.56	0.92
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่ไม่มีแสง	291.35	0.94	286.52	0.85
ชุดควบคุมในที่ที่มีแสง	266.17	0.87	297.45	0.88
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่มีแสง	229.67	0.74	229.46	0.67

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี ZnO และ  $H_2O_2$  โดยไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางที่ 36** ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) ของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 15 มิลลิโมลาร์ (N=9)

ตัวอย่างน้ำ	$k_{ZnO}$	$k_{ZnO+H_2O_2}$
	(I=3157.5 $\mu W/cm^2$ , T=42°C)	(I=3233.3 $\mu W/cm^2$ , T=41.67°C)
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่ไม่มีแสง	$2.85 \times 10^{-5}$	$9.69 \times 10^{-5}$
น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วในที่ที่มีแสง	$1.59 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-4}$



**ภาพที่ 43** ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีของน้ำเสียจริง หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลา 30 นาที โดยกำหนดให้ พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตรและความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ (N=9)

ของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของ ZnO ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่ากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้โดยมีหรือไม่มีโฟตอน เมื่อมีโฟตอน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะแตกตัวให้ OH<sup>·</sup> แต่ถ้าไม่มีโฟตอน H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะแตกตัวให้ HO<sub>2</sub><sup>·</sup> ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ OH<sup>·</sup> ต่อไปจนได้ HO<sub>2</sub><sup>·</sup> และเมื่อ HO<sub>2</sub><sup>·</sup> เกิดการรวมตัวกันจะได้ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เพื่อใช้ในปฏิกิริยาต่อไป ดังสมการที่ 12, 13, 15 และ 18 ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะลิติกต้องใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิด OH<sup>·</sup> นำมาใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สำหรับในที่ที่ไม่มีแสง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในที่ที่มีแสง ซึ่งมีเพียงการดูดซับบนผิวถึงปฏิกิริยา การดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการออกซิเดชันของ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เท่านั้น OH<sup>·</sup> ที่เกิดขึ้นจึงมีจำนวนน้อยกว่าในที่ที่มีแสง

นอกจากนั้นยังพบอีกว่า การใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีสูงกว่าการใช้ ZnO เพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในส่วนแรก เนื่องจากการใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นกระบวนการที่นำการบำบัดโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> และรังสีอัลตรา

ไวโอเล็ตกับ ZnO มารวมกัน จึงมีแหล่งที่ทำให้เกิด  $\text{OH}^{\cdot}$  อยู่ 2 แหล่ง ได้แก่  $\text{H}_2\text{O}_2$  และ ZnO ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าการใช้ ZnO หรือ  $\text{H}_2\text{O}_2$  เพียงอย่างเดียว อุษาพร (2545) กล่าวว่าสามารถทำให้เกิด  $\text{OH}^{\cdot}$  และ  $\text{O}_2^{\cdot-}$  ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น อีกทั้ง  $\text{H}_2\text{O}_2$  ยังสามารถลดการเกิดรีคอมไบเนชัน ได้อีกด้วย (Evgenidou *et al.*, 2005) แต่จากภาพที่ 43 เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่โอซิระหว่างการใส่ ZnO เพียงอย่างเดียวและการใส่ ZnO ร่วมกับ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้น อาจไม่จำเป็นที่จะต้องใส่  $\text{H}_2\text{O}_2$  จึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมี

จากการศึกษาในส่วนนี้ ถึงปฏิกิริยาที่ใช้เป็นรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งสามารถที่จะนำค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบถึงปฏิกิริยามาคำนวณหาค่าคงที่สัมประสิทธิ์ความขรุขระ(n) ของแผ่นกระจกที่เคลือบด้วย ZnO ในสมการแมนนิง (Manning's equation) ได้เท่ากับ 15.92 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกทำการศึกษาเบื้องต้นของประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ส่วนที่สองทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์และส่วนสุดท้ายทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาเบื้องต้นของประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ของน้ำสังเคราะห์จากน้ำอัดลมเจือจาง 25% ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า ที่พีเอชประมาณ 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซี เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 41.82% และ 33.24% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซีต่ำสุดเฉลี่ย เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 29.85% และ 17.62% ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับที่พีเอช 12 ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซี เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 52.94% และ 37.08% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัดสีและทีโอซีต่ำสุดเฉลี่ย เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 36.47% และ 26.57% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่พีเอช 12 หรือพีเอชที่อยู่ในสภาวะต่าง กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่พีเอช 3 หรือพีเอชอยู่ในสภาวะกรด

2. ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 พีเอชเริ่มต้น พบว่า เมื่อพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้นด้วย โดยในการทดลองนี้ ประสิทธิภาพจะสูงสุดเฉลี่ยที่พีเอช 12

2.2 ปริมาณ ZnO เริ่มต้น พบว่า เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้นด้วย จนถึงปริมาณ ZnO 4 กรัม/ลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดเฉลี่ย หลังจากนั้น เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง

2.3 ความเข้มข้น  $H_2O_2$  เริ่มต้น พบว่า เมื่อความเข้มข้น  $H_2O_2$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดจะสูงขึ้นด้วย จนถึงความเข้มข้น  $H_2O_2$  15 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดเฉลี่ย หลังจากนั้น เมื่อความเข้มข้น  $H_2O_2$  เพิ่มขึ้นมากเกินไป ประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลง

3. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลมโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที โดยนำสถานะที่ดีที่สุดในการทดลองส่วนที่ 2 มาใช้ พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  มีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 32.33% และประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซีต่ำสุดเฉลี่ย เมื่อใช้ ZnO เพียงอย่างเดียวเท่ากับ 25.31%

### ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษานี้ ข้อจำกัดของประสิทธิภาพการกำจัดในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยการใช้แสงอาทิตย์ในแบบจำลองรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ถ้านำระบบนี้มาใช้ โดยไม่ทำการปรับปรุง ต้องใช้พื้นที่จำนวนมาก แต่ถ้าจะนำระบบนี้มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียเพียงระบบเดียว ในกรณีที่จะลดขนาดพื้นที่และต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ อาจจะต้องเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดอัลตราไวโอเล็ต

2. สัมประสิทธิ์ความขรุขระที่คำนวณได้สามารถนำไปใช้ในการทดลองอื่น ๆ ต่อไป เมื่อใช้ ZnO เคลือบบนผิวกระจก เมื่อใช้ ZnO ชนิดเดียวกัน

3. ศึกษาเพิ่มเติมถึงอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาวิธีการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิตติยศ ตั้งสัจจวงศ์. 2548. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟีนอลโดยใช้หลอดผลิตรังสี UV-A และ UV-C ในกระบวนการ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี.

กรมควบคุมมลพิษ. 2549. **Hydrogen peroxide**. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th>, 15 มิถุนายน 2549.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. ครั้งที่ 1. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ดวงกมล จิราโรจน์. 2546. การสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนตะกั่วด้วยวิธีโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชาญชัย อนันตปัญญสุทธิ. 2549. การบำบัดน้ำเสียสี้อมด้วยเครื่องปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรวิทย์ ปู่ฟ้า. 2544. กระบวนการบำบัดขั้นต้นโดย UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> สำหรับสารซักล้าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิไลวรรณ จันทร์มณี. 2548. การบำบัดสีและโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้ผงไททานเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- วุทธินันท์ ศิริพงษ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ลัดดา แสงสุวรรณถาวร. 2545. การกำจัดสีรีแอกทีฟเฟลโล 17 และสีรีแอกทีฟบลู 19 ด้วยกระบวนการ  
การโฟโตออกซิเดชัน โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัย  
เกษตรศาสตร์.
- สมชัย อัครทิวา. 2546. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์  
ท้อป, กรุงเทพฯ.
- อุษาพร เลิศวิบูล. 2545. การลดสีไอทีในน้ำเสียโรงงานไม้อัดแผ่นเรียบโดยกระบวนการโฟโต  
ออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Al-Ekani, H., G. Edwards, W. Holden, A. Safarazadeh-Amiri and J. Story. 1991. **Water  
treatment by heterogeneous photocatalysis.** Technomic Publishing Company, Inc.,  
Lancaster. อ้างถึง ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย  
โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Arena Network. 1995. **Photocatalytic oxidation.** Arena Network. Available Source:  
<http://www.arenanetwork.org>, 2008.
- Augugliaro, Vincenzo, Claudio Baiocchi, Alessandra Brianco Prevot, Elisa García-López,  
Vittorio Loddo, Sixto Malato, Giuseppe Marcí, Leonado Palmisano, Marco Pazzi and  
Edmondo Pramauro. 2002. Azo-dyes photocatalytic degradation in aqueous suspension  
of TiO<sub>2</sub> under solar irradiation. **Chemosphere** (49): 1223-1230.
- Azam, Aleboye and Aleboye Hamid. 2006. Effect of gap size and UV dosage on  
decolorization of C.I. Acid Orange 7 by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. **Journal of Hazardous  
Materials B 133** : 167-171.

- Behnajady, M.A., N. Modirshahla and M. Shokri. 2004. Photodestruction of acid orange 7 (AO7) in aqueous solutions by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: influence of operational parameters. **Chemosphere** (55): 129-134.
- Behnajady, M.A., N. Modirshahla and H. Fathi. 2006. Kinetics of decolourization of an azo dye in UV alone and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. **Journal of Hazardous Materials**
- Brezová, Vlasta, Alžbeta Blažková, Eva Borošová, Michal Čeppan and Radim Fiala. 1995. The influence of dissolved metal ions on the photocatalytic degradation of phenol in aqueous TiO<sub>2</sub> suspension. **Journal of Molecular Catalysis** (98): 109-116.
- Chen, Shifu and Gengyu Cao. 2006. Study on the photocatalytic oxidation of NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ions using TiO<sub>2</sub> beads as a photocatalyst. **Desalination** (194):
- Daneshvar, N., M. Rabbani, N. Modirshahla and M.A. Behnajady. 2005. Photooxidative degradation of Acid Red 27 in tubular continuous-flow photoreactor: Influence of operational parameters and mineralization products. **Journal of Hazardous Materials** 2005.
- Daneshvar, N., M. Rasoulifard, A.R. Khataee and F. Hosseinzadesh. 2006. Removal of C.I. Acid Orange 7 from aqueous by UV irradiation in the presence of ZnO nanopowder. **Journal of Hazardous Materials** 2006 (1):
- Evgenidou, E., K. Fytianos and I. Poullos. 2005. Semiconductor-sensitized photodegradation of dichlorvos in water using TiO<sub>2</sub> and ZnO as catalysts. **Applied Catalysis B: Environmental** (59): 81-89.
- H.C. Chan, Alex, Chak K. Chan, John P. Barford and John F. Porter. 2003. Solar photocatalytic thin film cascade reactor for treatment of benzoic acid containing wastewater. **Water Research** (37): 1125-1135.

- Health Administration. 1996. **Zinc Oxide**. Occupational safety and health guideline for zinc oxide. แหล่งที่มา: <http://www.osha.gov>, 30 พฤษภาคม 2006.
- Hincapié Pérez, Margarita, Gustavo Peñuela, Manuel I. Maldonado, Octavio Malato, Pilar Fernández-Ibáñez, Isabel Oller, Wolfgang Gernjak and Sixto Malato. 2006. Degradation of pesticides in water using solar advanced oxidation processes. **Applied Catalysis B: Environmental** (64): 272-281.
- Ince, N.H. and D.T. Gonenc. 1997. Treatability of a textile azo dye by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Environ Technol.** (18): 179-185. อ้างถึง ธรรมศักดิ์ โรจนวีรूपห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- K. Ray, Ajay and Antonie A.C.M. Beenackers. 1998. Development of a new photocatalytic reactor for water purification. **Catalysis Today** (40): 73-83.
- Kaniou, S., K. Pitarakis, I. Barlagianni and I. Poullos. 2005. Photocatalytic oxidation of sulfamethazine. **Chemosphere** (60): 372-380.
- Kansal, S.K., M. Singh and D. Sud. 2006. Studies on photodegradation of two commercial dyes in aqueous phase using different photocatalysts. **Journal of Hazardous Materials** (1):
- M., Seiss and Gahr A. Niessner R. 2001. Improved AOX degradation in UV oxidative wastewater treatment by dialysis with nanofiltration membrane. **Wat. Research** 35 (13): 3242-3248.
- Malato, Sixto, Julián Blanco, Alfonso Vidal and Christoph Richter. 2002. Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview. **Applied Catalysis B: Environmental**. (37): 1-15.

