ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
สาขา

เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ภาควิชา

เรื่อง การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค ไฟท์ (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

Degradation of Reactive Black 5 dye in Synthetic Wastewater by Persulfate Oxidation

นามผู้วิจัย นางสาวปิ่นนารี บ้งพรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทรี ขุนทอง, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

Degradation of Reactive Black 5 dye in Synthetic Wastewater by Persulfate Oxidation

โดย

นางสาวปิ่นนารี บ้งพรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม)
พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปิ่นนารี บ้งพรม 2556: การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ตุลวิทย์ สถาปนจารุ, Ph.D. 137 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (Reactive black 5, RB5) โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ผลการทดลองพบว่าอัตราการย่อยสลายสี RB5 เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนสูงขึ้น โดยสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนที่ดีที่สุดคือ 400 ต่อ 4 และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ในเวลา 12 ชั่วโมงมีอัตราการย่อยสลายเป็น 2.5472 ชั่วโมง$^{-1}$ และให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบชนิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ชนิด คือ เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เหล็กวาเลนท์ศูนย์ ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออน พบว่าการใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงที่สุด 99 เปอร์เซ็นต์ โดยในเวลา 12 ชั่วโมง มีอัตราการย่อยสลายเท่ากับ 2.8609 ชั่วโมง$^{-1}$ และการศึกษาผลการย่อยสลายสี RB5 ที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ตั้งแต่ 1,000-4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเปอร์ซัลเฟตที่มีเหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่ง สามารถย่อยสลายสีย้อมได้เป็นอย่างดีโดยที่เวลา 4 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสี RB5 ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรดีที่สุด โดยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิวของ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือเฟอร์รัสไอออนและเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น พบว่าจุดที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสี RB5 ดีที่สุดที่ใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่ง คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 395 มิลลิโมลาร์ และ 6.35 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 4.5 โดยในเวลา 4 ชั่วโมง สำหรับจุดที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสี RB5 ดีที่สุดที่ใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่ง คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 540 มิลลิโมลาร์ และ 6.9 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.75 ซึ่งในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Pinnaree Bongprom 2013: Degradation of Reactive Black 5 dye in Synthetic Wastewater by Persulfate Oxidation. Master of Science (Environmental Technology and Management), Major Field: Environmental Technology and Management, Department of Environmental Technology and Management. Thesis Advisor: Associate Professor Tunlawit Satapanajaru, Ph.D. 137 pages.

This research objective was to study the effectiveness of degradation of Reactive Black 5 dye (RB5) by using persulfate oxidation. The results had showed that the degradation reaction rate constants of RB5 increased when persulfate and Ferrous ion dosage were increased. The best condition was molar ratio of persulfate to ferric ion at 400 : 4 at pH 5.0. The rate of degradation was 2.5472 h^{-1} at 12 hours with 90% degradation efficiency. At five different catalysts, catalyst including ferrous ion ferric ion zero valent ion silver nano and silver ion, we found that the best catalyst was zero valent iron with 99% degradation efficiency in 12 hours (2.8609 h^{-1}). The degradation efficiencies were 97-98% at 4 h when RB5 containing 1,000-4,000 mg/L chloride ion were treated by persulfate with a catalyst, zero valent iron. The optimal conditions of treating 100 mg/L RB5 by RSM with 3 factors, concentration of persulfate pH and two different catalysts, ferrous iron and zero valent iron, were studied the results found that the optimal condition of treat RB5 by using ferrous ion as catalyst was molar ration of concentration of persulfate and ferrous ion and pH were 395 mM and 6.35 mM at pH 4.5 within 4 h. The optimal condition of treat RB5 by using zero valent iron as catalyst was molar ration of concentration of persulfate and zero valent iron were 540 mM and 6.9 mM at pH 5.75 within an hour.

_____ _____ ___/___/___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ตุลวิทย์ สถาปนจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการเรียน การค้นคว้าวิจัย และคำแนะนำในด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทรี ขุนทอง ที่สนับสนุนในเรื่องการเรียน

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ

ขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อมที่สนับสนุนเงินทุนการนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับประเทศและเงินทุนช่วยเหลือการทำวิทยานิพนธ์และขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2555

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และขอบคุณเพื่อนปริญญาโทรุ่นที่ 7 และนางสาวกรรณิกา วาสนาสุข นางสาวฐิตมาภรณ์ ศรีจันทร์ และนางสาวสุรัสสา จงเป็นสุขเลิศ ร่วมถึงเพื่อนทุกๆ คน ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลอง ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ปิ่นนารี บ้งพรม

พฤษภาคม 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	46
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก	107
ภาคผนวก ข	110
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	137

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนการทดลอง CCD ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย	24
2	การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยวิธี CCD	42
3	การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัยคือ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยวิธี CCD	42
4	แผนการทดลองแบบ CCD ในการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	43
5	แผนการทดลองแบบ CCD ในการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต เหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	44
6	การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิต โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	48
7	การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	51
8	ผลของการย่อยสลายรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์	52

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
9	ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	55
10	ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟต 400 ต่อ 4	62
11	ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยที่มีคลอไรด์ไอออนแตกต่างกันโดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4	64
12	ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในแต่ละการทดลองโดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)	66
13	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA [b]) ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหูคูณ ของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)	67
14	ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ของปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)	68
15	ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหลังจากเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)	69
16	ผลการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์แต่ละการทดลอง โดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)	72

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

17 ผลการวิเคราะห์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในแต่ละการทดลอง โดยการศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) 80

18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA [b]) ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของ เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) 81

19 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) 82

20 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจหลังจากเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย สีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) 83

21 ผลการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์ การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในแต่ละการทดลองโดยศึกษา ปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของ เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) 86

ตารางผนวกที่

ก1 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 108

ข1 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ 111

ข2 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 300 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ 112

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข3 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ 113
ข4 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 500 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ 114
ข5 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 114
ข6 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 115
ข7 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร 116
ข8 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร 116
ข9 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร 117
ข10 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 0.5 มิลลิโมลาร์ 117
ข11 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ 118
ข12 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 118
ข13 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 8 มิลลิโมลาร์ 119
ข14 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์ริกไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 119

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข15 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์ 120
ข16 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และซิลเวอร์ไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 120
ข17 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และซิลเวอร์นาโน 4 มิลลิโมลาร์ 121
ข18 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 122
ข19 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 123
ข20 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 124
ข21 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์ 125
ข22 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4 126

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข23 ของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4 127
ข24 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4 128
ข25 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4 129
ข26 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4 130
ข27 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4 131
ข28 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4 132
ข29 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4 133

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

ข30 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาตามแผนการทดลอง CCD โดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 134

ข31 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาตามแผนการทดลอง CCD โดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 136

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive black 5)	2
2	ความนิยมการใช้สีย้อมประเภทต่าง ๆ กับเส้นใยเซลลูโลส	9
3	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์	16
4	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง	17
5	สิ่งทดลอง (design point) สำหรับสมการกำลังสอง	24
6	ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (RSM) ของการทดลอง (ก) สี 3,4-dichlorophenal (ข) สี Cibacron Brilliant Yellow 3 (CBY-3)	31
7	ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบ central composite design ที่มี 3 ปัจจัย	41
8	ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ก) ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น (ข) ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สุดท้ายที่ 12 ชั่วโมง	46
9	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล๊คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเบื้องต้นโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	47
10	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล๊คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	48
11	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล๊คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	50
12	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์	52

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์	54
14	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยตัวเร่งของเฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์	57
15	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยตัวเร่งของซิลเวอร์ไอออน และซิลเวอร์นาโน และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์	59
16	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เหล็กวาเลนท์ศูนย์ ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์	60
17	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟต 400 ต่อ 4	62
18	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์	64
19	normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	71
20	(ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อตของความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟต และเฟอร์รัสไอออนต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6	74

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

21 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อตของความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์ 76

22 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อตของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์ 78