- Marion Carrier. 2006. Kinetics and reactional pathway of Imazapyr photocatalytic degradation: Influence of pH and metallic ions. **Applied Catalysis B** (65):
- Modirshahla, N. and M.A. Behnajady. 2006. Photooxidative degradation of Malachite Green (MG) by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of operationa parameters and kinetic modelingl. **Dyes and Pigments** (70):
- Mrowetz, Marta and Elena Selli. 2006. Photocatalytic degradation of formic and benzoic acids and hydrogen peroxide evolution in TiO<sub>2</sub> and ZnO water suspensions. **Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry** (180): 15-22.
- Muruganandham, M. and M. Swaminathan. 2004. Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. **Dyes and Pigments** (62): 269-275.
- Muruganandham, M., N. Shobana and M. Swaminathan. 2005. Optimization of solar photocatalytic degradation conditions of Reactive Yellow 14 azo dye in aqueous TiO<sub>2</sub>. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** (246): 153-160.
- Nishio, Junpei, Masahiro Tokumura, Hussein T.Znad and Yoshinori Kawase. 2006. Photocatalytic decolorization of azo-dye with ZnO powder in an external UV light irradiation slurry photoreactor. **Journal of Hazardous Materials** Occupational Safety & (12):
- Ollis, D.F. and E. Pelizzette and N. Serpone. 1991. **Environ. Sci. Techol.** 25(1523) อ้างถึง  
 ชรรมศักดิ์ โรจน์วีรุพท์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการ  
 โฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Oppenlander, Thomas. 2003. **Photochemical purification of water and air.** Wiley-VCH Verlag, Germany.

- Porges, R. and E.J. Struzeski. 1961. Wastes from the soft drink bottling industry, p. 331. *In Proceedings of 15th Industrial Waste Conference*. Purdue University.
- R.Domínguez, Joaquin, Jesús Beltrán and Oscar Rodríguez. 2005. Vis and UV photocatalytic detoxification methods (using  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{TiO}_2/\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ) for dyes treatment. *Catalysis Today* (101): 389-395.
- R-Can Environmental Inc. 2006. **Wavelength of radiation**. R-Can Environmental. Available Source: <http://www.r-can.com>, 2008.
- Serpone, N. and E. Pelizzette. 1989. **Photocatalysis: fundamentals and applications**. John Wiley and Sons, New York. อ้างอิง ธรรมชาติ โรจนวิรุพห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Tuprakay, Seree, Winai Liengcharernsit and Chatdanai Jiradecha. Immobilized  $\text{TiO}_2$  reaction rates for detoxification of aqueous  $\text{Cr}^{6+}$ . *J. Thai Environmental Engineering* : 1-7.
- Takeda, Kazuhiko and Kitao Fujiwara. 1996. Characteristics on the determination of dissolved organic nitrogen compounds in natural waters using titanium dioxide mediated photocatalytic degradation. *Wat.Res.* 30 (2): 323-330.
- US. Peroxide's Commercial Office. 2006. **Oxidation potential of oxidants**. Hydrogen peroxide online. Available Source: <http://www.H2O2.com>, 2008.
- Venkatadri, R. and R.W. Peters. 1993. Chemical oxidation technologies: ultraviolet light/hydrogen peroxide, fenton's reagent and titanium dioxide-assisted photocatalysis. *Hazardous Waste&Hazardous Materials*. 10(2): 107-149. อ้างอิง ธรรมชาติ โรจนวิรุพห์. 2549. การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Yang, C., Y.R. Xu, K.C. Teo, N.K. Goh, L.S. Chia and R.J. Xie. 2005. Destruction of organic pollutants in reuseable wastewater using advanced oxidation technology. **Chemosphere** (59): 441-445.

Z. Tang, Walter and Huren An. 1995. Photocatalytic degradation kinetics and mechanism of acid blue 40 by TiO<sub>2</sub>/UV in aqueous solution. **Chemosphere** 9 (31): 4171-4183.

Zhao, Juan and Xudong Yang. 2003. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. **Building and Environmental** (38): 645-654.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลอง

**ตารางผนวกที่ ก1** ลักษณะของน้ำตั้งเคราะห์จากน้ำอัดลมกระป๋อง

ครั้งที่	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	ทีดีเอส (มก./ล.)	สี	ทีโอซี (มก./ล.)
1	3.29	309.00	118048.00	1.75	37120.00
2	3.10	370.00	125376.00	2.06	41653.33
3	3.14	361.00	111216.00	1.56	39866.67
ค่าเฉลี่ย	3.18	346.67	118213.33	1.79	39546.67
SD	0.10	32.93	7081.45	0.25	2283.54
ค่าต่ำสุด	3.10	309.00	111216.00	1.56	37120.00
ค่าสูงสุด	3.29	370.00	125376.00	2.06	41653.33

**ตารางผนวกที่ ก2** ลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำอัดลม

ครั้งที่	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	ทีดีเอส (มก./ล.)	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	ทีโอซี (มก./ล.)
1	10.50	-	1018.00	600.00	794.88	-
2	11.65	1858.00	-	-	704.00	-
3	6.32	1046.00	1450.00	-	911.84	-
4	12.06	1239.00	2448.00	1200.00	1696.00	-
5	-	-	1684.00	850.50	915.38	-
6	-	-	-	-	2227.11	-
7	-	-	-	-	1800.00	-
8	-	-	-	-	1744.32	-
9	-	-	-	1035.00	1070.16	-
10	-	-	-	832.50	-	-
11	12.04	-	-	-	1984.00	-
12	11.97	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	1464.00	-
14	11.77	1436.00	-	1402.50	1620.48	-
15	-	-	-	-	1576.96	-
16	12.40	4590.00	-	1050.00	1351.68	-

## ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ครั้งที่	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	ทีดีเอส (มก./ล.)	บีโอดี (มก./ล.)	ซีโอดี (มก./ล.)	ทีไอซี (มก./ล.)
17	-	-	-	-	1100.00	-
18	10.93	1813.00	-	1605.00	-	-
19	9.15	-	-	-	1305.60	-
20	10.41	700.00	-	-	878.08	-
21	11.94	1503.00	-	-	1360.00	-
22	10.72	1200.00	-	-	1950.40	-
23	12.03	1700.00	-	-	768.00	-
24	11.06	1281.00	-	-	729.60	-
25	10.53	960.00	-	-	2200.00	-
26	-	-	-	-	1136.80	-
27	-	-	-	-	861.12	-
28	11.57	654.00	-	-	844.80	-
29	11.46	1246.00	-	-	1685.60	-
30	-	-	-	-	1152.00	-
31	-	-	-	-	882.00	-
32	-	-	-	-	1030.40	-
33	11.31	1078.00	-	-	902.40	-
34	-	-	-	-	960.00	-
35	7.83	718.00	-	-	413.60	-
36	11.88	1484.00	-	-	560.00	-
37	11.80	1253.00	-	-	1440.00	-
38	11.93	1356.00	-	-	1080.00	-
39	10.96	860.00	3412.00	-	2352.00	-
40	10.86	896.00	3328.00	-	1724.00	-
41	10.82	928.00	3212.00	-	2280.00	-
42	10.65	1281.00	3954.00	-	2720.00	-
43	10.71	1228.00	3954.00	-	2720.00	-
44	10.74	1315.00	2328.00	-	2480.00	-
45	11.29	1601.00	2440.00	-	200.00	-

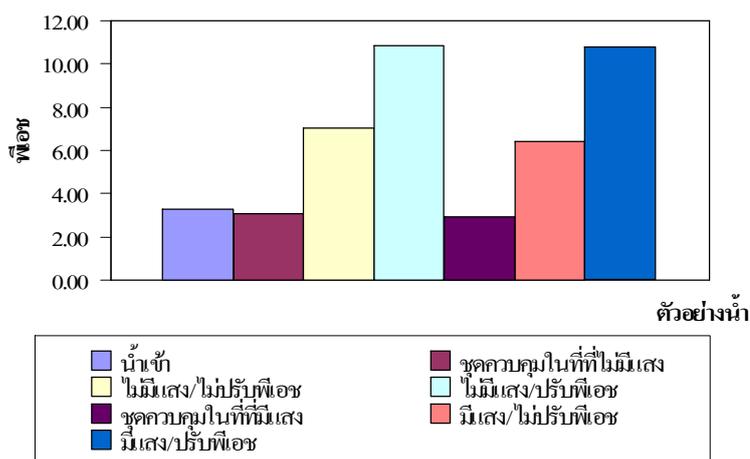
## ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ครั้งที่	พีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร)	ทีดีเอส (มก./ล.)	บีไอดี (มก./ล.)	ซีไอดี (มก./ ล.)	ทีไอซี (มก./ล.)
46	11.19	1670.00	2396.00	-	2000.00	-
47	11.82	1787.00	2400.00	-	2120.00	-
48	10.88	1340.00	2620.00	-	2040.00	-
49	10.71	1270.00	3896.00	-	2440.00	-
50	10.82	1250.00	3032.00	-	-	-
51	11.07	1218.00	3988.00	-	-	-
52	11.37	1694.00	2118.00	-	1018.00	267.07
53	11.36	1672.00	2080.00	-	1022.73	271.73
54	11.38	1650.00	2216.00	-	1021.00	270.00
55	9.45	810.00	2148.00	1230.00	-	319.07
56	10.39	800.00	1300.00	660.00	-	213.20
57	10.96	1305.00	2700.00	1530.00	-	390.27
58	10.54	1254.00	3772.00	1960.00	-	505.60
59	11.40	1395.00	1768.00	840.00	-	216.53
60	11.45	1693.00	2668.00	871.67	-	295.20
ค่าเฉลี่ย	10.98	1366.63	2628.08	1119.08	1413.04	305.41
SD	1.08	610.06	860.16	391.91	632.20	92.08
ค่าต่ำสุด	6.32	654.00	1018.00	600.00	200.00	213.20
ค่าสูงสุด	12.40	4590.00	3988.00	1960.00	2720.00	505.60

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลผลการทดลอง

**ตารางผนวกที่ ข1** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชุดควบคุม	ไม่ปรับพีเอช	ปรับพีเอช	ชุดควบคุม	ไม่ปรับพีเอช	ปรับพีเอช
1	3.29	3.08	7.46	10.79	2.94	6.27	10.67
2	3.29	3.08	6.52	10.77	2.94	5.92	10.76
3	3.29	3.08	7.05	10.93	2.94	6.95	10.89
ค่าเฉลี่ย	3.29	3.08	7.01	10.83	2.94	6.38	10.77
SD	0.00	0.00	0.47	0.09	0.00	0.52	0.11
ค่าต่ำสุด	3.29	3.08	6.52	10.77	2.94	5.92	10.67
ค่าสูงสุด	3.29	3.08	7.46	10.93	2.94	6.95	10.89