23 normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 84

24 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6 88

25 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์ 90

26 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์ 92

ภาพผนวกที่

ก1 กราฟมาตรฐานของสี RB5 109

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

RB5	=	reactive black 5 dye
PS	=	persulfate
RSM	=	response surface methodology
CCD	=	central composite design
Fe^{2+}	=	ferrous ion
Fe^{3+}	=	ferric ion
Fe^{0}	=	zero valent ion
Ag^{+}	=	silver ion
Ag^{0}	=	silver nano
$SO_4^{-}\bullet$	=	sulfate radicle
$S_2O_8^{2-}$	=	sulfate ion
Cl^{-}	=	chloride ion
$Cl^{-}\bullet$	=	chloride radicle
C_0	=	initial concentration
C	=	residual concentration
k	=	rate constant
h^{-1}	=	$hour^{-1}$
mg/L	=	milligram per lit
nm	=	nanometer

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

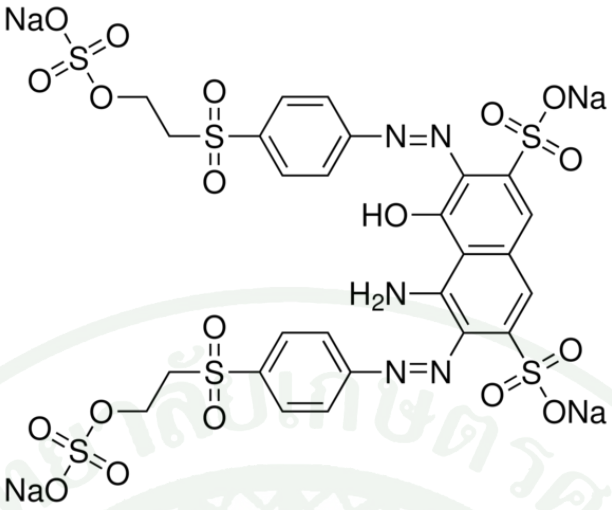
Degradation of Reactive Black 5 dye in synthetic wastewater by Persulfate Oxidation

คำนำ

สีย้อมสังเคราะห์นิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์สามารถให้คุณภาพสีกับผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการ นอกจากนั้นสีย้อมสังเคราะห์ยังดูดซึมกับเส้นใยได้ง่ายกว่าสีธรรมชาติ (Palanivelu *et al*., 2010) โดยในกระบวนการฟอกย้อมสีสังเคราะห์สีย้อมส่วนหนึ่งที่ไม่ดูดซับกับเส้นใยจะเกิดการปนเปื้อนในน้ำเสียและถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน รวมทั้งทัศนียภาพของแหล่งน้ำเสื่อมโทรม

สีรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (Reactive Black 5; RB5) อยู่ในประเภทของสีรีแอกทีฟ (reactive dyes) ซึ่งเป็นสีที่มีความสดใส มีความคงทนต่อการซักล้างสูง (Tunc *et al*., 2009; Eren *et al*., 2006) และเป็นที่นิยมใช้มากกว่าร้อยละ 50 ของประเภทสีย้อมทั้งหมด (Roessler and Jin, 2003) สีย้อมชนิดนี้จัดอยู่ในกลุ่มของสีอะโซ (azo dyes) มีลักษณะโครงสร้างทางเคมี ประกอบด้วยหมู่อะโรมาติก (aromatic) ที่มีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) และแอนทราคิวโนน ซึ่งเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีการทางธรรมชาติ (non-natural attenuation) และเป็นสารมะเร็งและการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตอีกด้วย (Chen *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2011) โครงสร้างโมเลกุลของสี RB5 แสดงดังภาพที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5

ที่มา: Shuang *et al*. (2007)