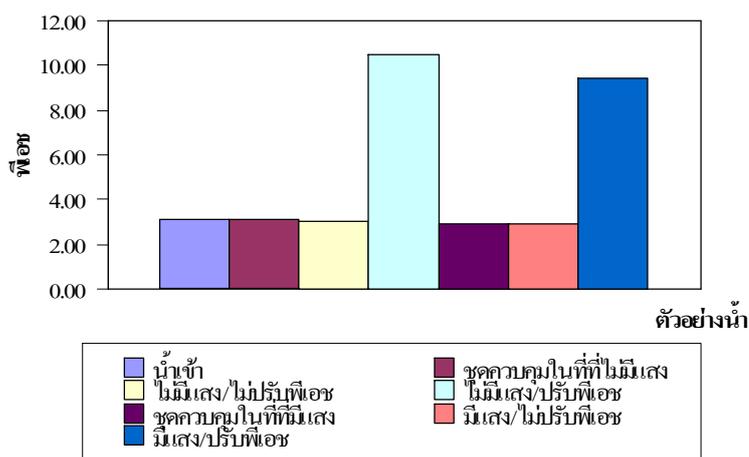


**ภาพผนวกที่ ข1** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม ZnO

**ตารางผนวกที่ ข2** การเปลี่ยนแปลงฟิโอสเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสง 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชุดควบคุม	ไม่ปรับฟิโอส	ปรับฟิโอส	ชุดควบคุม	ไม่ปรับฟิโอส	ปรับฟิโอส
1	3.10	3.12	3.00	10.53	2.87	2.99	9.69
2	3.10	3.12	3.03	10.43	2.87	2.84	9.55
3	3.10	3.12	3.01	10.51	2.87	2.79	9.04
ค่าเฉลี่ย	3.10	3.12	3.01	10.49	2.87	2.87	9.43
SD	0.00	0.00	0.02	0.05	0.00	0.10	0.34
ค่าต่ำสุด	3.10	3.12	3.00	10.43	2.87	2.79	9.04
ค่าสูงสุด	3.10	3.12	3.03	10.53	2.87	2.99	9.69

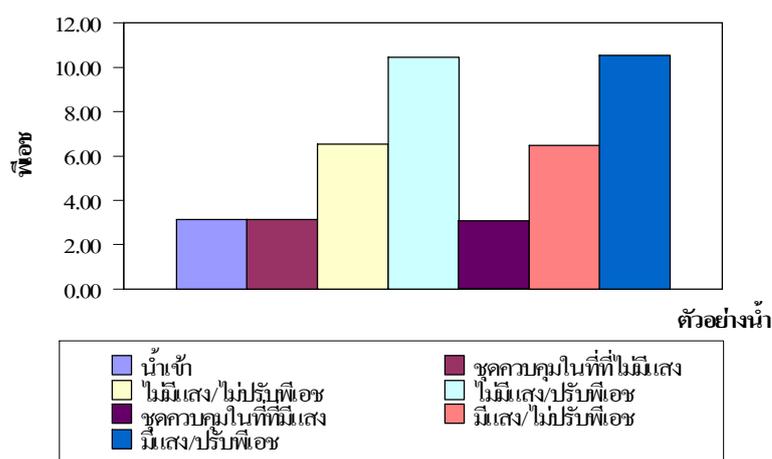


**ภาพผนวกที่ ข2** ฟิโอสหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์ของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีการเติม  $H_2O_2$

**ตารางผนวกที่ ข3** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชุดควบคุม	ไม่ปรับพีเอช	ปรับพีเอช	ชุดควบคุม	ไม่ปรับพีเอช	ปรับพีเอช
1	3.14	3.16	6.60	10.54	3.08	6.85	10.46
2	3.14	3.16	6.35	10.30	3.08	6.44	10.76
3	3.14	3.16	6.58	10.52	3.08	6.06	10.40
ค่าเฉลี่ย	3.14	3.16	6.51	10.45	3.08	6.45	10.54
SD	0.00	0.00	0.14	0.13	0.00	0.40	0.19
ค่าต่ำสุด	3.14	3.16	6.35	10.30	3.08	6.06	10.40
ค่าสูงสุด	3.14	3.16	6.60	10.54	3.08	6.85	10.76



**ภาพผนวกที่ ข3** พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO และ  $H_2O_2$  ของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มี การเติม ZnO และ  $H_2O_2$

**ตารางผนวกที่ ข4** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 °C

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		ไม่มีแสง				มีแสง			
		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชดควบคุม	
มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	
1	118048.00	121488.00	2.91	115392.00	119504.00	124288.00	5.29	118848.00	123056.00
2	118048.00	121488.00	2.91	117504.00	122640.00	124288.00	5.29	121232.00	121872.00
3	118048.00	121488.00	2.91	116928.00	115648.00	124288.00	5.29	120640.00	115344.00
ค่าเฉลี่ย	118048.00	121488.00	2.91	116608.00	119264.00	124288.00	5.29	120240.00	120090.67
SD	0.00	0.00	0.00	1091.76	3502.17	0.00	0.00	1241.32	4153.14
ค่าต่ำสุด	118048.00	121488.00	2.91	115392.00	115648.00	124288.00	5.29	118848.00	115344.00
ค่าสูงสุด	118048.00	121488.00	2.91	117504.00	122640.00	124288.00	5.29	121232.00	123056.00

**ตารางผนวกที่ ข5** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ที่มี H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารออกซิเดนต์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		ไม่มีแสง				มีแสง			
		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชดควบคุม	
มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	
1	125376.00	121328.00	0.00	121600.00	124576.00	121184.00	0.00	122448.00	124624.00
2	125376.00	121328.00	0.00	120080.00	88784.00	121184.00	0.00	118736.00	124800.00
3	125376.00	121328.00	0.00	120560.00	123472.00	121184.00	0.00	120656.00	120928.00
ค่าเฉลี่ย	125376.00	121328.00	0.00	120746.67	112277.33	121184.00	0.00	120613.33	123450.67
SD	0.00	0.00	0.00	777.00	20353.31	0.00	0.00	1856.37	2186.47
ค่าต่ำสุด	125376.00	121328.00	0.00	120080.00	88784.00	121184.00	0.00	118736.00	120928.00
ค่าสูงสุด	125376.00	121328.00	0.00	121600.00	124576.00	121184.00	0.00	122448.00	124800.00

**ตารางผนวกที่ ข6** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการทดลองโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก									
		ไม่มีแสง				มีแสง					
		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช	
		มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.		
1	111216.00	112128.00	0.82	110848.00	112896.00	118240.00	6.32	115152.00	118272.00		
2	111216.00	112128.00	0.82	112080.00	110992.00	118240.00	6.32	116170.00	122832.00		
3	111216.00	112128.00	0.82	114240.00	112880.00	118240.00	6.32	118496.00	121008.00		
ค่าเฉลี่ย	111216.00	112128.00	0.82	112389.33	112256.00	118240.00	6.32	116606.00	120704.00		
SD	0.00	0.00	0.00	1717.03	1094.69	0.00	0.00	1714.11	2295.15		
ค่าต่ำสุด	111216.00	112128.00	0.82	110848.00	110992.00	118240.00	6.32	115152.00	118272.00		
ค่าสูงสุด	111216.00	112128.00	0.82	114240.00	112896.00	118240.00	6.32	118496.00	122832.00		

**ตารางผนวกที่ ข7** ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก												
		ไม่มีแสง						มีแสง						
		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		
		Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	
1	1.75	1.00	1.73	0.99	1.50	0.85	1.51	0.86	1.70	0.97	1.20	0.69	1.17	0.64
2	1.75	1.00	1.73	0.99	1.49	0.85	1.54	0.88	1.70	0.97	1.28	0.73	1.11	0.64
3	1.75	1.00	1.73	0.99	1.52	0.87	1.56	0.89	1.70	0.97	1.21	0.69	1.11	0.63
ค่าเฉลี่ย	1.75	1.00	1.73	0.99	1.50	0.86	1.53	0.88	1.70	0.97	1.23	0.70	1.11	0.64
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00
ค่าต่ำสุด	1.75	1.00	1.73	0.99	1.49	0.85	1.51	0.86	1.70	0.97	1.20	0.69	1.11	0.63
ค่าสูงสุด	1.75	1.00	1.73	0.99	1.52	0.87	1.56	0.89	1.70	0.97	1.28	0.73	1.12	0.64

**ตารางผนวกที่ ข8** ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี  $H_2O_2$  เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก											
			ไม่มีแสง					ไม่มีแสง						
			ชุดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชุดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช	
Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	
1	2.06	1.00	1.79	0.87	1.71	0.83	1.28	0.62	1.51	0.74	1.27	0.62	1.00	0.49
2	2.06	1.00	1.79	0.87	1.60	0.78	1.32	0.64	1.51	0.74	1.29	0.63	1.26	0.61
3	2.06	1.00	1.79	0.87	1.74	0.85	1.28	0.62	1.51	0.74	1.29	0.62	1.24	0.60
ค่าเฉลี่ย	2.06	1.00	1.79	0.87	1.68	0.82	1.29	0.63	1.51	0.74	1.28	0.62	1.17	0.57
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.15	0.07
ค่าต่ำสุด	2.06	1.00	1.79	0.87	1.60	0.78	1.28	0.62	1.51	0.74	1.27	0.62	1.00	0.49
ค่าสูงสุด	2.06	1.00	1.79	0.87	1.74	0.85	1.32	0.64	1.51	0.74	1.29	0.63	1.26	0.61

**ตารางผนวกที่ ข9** ประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น  $H_2O_2$  ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก											
			ไม่มีแสง					ไม่มีแสง						
			ชุดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช		ชุดควบคุม		ไม่ปรับพีเอช		ปรับพีเอช	
Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	Abs.	C/C <sub>0</sub>	
1	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.08	0.69	1.12	0.71	0.94	0.60	0.76	0.49
2	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.13	0.72	1.12	0.71	0.88	0.56	0.69	0.44
3	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.07	0.68	1.12	0.71	0.91	0.58	0.77	0.49
ค่าเฉลี่ย	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.09	0.70	1.12	0.71	0.91	0.58	0.74	0.47
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02	0.04	0.03
ค่าต่ำสุด	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.07	0.68	1.12	0.71	0.88	0.56	0.69	0.44
ค่าสูงสุด	1.56	1.00	1.42	0.91	1.33	0.85	1.13	0.72	1.12	0.71	0.94	0.60	0.77	0.49

**ตารางผนวกที่ ข10** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มแสงเท่ากับ 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก											
			ไม่มีแสง						ปรับพีเอช					
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>						
1	37120.00	1.00	36659.64	0.99	32622.24	0.88	32077.56	0.86	35866.67	0.97	31760.54	0.86	29726.75	0.80
2	37120.00	1.00	36659.64	0.99	33839.14	0.91	33295.39	0.90	35866.67	0.97	32081.99	0.86	26206.10	0.71
3	37120.00	1.00	36659.64	0.99	36119.73	0.97	30525.10	0.82	35866.67	0.97	29399.79	0.79	25836.89	0.70
ค่าเฉลี่ย	37120.00	1.00	36659.64	0.99	34193.70	0.92	31966.02	0.86	35866.67	0.97	31080.77	0.84	27256.58	0.73
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	1775.50	0.05	1388.51	0.04	0.00	0.00	1464.62	0.04	2147.18	0.06
ค่าต่ำสุด	37120.00	1.00	36659.64	0.99	32622.24	0.88	30525.10	0.82	35866.67	0.97	29399.79	0.79	25836.89	0.70
ค่าสูงสุด	37120.00	1.00	36659.64	0.99	36119.73	0.97	33295.39	0.90	35866.67	0.97	32081.99	0.86	29726.75	0.80

**ตารางผนวกที่ ข11** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> เป็นสารออกซิแดนซ์ ที่ระยะเวลา 30 นาที ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3140 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส

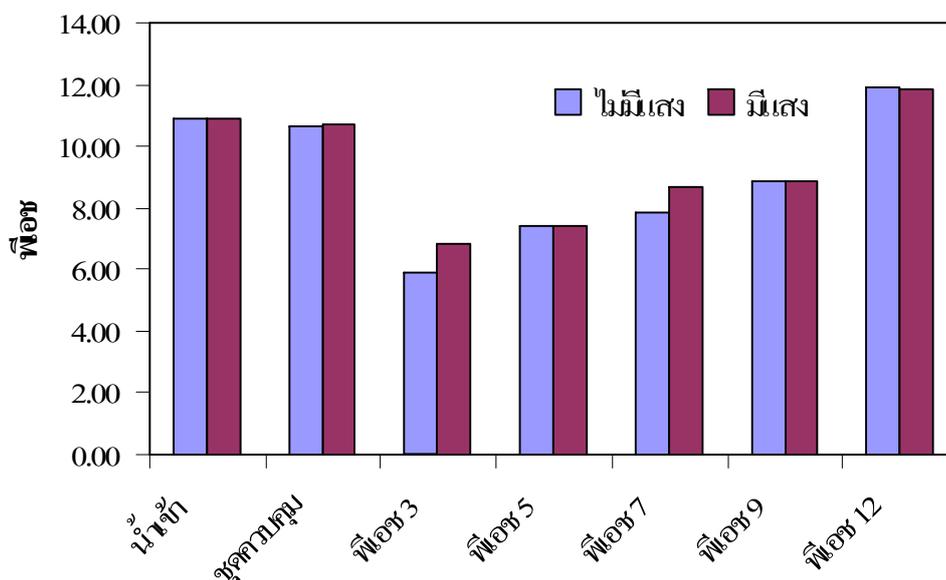
ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก											
			ไม่มีแสง						ปรับพีเอช					
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>						
1	41653.33	1.00	35607.87	0.85	36560.00	0.88	34717.88	0.83	32723.77	0.79	31871.01	0.77	32718.53	0.79
2	41653.33	1.00	35607.87	0.85	36800.00	0.88	31496.27	0.76	32723.77	0.79	33105.80	0.79	26241.60	0.63
3	41653.33	1.00	35607.87	0.85	34320.00	0.82	31573.33	0.76	32723.77	0.79	29157.33	0.70	27040.00	0.65
ค่าเฉลี่ย	41653.33	1.00	35607.87	0.85	35893.33	0.86	32595.83	0.78	32723.77	0.79	31378.05	0.75	28666.71	0.69
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	1367.82	0.03	1838.15	0.04	0.00	0.00	2019.87	0.05	3531.61	0.08
ค่าต่ำสุด	41653.33	1.00	35607.87	0.85	34320.00	0.82	31496.27	0.76	32723.77	0.79	29157.33	0.70	26241.60	0.63
ค่าสูงสุด	41653.33	1.00	35607.87	0.85	36800.00	0.88	34717.88	0.83	32723.77	0.79	33105.80	0.79	32718.53	0.79

**ตารางผนวกที่ ข12** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ใช้ 20 มิลลิโมลาร์ ความเข้มแสงเท่ากับ 3020 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก											
			ไม่มีแสง						ปรับพีเอช					
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>						
1	39866.67	1.00	36049.33	0.90	28809.81	0.72	28652.67	0.72	33921.03	0.85	28826.67	0.72	26728.86	0.67
2	39866.67	1.00	36049.33	0.90	32706.81	0.82	29892.54	0.75	33921.03	0.85	28305.36	0.71	24424.16	0.61
3	39866.67	1.00	36049.33	0.90	31732.02	0.80	28104.28	0.70	33921.03	0.85	24920.29	0.63	25116.00	0.63
ค่าเฉลี่ย	39866.67	1.00	36049.33	0.90	31082.88	0.78	28883.16	0.72	33921.03	0.85	27350.77	0.69	25423.01	0.64
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	2027.98	0.05	916.14	0.02	0.00	0.00	2120.94	0.05	1182.62	0.03
ค่าต่ำสุด	39866.67	1.00	36049.33	0.90	28809.81	0.72	28104.28	0.70	33921.03	0.85	24920.29	0.63	24424.16	0.61
ค่าสูงสุด	39866.67	1.00	36049.33	0.90	32706.81	0.82	29892.54	0.75	33921.03	0.85	28826.67	0.72	26728.86	0.67

**ตารางผนวกที่ ข13** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อ  
กระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะ  
เวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร

ครั้งที่	น้ำเข้า	พีเอชของน้ำออก											
		ไม่มีแสง (I = 0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T = 39°C)						มีแสง (I = 3360 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T = 42°C)					
		ชุดควบคุม	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12	ชุดควบคุม	pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
1	10.96	10.72	5.69	7.15	8.11	9.27	11.95	10.76	6.89	7.57	8.81	8.80	12.17
2	10.86	10.53	5.79	7.61	7.64	8.52	11.96	10.76	6.95	7.53	8.77	8.92	11.51
3	10.82	10.65	6.24	7.41	7.86	8.84	11.84	10.63	6.63	7.17	8.54	8.93	11.91
ค่าเฉลี่ย	10.88	10.63	5.91	7.39	7.87	8.88	11.92	10.72	6.82	7.42	8.71	8.88	11.86
SD	0.07	0.10	0.29	0.23	0.24	0.38	0.07	0.08	0.17	0.22	0.15	0.07	0.33
ค่าต่ำสุด	10.82	10.53	5.69	7.15	7.64	8.52	11.84	10.63	6.63	7.17	8.54	8.80	11.51
ค่าสูงสุด	10.96	10.72	6.24	7.61	8.11	9.27	11.96	10.76	6.95	7.57	8.81	8.93	12.17



**ภาพผนวกที่ ข4** พีเอชหลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

**ตารางผนวกที่ ข14** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก								
	น้ำเข้า	ชดควบคุม			pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	
1	3412.0	3354.0	0.0	2624.0	3346.0	2330.0	3208.0	2638.0	
2	3328.0	2796.0	0.0	3362.0	3280.0	2764.0	2778.0	2980.0	
3	3212.0	2084.0	0.0	2248.0	2152.0	1974.0	2098.0	2644.0	
ค่าเฉลี่ย	3317.3	2744.7	0.0	2744.7	2926.0	2356.0	2694.7	2754.0	
SD	100.4	636.6	0.0	566.7	671.1	395.6	559.7	195.7	
ค่าต่ำสุด	3212.0	2084.0	0.0	2248.0	2152.0	1974.0	2098.0	2638.0	
ค่าสูงสุด	3412.0	3354.0	0.0	3362.0	3346.0	2764.0	3208.0	2980.0	

(ก)

ครั้งที่	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก								
	น้ำเข้า	ชดควบคุม			pH 3	pH 5	pH 7	pH 9	pH 12
	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	
1	3412.0	4676.0	37.0	4508.0	4312.0	4492.0	4340.0	4798.0	
2	3328.0	5276.0	58.5	4796.0	4384.0	4480.0	4416.0	4988.0	
3	3212.0	4516.0	40.6	4732.0	4240.0	4468.0	4292.0	4924.0	
ค่าเฉลี่ย	3317.3	4822.7	45.4	4678.7	4312.0	4480.0	4349.3	4903.3	
SD	100.4	400.7	11.5	151.2	72.0	12.0	62.5	96.7	
ค่าต่ำสุด	3212.0	4516.0	37.0	4508.0	4240.0	4468.0	4292.0	4798.0	
ค่าสูงสุด	3412.0	5276.0	58.5	4796.0	4384.0	4492.0	4416.0	4988.0	

(ข)

**ตารางผนวกที่ ข15** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี หลังจากทำการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นต่อ  
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่  
ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 1.5 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง  
อุณหภูมิตั้งที่ 39 องศาเซลเซียส (ข) ที่มีแสง ความเข้มแสง 3360 ไมโครวัตต์/  
ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิตั้งที่ 42 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีโอดีของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		pH 3		pH 5		pH 7		pH 9		pH 12	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	2352.00	1.00	2075.30	0.88	2127.20	0.90	2109.90	0.90	2179.10	0.93	1781.30	0.76	1764.00	0.75
2	1724.80	1.00	1724.80	1.00	1729.41	1.00	1695.40	0.98	1496.50	0.87	1699.40	0.99	1547.20	0.90
3	2280.00	1.00	2243.20	0.98	2188.10	0.96	2188.10	0.96	2206.50	0.97	2206.50	0.97	2096.10	0.92
ค่าเฉลี่ย	2118.93	1.00	2014.43	0.96	2014.90	0.96	1997.80	0.95	1960.70	0.92	1895.73	0.90	1802.43	0.86
SD	343.22	1.00	264.51	0.06	249.11	0.05	264.79	0.04	402.24	0.05	272.23	0.13	276.46	0.09
ค่าต่ำสุด	1724.80	1.00	1724.80	0.88	1729.41	0.00	1695.40	0.90	1496.50	0.87	1699.40	0.76	1547.20	0.75
ค่าสูงสุด	2352.00	1.00	2243.20	1.00	2188.10	1.00	2188.10	0.98	2206.50	0.97	2206.50	0.99	2096.10	0.92

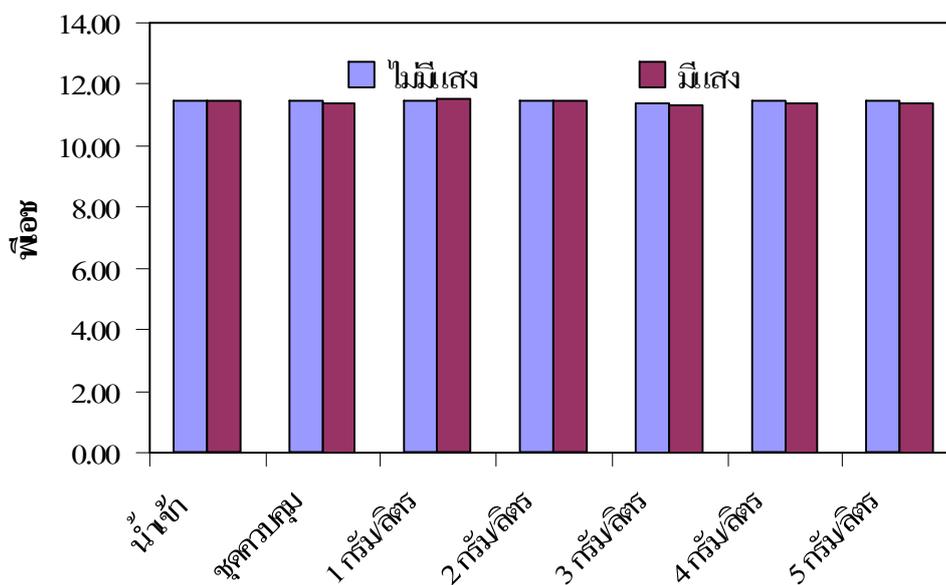
(ก)

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีโอดีของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		pH 3		pH 5		pH 7		pH 9		pH 12	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	2352.00	1.00	2121.67	0.90	2112.56	0.90	2252.00	0.96	2083.01	0.89	1916.80	0.81	1710.10	0.73
2	1724.80	1.00	1562.98	0.91	1585.60	0.92	1562.68	0.91	1532.44	0.89	1407.24	0.82	1115.79	0.65
3	2280.00	1.00	2163.24	0.95	1743.60	0.76	1961.28	0.86	1960.80	0.86	2001.00	0.88	1778.08	0.78
ค่าเฉลี่ย	2118.93	1.00	1949.30	0.92	1813.92	0.86	1925.32	0.91	1858.75	0.88	1775.01	0.84	1534.66	0.72
SD	343.22	1.00	335.21	0.03	270.43	0.08	346.06	0.05	289.12	0.02	321.27	0.04	364.34	0.07
ค่าต่ำสุด	1724.80	1.00	1562.98	0.90	1585.60	0.00	1562.68	0.86	1532.44	0.86	1407.24	0.81	1115.79	0.65
ค่าสูงสุด	2352.00	1.00	2163.24	0.95	2112.56	0.92	2252.00	0.96	2083.01	0.89	2001.00	0.88	1778.08	0.78

(ข)

**ตารางผนวกที่ ข16** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง

ครั้งที่	น้ำเข้า	พีเอชของน้ำออก											
		ไม่มีแสง (I = 0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T = 40°C)					มีแสง (I = 2930 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , T = 37°C)						
		ชุดควบคุม	1 g/l	2 g/l	3 g/l	4 g/l	5 g/l	ชุดควบคุม	1 g/l	2 g/l	3 g/l	4 g/l	5 g/l
1	11.29	11.45	11.51	11.42	11.35	11.46	11.54	11.40	11.55	11.34	11.10	11.38	11.45
2	11.19	11.12	11.16	11.16	11.10	11.10	11.16	11.11	11.45	11.38	11.42	11.11	11.38
3	11.82	11.79	11.78	11.76	11.73	11.74	11.67	11.60	11.49	11.58	11.39	11.59	11.39
ค่าเฉลี่ย	11.43	11.45	11.48	11.45	11.39	11.43	11.46	11.37	11.50	11.43	11.30	11.36	11.41
SD	0.34	0.34	0.31	0.30	0.32	0.32	0.27	0.25	0.05	0.13	0.18	0.24	0.04
ค่าต่ำสุด	11.19	11.12	11.16	11.16	11.10	11.10	11.16	11.11	11.45	11.34	11.10	11.11	11.38
ค่าสูงสุด	11.82	11.79	11.78	11.76	11.73	11.74	11.67	11.60	11.55	11.58	11.42	11.59	11.45



**ภาพผนวกที่ ข5** พีเอชหลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีกรเติม ZnO

**ตารางผนวกที่ ข17** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ข) ที่ที่มีแสง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		หุคควบคุม			1 กรัม/ลิตร	2 กรัม/ลิตร	3 กรัม/ลิตร	4 กรัม/ลิตร	5 กรัม/ลิตร
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
1	2440.0	2422.0	0.0	2350.0	2366.0	2282.0	2370.0	2488.0	
2	2396.0	1996.0	0.0	2000.0	1960.0	1992.0	2030.0	1960.0	
3	2448.0	2440.0	0.0	2392.0	2434.0	2320.0	2310.0	2318.0	
ค่าเฉลี่ย	2428.0	2286.0	0.0	2247.3	2253.3	2198.0	2236.7	2255.3	
SD	28.0	251.3	0.0	215.2	256.3	179.4	181.5	269.5	
ค่าต่ำสุด	2396.0	1996.0	0.0	2000.0	1960.0	1992.0	2030.0	1960.0	
ค่าสูงสุด	2448.0	2440.0	0.0	2392.0	2434.0	2320.0	2370.0	2488.0	

(ก)

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		หุคควบคุม			1 กรัม/ลิตร	2 กรัม/ลิตร	3 กรัม/ลิตร	4 กรัม/ลิตร	5 กรัม/ลิตร
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
1	2440.0	2796.0	14.6	2832.0	2860.0	604.0	2660.0	2760.0	
2	2396.0	3236.0	35.1	2576.0	2732.0	2660.0	2524.0	2700.0	
3	2448.0	3512.0	46.3	2948.0	2252.0	1204.0	2620.0	2954.0	
ค่าเฉลี่ย	2428.0	3181.3	32.0	2785.3	2614.7	1489.3	2601.3	2804.7	
SD	28.0	361.1	16.1	190.3	320.5	1057.3	69.9	132.8	
ค่าต่ำสุด	2396.0	2796.0	14.6	2576.0	2252.0	604.0	2524.0	2700.0	
ค่าสูงสุด	2448.0	3512.0	46.3	2948.0	2860.0	2660.0	2660.0	2954.0	

(ข)

**ตารางผนวกที่ ข18** ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี หลังจากทำการศึกษาผลของปริมาณ ZnO เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (ข) ที่มีแสง ความเข้มแสง 2930 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีโอดีของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		1 กรัม/ลิตร		2 กรัม/ลิตร		3 กรัม/ลิตร		4 กรัม/ลิตร		5 กรัม/ลิตร	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	2000.00	1.00	1996.30	1.00	1994.40	1.00	1890.90	0.95	1883.50	0.94	1907.20	0.95	1956.47	0.98
2	2000.00	1.00	1882.40	0.94	1960.80	0.98	1902.00	0.95	1902.00	0.95	1921.60	0.96	1843.10	0.92
3	2120.00	1.00	2027.90	0.96	1981.00	0.93	1928.90	0.91	1911.50	0.90	1772.50	0.84	1876.70	0.89
ค่าเฉลี่ย	2040.00	1.00	1968.87	0.97	1978.73	0.97	1907.27	0.94	1899.00	0.93	1867.10	0.92	1892.09	0.93
SD	69.28	1.00	76.53	0.03	16.91	0.03	19.54	0.02	14.24	0.03	82.24	0.07	58.23	0.05
ค่าต่ำสุด	2000.00	1.00	1882.40	0.94	1960.80	0.00	1890.90	0.91	1883.50	0.90	1772.50	0.84	1843.10	0.89
ค่าสูงสุด	2120.00	1.00	2027.90	1.00	1994.40	1.00	1928.90	0.95	1911.50	0.95	1921.60	0.96	1956.47	0.98

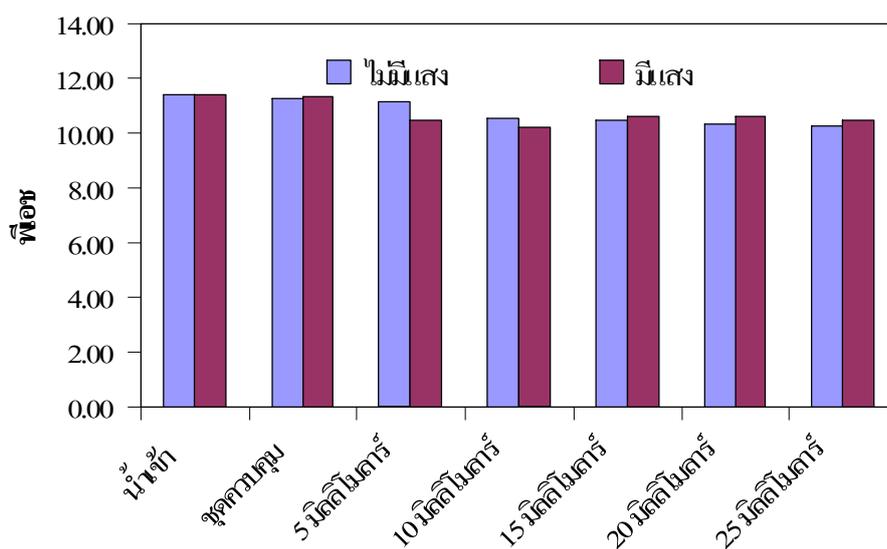
(ก)

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีโอดีของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		1 กรัม/ลิตร		2 กรัม/ลิตร		3 กรัม/ลิตร		4 กรัม/ลิตร		5 กรัม/ลิตร	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	2000.00	1.00	1856.07	0.93	1745.84	0.87	1688.84	0.84	1800.00	0.90	1447.38	0.72	1702.95	0.85
2	2000.00	1.00	1934.75	0.97	1888.52	0.94	1619.80	0.81	1674.10	0.84	1548.03	0.77	1679.67	0.84
3	2120.00	1.00	1934.16	0.91	1844.00	0.87	1960.00	0.92	1800.00	0.85	1432.62	0.68	1641.78	0.77
ค่าเฉลี่ย	2040.00	1.00	1908.33	0.94	1826.12	0.90	1756.21	0.86	1758.03	0.86	1476.01	0.72	1674.80	0.82
SD	69.28	1.00	45.26	0.03	73.01	0.04	179.83	0.06	72.69	0.03	62.81	0.05	30.87	0.04
ค่าต่ำสุด	2000.00	1.00	1856.07	0.91	1745.84	0.00	1619.80	0.81	1674.10	0.84	1432.62	0.68	1641.78	0.77
ค่าสูงสุด	2120.00	1.00	1934.75	0.97	1888.52	0.94	1960.00	0.92	1800.00	0.90	1548.03	0.77	1702.95	0.85

(ข)

**ตารางผนวกที่ ข19** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร

ครั้งที่	น้ำเข้า	พีเอชของน้ำออก											
		ไม่มีแสง (I = 0 $\mu W/cm^2$ , T = 45°C)					มีแสง (I = 2980 $\mu W/cm^2$ , T = 40°C)						
		ชุดควบคุม	5	10	15	20	25	ชุดควบคุม	5	10	15	20	25
	mM	mM	mM	mM	mM		mM	mM	mM	mM	mM		
1	11.37	11.30	10.70	10.41	10.35	10.23	10.13	11.38	10.39	10.03	10.87	10.74	10.70
2	11.36	11.30	11.76	10.60	10.52	10.39	10.31	11.38	10.39	10.16	10.70	10.84	10.60
3	11.38	11.31	10.91	10.63	10.57	10.42	10.36	11.31	10.59	10.37	10.19	10.16	10.08
ค่าเฉลี่ย	11.37	11.30	11.12	10.55	10.48	10.35	10.27	11.36	10.46	10.19	10.59	10.58	10.46
SD	0.01	0.01	0.56	0.12	0.12	0.10	0.12	0.04	0.12	0.17	0.35	0.37	0.33
ค่าต่ำสุด	11.36	11.30	10.70	10.41	10.35	10.23	10.13	11.31	10.39	10.03	10.19	10.16	10.08
ค่าสูงสุด	11.38	11.31	11.76	10.63	10.57	10.42	10.36	11.38	10.59	10.37	10.87	10.84	10.70



**ภาพผนวกที่ ข6** พีเอชหลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้า และน้ำออก ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่มีเติม ZnO

**ตารางผนวกที่ ข20** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที พีเอชน้ำเสียจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) ที่มีแสง ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		หาคควบคุม			5 mM	10 mM	15 mM	20 mM	25 mM
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
1	2188.0	2196.0	0.4	2124.0	2068.0	2160.0	2240.0	2072.0	
2	2080.0	2104.0	1.2	2168.0	1988.0	1984.0	2260.0	2292.0	
3	2216.0	2212.0	0.0	2220.0	2160.0	2232.0	2292.0	2216.0	
ค่าเฉลี่ย	2161.3	2170.7	0.5	2170.7	2072.0	2125.3	2264.0	2193.0	
SD	71.8	58.3	0.6	48.1	86.1	127.6	26.2	111.7	
ค่าต่ำสุด	2080.0	2104.0	0.0	2124.0	1988.0	1984.0	2240.0	2072.0	
ค่าสูงสุด	2216.0	2212.0	1.2	2220.0	2160.0	2232.0	2292.0	2292.0	

(ก)

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก							
		หาคควบคุม			5 mM	10 mM	15 mM	20 mM	25 mM
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.
1	2188.0	2240.0	2.4	2096.0	2144.0	2254.0	2186.0	2168.0	
2	2080.0	2232.0	7.3	2110.0	2190.0	2142.0	2170.0	2084.0	
3	2216.0	2678.0	20.9	2408.0	2340.0	2508.0	2662.0	2706.0	
ค่าเฉลี่ย	2161.3	2383.3	10.2	2204.7	2224.7	2301.3	2339.3	2319.3	
SD	71.8	255.2	9.6	176.2	102.5	187.5	279.6	337.5	
ค่าต่ำสุด	2080.0	2232.0	2.4	2096.0	2144.0	2142.0	2170.0	2084.0	
ค่าสูงสุด	2216.0	2678	20.9	2408.0	2340.0	2508.0	2662.0	2706.0	

(ข)

ตารางผนวกที่ ข21 ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  เริ่มต้นต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน โดยมี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ระยะเวลา 30 นาที ที่เขื่อนน้ำเสียวจริง ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร (ก) ในที่ที่ไม่มีแสง อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ข) ที่มีแสง ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีไอคีนของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		5 mM		10 mM		15 mM		20 mM		25 mM	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	1018.00	1.00	802.56	0.79	862.53	0.85	876.53	0.86	889.18	0.87	875.71	0.86	897.52	0.88
2	1022.73	1.00	934.36	0.91	895.56	0.88	911.75	0.89	898.84	0.88	860.57	0.84	862.19	0.84
3	1021.00	1.00	966.55	0.95	934.95	0.92	857.15	0.84	895.75	0.88	889.40	0.87	893.45	0.88
ค่าเฉลี่ย	1020.58	1.00	901.16	0.88	897.68	0.88	881.81	0.86	894.59	0.88	875.23	0.86	884.39	0.87
SD	2.39	0.00	86.89	0.08	36.26	0.03	27.68	0.03	4.93	0.00	14.42	0.02	19.33	0.02
ค่าต่ำสุด	1018.00	1.00	802.56	0.79	862.53	0.80	857.15	0.84	889.18	0.87	860.57	0.84	862.19	0.84
ค่าสูงสุด	1022.73	1.00	966.55	0.95	934.95	0.92	911.75	0.89	898.84	0.88	889.40	0.87	897.52	0.88