การย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสามารถทำได้หลายวิธีทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ขึ้นอยู่กับปริมาณของสีย้อมสังเคราะห์ที่ปนเปื้อน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ที่ต้องการ ความพร้อมของผู้ปฏิบัติงานและค่าใช้จ่าย อย่างไรก็ตามการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีเป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วกว่าวิธีอื่น สำหรับวิธีการย่อยสลายสารสีย้อมสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การใช้โอโซน (ozone treatment) การแลกเปลี่ยนอิออน (ion exchange) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) การกรองด้วยแผ่นเยื่อ (membrane filtration) และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon adsorption) (Li and Hu., 2011) เป็นต้น โดยในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป เช่นการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สามารถลดสีได้เพียง 10-20 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น (Venceslau *et al*., 1994) หรือกระบวนการตกตะกอนด้วยสารเคมีไม่สามารถย่อยสลายโมเลกุลของสีย้อมที่สามารถละลายในน้ำได้และมีของเสียเป็นตะกอนสจัดจ์ ซึ่งต้องมีการกำจัดทิ้งอีกครั้ง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง (Vendevivere *et al*., 1998) นอกเหนือจากวิธีการย่อยสลายสารสีย้อมสังเคราะห์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ปัจจุบันการใช้สารเคมีในกระบวนการออกซิเดชั่น (oxidation process) เช่น การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (fenton's reagent) เปอร์แมงกาเนส (permanganate oxidation) เปอร์ซัลเฟต (persulfate oxidation) และโอโซน (O_3) (Yang *et al*., 2010; Yang *et al*., 2011) กำลังได้รับความนิยมในการบำบัดสารปนเปื้อน เนื่องจากใช้เวลาในการบำบัดน้อย ง่ายต่อการใช้งาน โดยเฉพาะเปอร์ซัลเฟตที่มีการแตกตัวในการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) สูง มีค่าครึ่งชีวิต (half-life) อยู่ในช่วงหนึ่งสัปดาห์ถึง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หนึ่งเดือน ละลายน้ำได้ดี มีราคาถูก (Kao *et al*., 2011; Huang *et al*., 2002; Li and Hu, 2011) และเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสารปนเปื้อนโดยสมบูรณ์ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อย่างไรก็ตามหากกระบวนการออกซิเดชั่นที่เกิดขึ้นกับสารปนเปื้อนไม่สมบูรณ์ที่ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการออกซิไดซ์กับสารปนเปื้อน หรือความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนเริ่มต้น ค่าความเป็นกรด-ด่างไม่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา และค่า ionic strength ของน้ำเสีย เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาสภาวะ/ปัจจัยที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต ผ่านกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น โดยศึกษาปัจจัยดังนี้ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (Fe^{0}) ซิลเวอร์นาโน (Ag^{0}) และซิลเวอร์ไอออน (Ag^{+}) ค่าความเป็นกรดและด่าง และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Cl^{-}) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยความมุ่งหวังของผลของงานวิจัยนี้จะสามารถเป็นข้อมูลสำหรับการนำไปสู่การปรับใช้งานได้จริงในระดับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตเริ่มต้น ความเข้มข้นของสีเริ่มต้น สัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์

2. เพื่อหาสภาวะเหมาะสมต่อการใช้สารเปอร์ซัลเฟตในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น โดยวิธีการตอบสนองพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. ความหมายของสีย้อม

สีย้อม (dyestuff) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมวัสดุสิ่งทอ สีย้อมอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ สีย้อมมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ หรือสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมมาใช้ในกระบวนการย้อมทำให้โมเลกุลของสีย้อมแพร่กระจายและซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยการเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆว่าแรงยึดเหนี่ยวเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใยคือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals' force) แรงไอออน (ionic force) และพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) แรงยึดเหนี่ยวเพียงชนิดเดียวอาจไม่เพียงพอที่ทำให้การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วย 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุดได้แก่ พันธะโควาเลนท์ (รัชนีย์, 2555)

นอกจากนี้ สีย้อมมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปคตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามนุษย์มองเห็นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร ซึ่งสีย้อมจะมีหมู่ฟังค์ชันที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า คลอมอฟอร์ (chromophores) (Christie *et al.*, 2001) ได้แก่