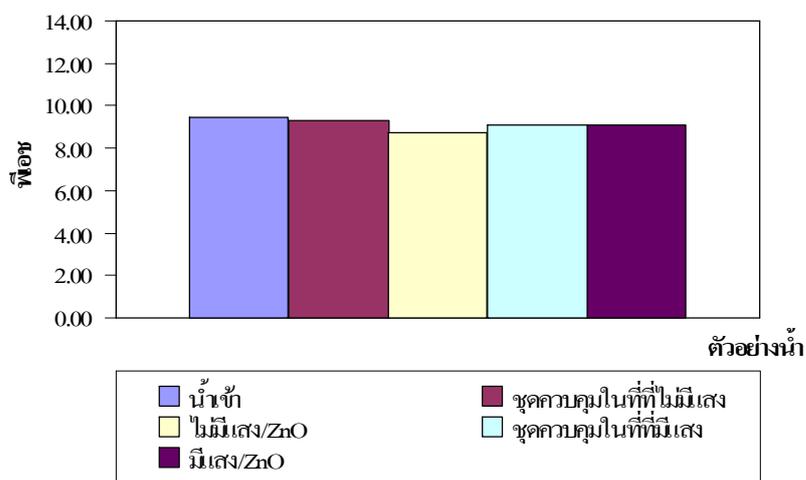
(ก)

ครั้งที่	น้ำเข้า		ซีไอคีนของน้ำออก											
			ชุดควบคุม		5 mM		10 mM		15 mM		20 mM		25 mM	
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>
1	1018.00	1.00	920.12	0.90	866.67	0.85	812.00	0.80	802.56	0.79	908.67	0.89	930.00	0.91
2	1022.73	1.00	938.89	0.92	857.51	0.84	856.37	0.84	836.02	0.82	900.73	0.88	917.49	0.90
3	1021.00	1.00	828.65	0.81	846.13	0.83	763.27	0.75	671.95	0.66	757.95	0.74	732.06	0.72
ค่าเฉลี่ย	1020.58	1.00	895.89	0.88	856.77	0.84	810.55	0.79	770.18	0.75	855.78	0.84	859.85	0.84
SD	2.39	0.00	58.98	0.06	10.29	0.01	46.57	0.04	86.70	0.08	84.82	0.08	110.85	0.11
ค่าต่ำสุด	1018.00	1.00	828.65	0.81	846.13	0.80	763.27	0.75	671.95	0.66	757.95	0.74	732.06	0.72
ค่าสูงสุด	1022.73	1.00	938.89	0.92	866.67	0.85	856.37	0.84	836.02	0.82	908.67	0.89	930.00	0.91

(ข)

**ตารางผนวกที่ ข22** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ไม่มีแสง		มีแสง	
		ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	9.45	9.33	8.83	9.09	9.12
2	9.45	9.33	8.72	9.09	9.16
3	9.45	9.33	8.66	9.09	9.04
ค่าเฉลี่ย	9.45	9.33	8.74	9.09	9.11
SD	0.00	0.00	0.09	0.00	0.06
ค่าต่ำสุด	9.45	9.33	8.66	9.09	9.04
ค่าสูงสุด	9.45	9.33	8.83	9.09	9.16



**ภาพผนวกที่ ข7** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข23** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตาราง เซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชดควบคุม		ZnO	ชดควบคุม		ZnO
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%
1	2148.00	2056.00	0.00	2132.00	2460.00	14.53	2460.00
2	2148.00	2056.00	0.00	1948.00	2460.00	14.53	2520.00
3	2148.00	2056.00	0.00	2584.00	2460.00	14.53	2576.00
ค่าเฉลี่ย	2148.00	2056.00	0.00	2221.33	2460.00	14.53	2518.67
SD	0.00	0.00	0.00	327.28	0.00	0.00	58.01
ค่าต่ำสุด	2148.00	2056.00	0.00	1948.00	2460.00	14.53	2460.00
ค่าสูงสุด	2148.00	2056.00	0.00	2584.00	2460.00	14.53	2576.00

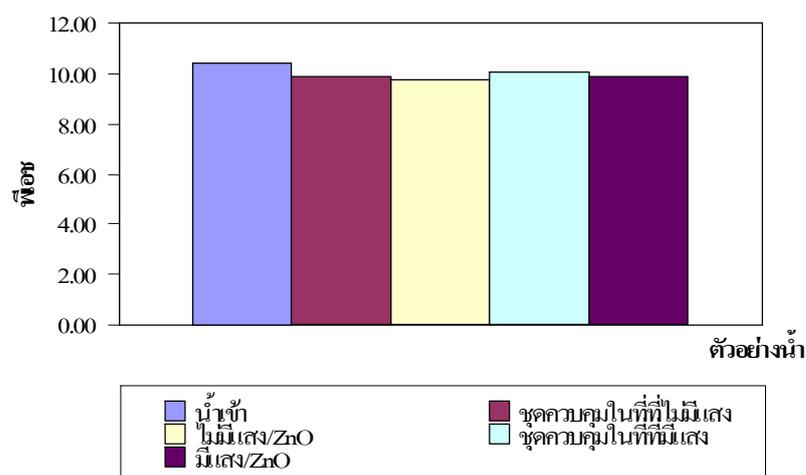
**ตารางผนวกที่ ข24** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3240 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	319.07	1.00	310.93	0.97	313.60	0.98	294.97	0.92	281.74	0.88
2	319.07	1.00	310.93	0.97	318.80	1.00	294.97	0.92	264.08	0.83
3	319.07	1.00	310.93	0.97	306.20	0.96	294.97	0.92	268.94	0.84
ค่าเฉลี่ย	319.07	1.00	310.93	0.97	312.87	0.98	294.97	0.92	271.59	0.85
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	6.33	0.02	0.00	0.00	9.12	0.03
ค่าต่ำสุด	319.07	1.00	310.93	0.97	306.20	0.96	294.97	0.92	264.08	0.83
ค่าสูงสุด	319.07	1.00	310.93	0.97	318.80	1.00	294.97	0.92	281.74	0.88

หมายเหตุ เลือกการทดลองครั้งที่ 3 ในการนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย

**ตารางผนวกที่ ข25** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ไม่มีแสง		มีแสง	
		ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	10.39	9.86	9.68	10.04	10.00
2	10.39	9.86	9.73	10.04	9.62
3	10.39	9.86	9.81	10.04	10.00
ค่าเฉลี่ย	10.39	9.86	9.74	10.04	9.87
SD	0.00	0.00	0.07	0.00	0.22
ค่าต่ำสุด	10.39	9.86	9.68	10.04	9.62
ค่าสูงสุด	10.39	9.86	9.81	10.04	10.00



**ภาพผนวกที่ ข8** พีเอชหลังจากผ่าน โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข26** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชดควบคุม		ZnO	ชดควบคุม		ZnO
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%
1	1300.00	1192.00	0.00	1372.00	1720.00	32.31	1604.00
2	1300.00	1192.00	0.00	1384.00	1720.00	32.31	1772.00
3	1300.00	1192.00	0.00	1452.00	1720.00	32.31	1404.00
ค่าเฉลี่ย	1300.00	1192.00	0.00	1402.67	1720.00	32.31	1593.00
SD	0.00	0.00	0.00	43.14	0.00	0.00	184.23
ค่าต่ำสุด	1300.00	1192.00	0.00	1372.00	1720.00	32.31	1404.00
ค่าสูงสุด	1300.00	1192.00	0.00	1452.00	1720.00	32.31	1772.00

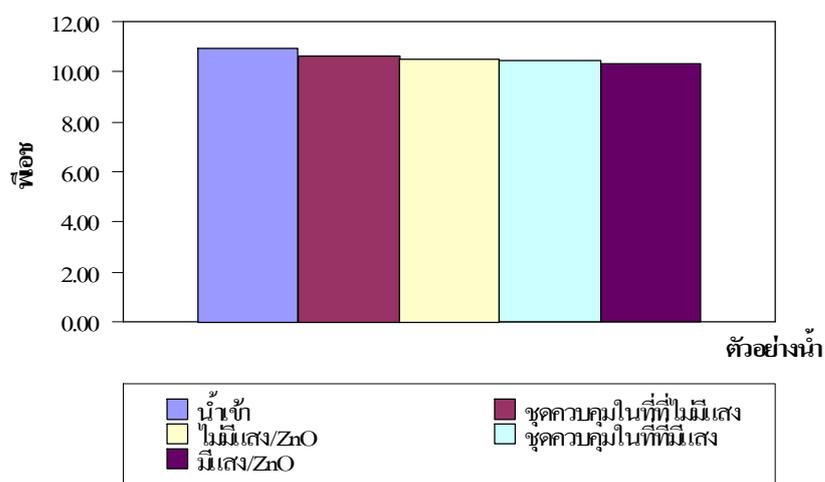
**ตารางผนวกที่ ข27** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 2980 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	213.20	1.00	196.93	0.92	192.33	0.90	190.75	0.89	143.42	0.67
2	213.20	1.00	196.93	0.92	212.50	1.00	190.75	0.89	150.91	0.71
3	213.20	1.00	196.93	0.92	188.51	0.88	190.75	0.89	148.11	0.69
ค่าเฉลี่ย	213.20	1.00	196.93	0.92	197.78	0.93	190.75	0.89	147.48	0.69
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	12.89	0.06	0.00	0.00	3.78	0.02
ค่าต่ำสุด	213.20	1.00	196.93	0.92	188.51	0.88	190.75	0.89	143.42	0.67
ค่าสูงสุด	213.20	1.00	196.93	0.92	212.50	1.00	190.75	0.89	150.91	0.71

**หมายเหตุ** เลือกการทดลองครั้งที่ 1 และ 3 ในการนำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย

**ตารางผนวกที่ ข28** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ไม่มีแสง		มีแสง	
		ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	10.96	10.64	10.41	10.46	10.27
2	10.96	10.64	10.85	10.46	10.49
3	10.96	10.64	10.31	10.46	10.20
ค่าเฉลี่ย	10.96	10.64	10.52	10.46	10.32
SD	0.00	0.00	0.29	0.00	0.15
ค่าต่ำสุด	10.96	10.64	10.31	10.46	10.20
ค่าสูงสุด	10.96	10.64	10.85	10.46	10.49



**ภาพผนวกที่ ข9** พีเอชหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข29** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

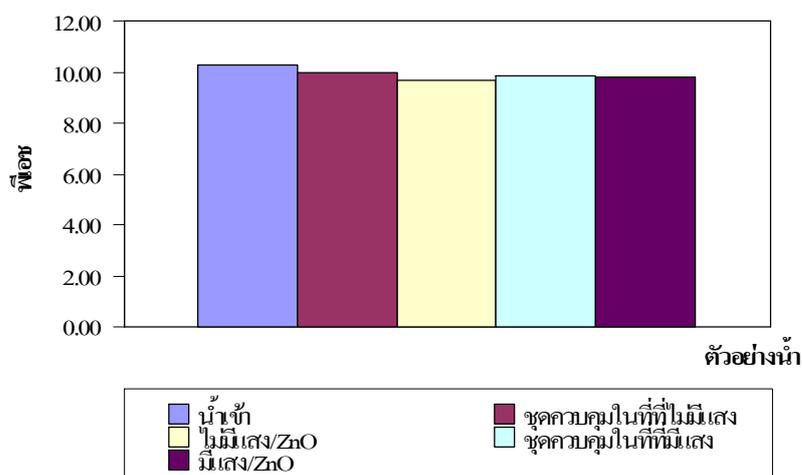
ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชุดควบคุม		ZnO	ชุดควบคุม		ZnO
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%
1	2700.00	2512.00	0.00	2608.00	3492.00	29.33	3528.00
2	2700.00	2512.00	0.00	2612.00	3492.00	29.33	3092.00
3	2700.00	2512.00	0.00	2672.00	3942.00	29.33	3236.00
ค่าเฉลี่ย	2700.00	2512.00	0.00	2630.67	3942.00	29.33	3285.33
SD	0.00	0.00	0.00	35.85	0.00	0.00	222.15
ค่าต่ำสุด	2700.00	2512.00	0.00	2608.00	3942.00	29.33	3092.00
ค่าสูงสุด	2700.00	2512.00	0.00	2672.00	3942.00	29.33	3528.00

**ตารางผนวกที่ ข30** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3280 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO
1	390.27	1.00	386.39	0.99	370.88	0.95	312.79	0.80	264.70	0.68
2	390.27	1.00	386.39	0.99	389.47	1.00	312.79	0.80	265.16	0.68
3	390.27	1.00	386.39	0.99	384.00	0.98	312.79	0.80	283.89	0.73
ค่าเฉลี่ย	390.27	1.00	386.39	0.99	381.45	0.98	312.79	0.80	271.25	0.70
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	9.55	0.02	0.00	0.00	10.95	0.03
ค่าต่ำสุด	390.27	1.00	386.39	0.99	370.88	0.95	312.79	0.80	264.70	0.68
ค่าสูงสุด	390.27	1.00	386.39	0.99	389.47	1.00	312.79	0.80	283.89	0.73

**ตารางผนวกที่ ข31** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำออก			
		ไม่มีแสง		มีแสง	
		ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	9.45	9.33	8.74	9.09	9.11
2	10.39	9.86	9.74	10.04	9.87
3	10.96	10.64	10.52	10.46	10.32
ค่าเฉลี่ย	10.27	9.94	9.67	9.86	9.77
SD	0.76	0.66	0.90	0.70	0.61
ค่าต่ำสุด	9.45	9.33	8.74	9.09	9.11
ค่าสูงสุด	10.96	10.64	10.52	10.46	10.32



**ภาพผนวกที่ ข10** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข32** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

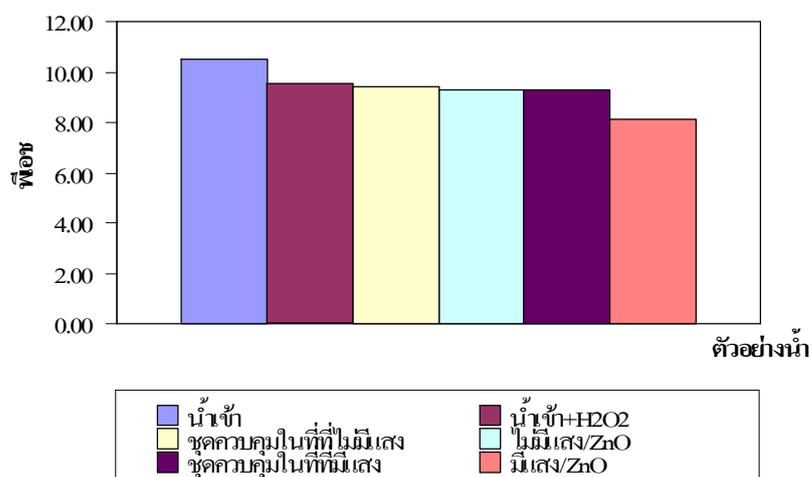
ครั้งที่	น้ำเข้า	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
		ไม่มีแสง			มีแสง		
		ชุดควบคุม		ZnO	ชุดควบคุม		ZnO
		มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%
1	2148.00	2056.00	0.00	2221.33	2460.00	14.53	2518.67
2	1300.00	1192.00	0.00	1402.67	1720.00	32.31	1593.33
3	2700.00	2512.00	0.00	2630.67	3942.00	29.33	3285.33
ค่าเฉลี่ย	2049.33	1920.00	0.00	2084.89	2557.33	25.39	2465.78
SD	705.20	670.43	0.00	625.27	890.00	9.52	847.24
ค่าต่ำสุด	1300.00	1192.00	0.00	1402.67	1720.00	14.53	1593.33
ค่าสูงสุด	2700.00	2512.00	0.00	2630.67	3942.00	32.31	3285.33

**ตารางผนวกที่ ข33** ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3166.67 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำออก							
			ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO
1	319.07	1.00	310.93	0.97	306.20	0.96	294.97	0.92	268.94	0.84
2	213.20	1.00	196.93	0.92	190.42	0.89	190.75	0.89	145.77	0.68
3	390.27	1.00	386.39	0.99	377.44	0.97	312.79	0.80	274.30	0.71
ค่าเฉลี่ย	307.51	1.00	298.09	0.96	291.35	0.94	266.17	0.87	229.67	0.74
SD	89.10	0.00	95.38	0.03	92.81	0.03	65.92	0.06	71.56	0.09
ค่าต่ำสุด	213.20	1.00	196.93	0.92	197.78	0.93	190.75	0.80	147.48	0.69
ค่าสูงสุด	390.27	1.00	386.39	0.99	381.45	0.98	312.79	0.92	271.59	0.85

**ตารางผนวกที่ ข34** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + $H_2O_2$	น้ำออก			
			ไม่มีแสง		มีแสง	
			ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	10.54	9.52	9.42	9.23	9.32	8.18
2	10.54	9.52	9.42	9.22	9.32	8.07
3	10.54	9.52	9.42	9.42	9.32	8.16
ค่าเฉลี่ย	10.54	9.52	9.42	9.29	9.32	8.14
SD	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.06
ค่าต่ำสุด	10.54	9.52	9.42	9.22	9.32	8.07
ค่าสูงสุด	10.54	9.52	9.42	9.42	9.32	8.18



**ภาพผนวกที่ ข11** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข35** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

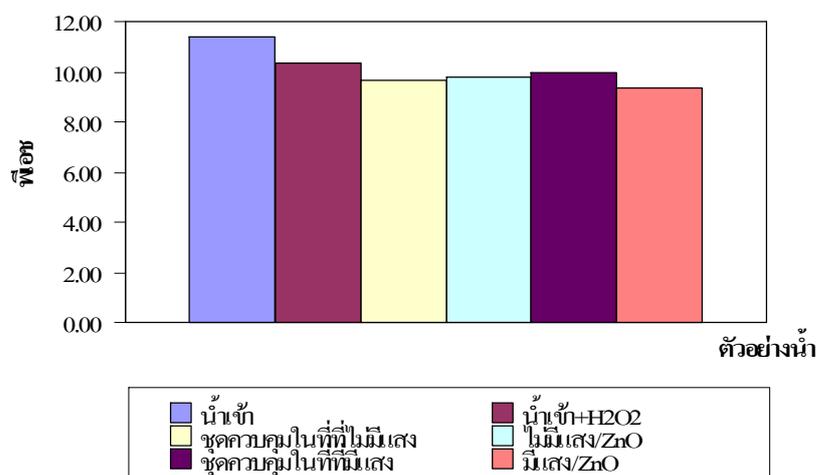
ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
			ไม่มีแสง			มีแสง		
			ชดควบคุม		ZnO	ชดควบคุม		ZnO
			มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.
1	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3892.00	4232.00	14.38	3936.00
2	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3996.00	4232.00	14.38	4304.00
3	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3732.00	4232.00	14.38	4424.00
ค่าเฉลี่ย	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3873.33	4232.00	14.38	4221.33
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	132.99	0.00	0.00	254.29
ค่าต่ำสุด	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3732.00	4232.00	14.38	3936.00
ค่าสูงสุด	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3996.00	4232.00	14.38	4424.00

**ตารางผนวกที่ ข36** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3310 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 1)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำเข้า+ $H_2O_2$		น้ำออก							
					ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	$C/C_0$	มก./ล.	$C/C_0$	ซุดควบคุม		ZnO		ซุดควบคุม		ZnO	
1	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	371.18	0.73	467.60	0.92	389.42	0.77
2	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	414.07	0.82	467.60	0.92	356.56	0.71
3	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	404.00	0.80	467.60	0.92	399.54	0.79
ค่าเฉลี่ย	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	396.41	0.78	467.60	0.92	381.84	0.76
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.43	0.04	0.00	0.00	22.47	0.04
ค่าต่ำสุด	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	371.18	0.73	467.60	0.92	356.56	0.71
ค่าสูงสุด	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	414.07	0.82	467.60	0.92	399.54	0.79

**ตารางผนวกที่ ข37** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + $H_2O_2$	น้ำออก			
			ไม่มีแสง		มีแสง	
			ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	11.40	10.35	9.64	9.76	9.97	9.34
2	11.40	10.35	9.64	9.79	9.97	9.31
3	11.40	10.35	9.64	9.83	9.97	9.42
ค่าเฉลี่ย	11.40	10.35	9.64	9.79	9.97	9.36
SD	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.06
ค่าต่ำสุด	11.40	10.35	9.64	9.76	9.97	9.31
ค่าสูงสุด	11.40	10.35	9.64	9.83	9.97	9.42



**ภาพผนวกที่ ข12** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข38** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

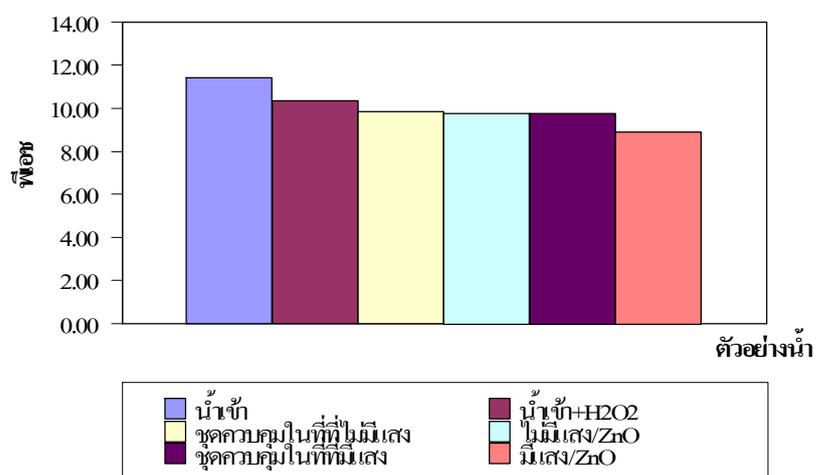
ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
			ไม่มีแสง			มีแสง		
			ชดควบคุม		ZnO	ชดควบคุม		ZnO
			มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.
1	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2272.00	2404.00	35.97	2432.00
2	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2076.00	2404.00	35.97	2384.00
3	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2204.00	2404.00	35.97	2376.00
ค่าเฉลี่ย	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2184.00	2404.00	35.97	2397.33
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	99.52	0.00	0.00	30.29
ค่าต่ำสุด	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2076.00	2404.00	35.97	2376.00
ค่าสูงสุด	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2272.00	2404.00	35.97	2432.00

**ตารางผนวกที่ ข39** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3050 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 2)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำเข้า+ $H_2O_2$		น้ำออก							
					ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	$C/C_0$	มก./ล.	$C/C_0$	ชุดควบคุม		ZnO		ชุดควบคุม		ZnO	
1	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	194.87	0.90	181.18	0.84	138.89	0.64
2	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	182.96	0.84	181.18	0.84	131.12	0.61
3	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	186.72	0.86	181.18	0.84	130.82	0.60
ค่าเฉลี่ย	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	188.18	0.87	181.18	0.84	133.61	0.62
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.09	0.03	0.00	0.00	4.57	0.02
ค่าต่ำสุด	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	182.96	0.84	181.18	0.84	130.82	0.60
ค่าสูงสุด	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	194.87	0.90	181.18	0.84	138.89	0.64

**ตารางผนวกที่ ข40** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + $H_2O_2$	น้ำออก			
			ไม่มีแสง		มีแสง	
			ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	11.45	10.35	9.82	9.62	9.74	9.36
2	11.45	10.35	9.82	9.73	9.74	8.64
3	11.45	10.35	9.82	9.94	9.74	8.77
ค่าเฉลี่ย	11.45	10.35	9.82	9.76	9.74	8.92
SD	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.38
ค่าต่ำสุด	11.45	10.35	9.82	9.62	9.74	8.64
ค่าสูงสุด	11.45	10.35	9.82	9.94	9.74	9.36