- หมู่ไนโตรโซ (nitroso group (–N=O))
- หมู่ไนโตร (nitro group (NO_2))
- หมู่อะโซ (azo group (–N=N–))
- หมู่อะโซซี (azoxy group (–N=N–))
- หมู่เอธทิลลีน (ethylene group (-C=C-))
- หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) (-C=0))
- หมู่ไทโอคาร์บอนิล (thiocarbonyl group (-CH=S))
- หมู่คาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbonyl-nitrogen group)
- หมู่ซัลเฟอร์ (sulphur group) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สีย้อมยังมีออกโซโครม (auxochromes) ซึ่งเป็นหมู่ฟังค์ชั่นที่ไม่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต และแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า แต่มีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครโมฟอร์โดยมีส่วนทำให้ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (red shift) หรือทำให้ความยาวคลื่นสั้นลง (blue shift) ซึ่งในด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ ออกโซโครม เป็นตัวช่วยเสริมคุณสมบัติของสีย้อมเมื่ออยู่ติดกับส่วนโครโมฟอร์ เช่น หมู่ที่ละลายน้ำ ได้แก่ คาร์บอกซิลิก (Carboxylic (–COOH) ซัลโฟนิล (Sulphonyl ($–SO_3H$) และไฮดรอกซิล (Hydroxyl (–OH) เป็นต้น และหมู่ที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ เมทธิล ($-CH_3$) และเอทธิล (C_2H_5) เป็นต้น (Van der Zee, 2002)

2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuffs)

สีย้อมสังเคราะห์เป็นผลผลิตจากน้ำมันถ่านหินและน้ำมันปิโตรเลียม ที่ผ่านการสกัดได้เป็นสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากนั้นผ่านกระบวนการไนเตรชั่นและแอมมิเนชั่น เพื่อเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นสารตัวกลาง และจากสารตัวกลางเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ (Vaidya *et al*., 1982) สีที่ใช้ในกระบวนการย้อมสามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ละลายน้ำเรียกว่า สีย้อม (dyestuffs) และชนิดที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่า พิกเมนต์ (pigment) สำหรับการจำแนกสีย้อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การแบ่งสีย้อมตามดัชนีสี (color index) ซึ่งจำแนกตามโครงสร้างของสีและตามลักษณะการใช้งาน (Vigo, 1994) โดยโครงสร้างสำคัญของสีย้อมสังเคราะห์มี 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มโครโมฟอร์เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัวที่ก่อให้เกิดสี และกลุ่มออกโซโครมเป็นกลุ่มที่ช่วยให้สีย้อมทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ สีย้อมสังเคราะห์แต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม และวิธีการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งกลุ่มของโรงงานอุตสาหกรรมจัดจำแนกสีย้อมตามวิธีใช้งานออกเป็น 9 ประเภท (ขนิษฐา, 2550) ดังนี้

2.1 สีไดเร็กท์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย มีสารประกอบหลักคืออะโซ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำทำให้สีตกได้ง่าย และทนแสง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 สีรีแอกทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โดยโมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนท์ในสภาวะความเป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส (Zollinger, 1991) นอกจากนี้สีรีแอกทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอกทีฟให้สีที่สดใสทุกสีติดทนในทุกสภาวะ

สีรีแอกทีฟโดยทั่วไปมีเฉดเป็นสีเหลือง ส้ม แดง ส้มแดง ม่วง น้ำตาล และดำ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลอยู่ในกลุ่มอะโซ สำหรับสีฟ้าและน้ำเงินจะมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลประกอบกัน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอะโซและแอนทราควิโนนหรือทาโลไซยาไนด์ (Reife and Freeman, 1996)

2.3 สีแว็ต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ สีแว็ตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์ เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีคราม (indigo) และสีแอนทราควินอยด์ (antraquinoid)

2.4 สีซัลเฟอร์ (sulfer dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะละลายน้ำ นิยมนำสีซัลเฟอร์มาย้อมฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซักล้าง

2.5 สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิกใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางชนิดสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคลิริกได้ดี วิธีการใช้จะนำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง สีเอซิดไม่ทนการซัก ไม่ทนเหงื่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.6 สีดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท โพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยหรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิ และความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยพิจารณากลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมอะมิโน แอนทราคิวโนน (amino antraquinone) ซึ่งทั้ง 2 กลุ่ม ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทราโนลามีน (ethanolamine; $NH_2CH_2CH_2CH$) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