**ภาพผนวกที่ ข13** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข41** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

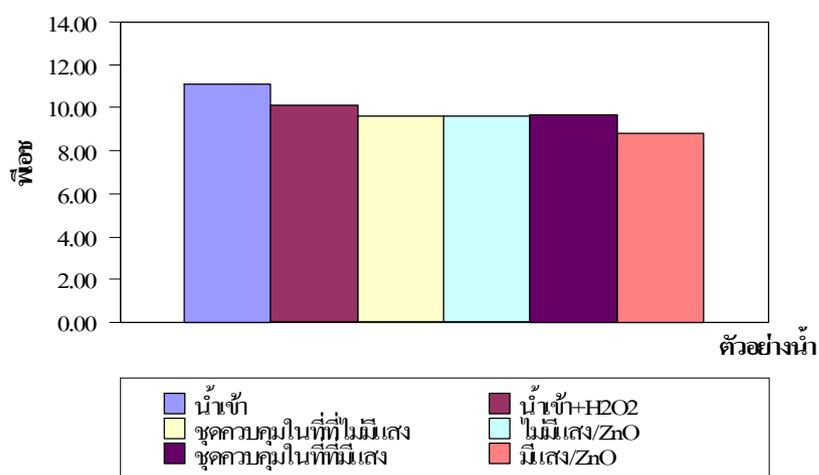
ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
			ไม่มีแสง			มีแสง		
			ชดควบคุม		ZnO	ชดควบคุม		ZnO
			มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.
1	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	3060.00	3140.00	17.69	2936.00
2	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	2832.00	3140.00	17.69	3364.00
3	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	2792.00	3140.00	17.69	3092.00
ค่าเฉลี่ย	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	2894.67	3140.00	17.69	3130.67
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	144.57	0.00	0.00	216.60
ค่าต่ำสุด	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	2792.00	3140.00	17.69	2936.00
ค่าสูงสุด	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	3060.00	3140.00	17.69	3364.00

**ตารางผนวกที่ ข42** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3340 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 44 องศาเซลเซียส (ครั้งที่ 3)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำเข้า+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		น้ำออก							
					ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ซุดควบคุม		ZnO		ซุดควบคุม		ZnO	
1	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	281.01	0.95	243.58	0.83	194.50	0.66
2	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	269.31	0.91	243.58	0.83	211.96	0.72
3	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	237.31	0.80	243.58	0.83	195.65	0.66
ค่าเฉลี่ย	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	262.54	0.89	243.58	0.83	200.70	0.68
SD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.62	0.08	0.00	0.00	9.77	0.03
ค่าต่ำสุด	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	237.31	0.80	243.58	0.83	194.50	0.66
ค่าสูงสุด	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	281.01	0.95	243.58	0.83	211.96	0.72

**ตารางผนวกที่ ข43** การเปลี่ยนแปลงพีเอชเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.33 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + $H_2O_2$	น้ำออก			
			ไม่มีแสง		มีแสง	
			ชุดควบคุม	ZnO	ชุดควบคุม	ZnO
1	10.54	9.52	9.42	9.29	9.32	8.14
2	11.40	10.35	9.64	9.79	9.97	9.36
3	11.45	10.35	9.82	9.76	9.74	8.92
ค่าเฉลี่ย	11.13	10.07	9.63	9.62	9.68	8.81
SD	0.51	0.48	0.20	0.28	0.33	0.62
ค่าต่ำสุด	10.54	9.52	9.42	9.29	9.32	8.14
ค่าสูงสุด	11.45	10.35	9.82	9.79	9.97	9.36



**ภาพผนวกที่ ข14** พีเอชหลังจากผ่านโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ  $H_2O_2$  ของน้ำเข้าและน้ำออกในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.33 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ ตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระจกเปล่า

**ตารางผนวกที่ ข44** ร้อยละการระเหยของน้ำโดยพิจารณาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดละลายน้ำ หลังจากผ่านกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

ครั้งที่	น้ำเข้า	น้ำเข้า + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ของแข็งทั้งหมดละลายน้ำของน้ำออก					
			ไม่มีแสง			มีแสง		
			ชดควบคุม	ZnO	ชดควบคุม	ZnO		
มก./ล.	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	มก./ล.	%	มก./ล.	
1	3772.00	3792.00	3732.00	0.00	3873.33	4232.00	14.38	4221.33
2	1768.00	1992.00	2152.00	21.72	2184.00	2404.00	35.97	2397.33
3	2668.00	2752.00	2892.00	8.40	2894.67	3140.00	17.69	3130.67
ค่าเฉลี่ย	2736.00	2845.33	2925.33	10.04	2984.00	3258.67	22.68	3249.78
SD	1003.73	903.62	790.53	10.95	848.20	919.76	11.63	917.81
ค่าต่ำสุด	1768.00	1992.00	2152.00	0.00	2184.00	2404.00	14.38	2397.33
ค่าสูงสุด	3772.00	3792.00	3732.00	21.72	3873.33	4232.00	35.97	4221.33

**ตารางผนวกที่ ข45** ประสิทธิภาพในการกำจัดทีโอซี หลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ออกซิเดชันด้วยแสงอาทิตย์ที่มี ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในรางเปิดแบบไหลต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 นาที ปริมาณ ZnO ที่ใช้ 4 กรัม/ลิตร ความเข้มแสง 3233.3 ไมโครวัตต์/ตารางเซนติเมตร อุณหภูมิ 41.67 องศาเซลเซียส (เฉลี่ย)

ครั้งที่	น้ำเข้า		น้ำเข้า+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		น้ำออก							
					ไม่มีแสง				มีแสง			
	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	มก./ล.	C/C <sub>0</sub>	ซุดควบคุม		ZnO		ซุดควบคุม		ZnO	
1	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.93	414.07	0.82	467.60	0.92	356.56	0.71
2	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	182.96	0.84	181.18	0.84	131.12	0.61
3	295.20	1.00	286.55	0.97	284.69	0.96	262.54	0.89	243.58	0.83	200.70	0.68
ค่าเฉลี่ย	339.11	1.00	326.59	0.95	313.56	0.92	286.52	0.85	297.45	0.86	229.46	0.67
SD	149.45	0.00	155.15	0.04	145.92	0.06	92.03	0.08	150.62	0.05	128.41	0.07
ค่าต่ำสุด	216.53	1.00	195.39	0.90	184.25	0.85	188.18	0.73	181.18	0.83	133.61	0.62
ค่าสูงสุด	505.60	1.00	497.84	0.98	471.76	0.96	371.18	0.89	467.60	0.92	381.84	0.76

ภาคผนวก ค  
ตัวอย่างการคำนวณ

## 1. การคำนวณปริมาตรถังปฏิกรณ์

ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (V) = ความกว้าง (W) × ความยาว (L) × ความสูง (D)

ถังปฏิกรณ์มีความกว้าง (W) = 8 เซนติเมตร

ความยาว (L) = 150 เซนติเมตร

ความสูง (D) = 0.5 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} V &= 8\text{cm} \times 150\text{cm} \times 0.5\text{cm} \\ &= 600 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ } 600 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณปริมาณ ZnO ที่ใช้เคลือบบนผิวกระจก

ปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ได้จากการทดลองในส่วนที่ 2 = 4 กรัม/ลิตร

ในน้ำเสีย 1 ลิตร จะใช้ปริมาณ ZnO 4 กรัม

ถ้าในน้ำเสีย 600 มิลลิลิตร จะใช้ปริมาณ ZnO 2.4 กรัม

เนื่องจากการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์เป็นแบบกวนสมบูรณ์ ซึ่งจะสัมผัสกับเนื้อสารทั้งหมดโดยทั่วถึง แต่เมื่อเคลือบ ZnO ลงบนผิวกระจกจะสัมผัสกับเนื้อสารเพียงแค่ครึ่งเดียว ดังนั้นจึงต้องใช้ปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ ZnO เริ่มต้นที่ต้องใช้} &= 2.4 \text{ กรัม} \times 2 \text{ เท่า} \\ &= 4.8 \text{ กรัม/5 แผ่น} \\ &= 0.96 \text{ กรัม/แผ่น} \end{aligned}$$

### 3. การคำนวณระยะเวลาเก็บกัก (T)

$$\text{ระยะเวลาเก็บกัก (T)} = \frac{\text{ปริมาณน้ำในถังปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}{\text{อัตราการไหล (ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที)}}$$

$$\begin{aligned}\text{อัตราการไหล} &= 3.33 \times 10^{-7} \text{ ลูกบาศก์เมตร/วินาที} \\ &= 0.333 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ระยะเวลาเก็บกัก} &= \frac{600 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}}{0.333 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร/วินาที}} \\ &= 1800 \text{ วินาที} \\ &= 30 \text{ นาที}\end{aligned}$$

### 4. การคำนวณร้อยละการระเหยของน้ำ

$$\text{ร้อยละการระเหยของน้ำ} = \left( \frac{\text{ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำในชุดควบคุม}}{\text{ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำเริ่มต้น}} - 1 \right) \times 100\%$$

การทดลองส่วนที่ 1 เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในชุดควบคุมที่มีแสง

ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำในชุดควบคุม = 118240.00 มิลลิกรัม/ลิตร

ความเข้มข้นของของแข็งละลายน้ำเริ่มต้น = 111216.00 มิลลิกรัม/ลิตร

$$\begin{aligned}\text{ร้อยละการระเหยของน้ำ} &= \left( \frac{118240.00}{111216.00} - 1 \right) \times 100\% \\ &= 6.32\%\end{aligned}$$

### 5. การคำนวณค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k)

$$\frac{C}{C_0} = e^{-kT}$$

การทดลองส่วนที่ 1 ประสิทธิภาพในการกำจัดสี เมื่อใช้ ZnO ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ในที่ที่มีแสง โดยทำการปรับพีเอช

$$C = 0.736$$

$$C_0 = 1.564$$

$$T = 1800 \text{ วินาที}$$

$$\frac{0.736}{1.564} = e^{-1800k}$$

$$k = 4.183 \times 10^{-4} \text{ ต่อวินาที}$$

### 6. การคำนวณสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (n)

$$\text{Manning's equation : } v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

โดยที่ v = อัตราเร็วของน้ำ (เมตร/วินาที)

n = สัมประสิทธิ์ความขรุขระ

R = hydraulic radius (เมตร)

=  $\frac{\text{พื้นที่หน้าตัดการไหล (A, ตารางเมตร)}}{\text{เส้นขอบเปียกน้ำ (P, เมตร)}}$

$$A = WD$$

$$P = 2D + W$$

$$Q = vA$$

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

กำหนดให้

$$Q = 3.33 \times 10^{-7} \text{ ลูกบาศก์เมตร/วินาที}$$

$$A = 6.6 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

$$P = 0.838 + 0.838 + 8.0$$

$$= 9.676 \times 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\Delta y = 8 \times 10^{-2} \text{ เมตร}$$

$$\Delta x = 1.5 \text{ เมตร}$$

- การคำนวณหาอัตราเร็วของน้ำ ( $v$ )

$$v = \frac{3.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s}}{6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$= 5.045 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

- การคำนวณหา hydraulic radius ( $R$ )

$$R = \frac{6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{9.676 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$= 6.821 \times 10^{-3} \text{ m}$$

- การคำนวณหาความชัน ( $S$ )

$$S = \frac{8 \times 10^{-2} \text{ m}}{1.5 \text{ m}}$$

$$= 0.053$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการ Manning's equation

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$5.045 \times 10^{-4} \text{ m/s} = \frac{1}{n} (6.821 \times 10^{-3} \text{ m})^{2/3} (0.053)^{1/2}$$

$$n = \frac{(6.821 \times 10^{-3} \text{ m})^{2/3} (0.053)^{1/2}}{5.045 \times 10^{-4} \text{ m/s}} = 15.92$$

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ฐานิตา เอี่ยมยี่สุน
วัน เดือน ปี ที่เกิด	4 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนของบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2549 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์