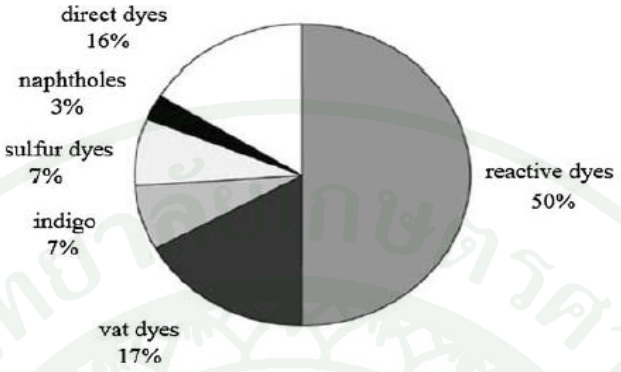
2.7 สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบละลายน้ำได้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิกได้ดี ในขณะย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นสีที่ติดทนไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากไม่ทนการซักและแสง

2.8 สีอะโซอิค (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพแนนท์จึงจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิค ใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิคเป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.9 สีมอร์แดนท์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนท์หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน และเส้นใยพอลีเอไมด์ได้ดี (รัชนีย์, 2555)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากข้อมูลสถิติพบว่าความนิยมของการใช้สีย้อมสังเคราะห์ทั่วโลกโดยส่วนใหญ่นิยมใช้ในสีรีแอกทีฟ รองลงมา คือ สีแว็ต และ สีไดแร็กท์ ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความนิยมการใช้สีย้อมประเภทต่าง ๆ กับเส้นใยเซลลูโลส

ที่มา: Roessler and Jin (2003)

สำหรับประเทศไทยพบว่ามีการนำเข้าสีย้อมสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จากการที่อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการเจริญเติบโตมากขึ้นเรื่อยๆ จึงส่งผลให้มีการใช้สารเคมีและสีย้อมจำนวนมาก โดยสีย้อมสังเคราะห์ที่มีการนำเข้ามากที่สุด คือ สีรีแอกทีฟ(สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, 2555)

3. ความเป็นพิษของสีย้อมสังเคราะห์

ในกระบวนการฟอกย้อม สีย้อมสังเคราะห์ไม่สามารถดูดติดกับเส้นใยได้ทั้งหมด ทำให้สีย้อมสังเคราะห์เกิดการปนเปื้อนในน้ำทิ้งและปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม (Meyer, 1998; Vaidya and Datye, 1982) เกิดการทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำและสีย้อมมีลักษณะเป็นคัลลอยด์สามารถแพร่กระจายในแหล่งน้ำบดบังแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำมีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง นอกจากนี้ในการย่อยสลายสีย้อมสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างหมู่อะโซหรือไนโตรภายใต้สภาวะไร้อากาศ ทำให้โครงสร้างของสีย้อมเปลี่ยนไปเป็นสารอะโรมาติกเอมีน ซึ่งจัดเป็นสารก่อการกลายพันธ์และก่อมะเร็ง เช่น 2-แนฟทิลเอมีน เบนซิดีนและฟีนอลและอะโรมาติกเอมีน โดยพบว่าเป็นสารดังกล่าวนี้ยากต่อการย่อยสลายโดยกระบวนการทางธรรมชาติ ซึ่งเมื่อเทียบกับโครงสร้างของสีย้อมดั้งเดิมที่ไม่แสดงความเป็นพิษ (Chung *et al.*, 1992; Banat *et al.*, 1996; Hardin *et al.*, 2000) ปัญหาดังกล่าวประเทศสหรัฐอเมริกาจึงได้ออก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กฎหมายควบคุมปริมาณสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอให้มีค่าสีต่ำกว่า 200 ADMI unit (American Dye Manufacturers Institute unit) (Banat *et al.*, 1996) แต่สาหรับประเทศไทยจากประกาศของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) กำหนดค่ามาตรฐานสีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอให้เพียงแต่ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ แต่ไม่ได้กำหนดไม่ได้กำหนดค่าสีไว้ให้ชัดเจน (ทักษิณ, 2552)

4. การบำบัดสีย้อมสังเคราะห์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ

สารสีย้อมสังเคราะห์และสารเคมีเป็นส่วนที่เหลือและตกค้างในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอมากที่สุด (Bhunia *et al*., 2012) ซึ่งน้ำทิ้งที่มีสารสีย้อมสังเคราะห์ปนเปื้อนอยู่มักถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้งสาธารณะ เกิดปัญหาทางด้านทัศนวิสัยการมองเห็น ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งเป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีย้อมที่ตกค้างก่อน การเลือกใช้กระบวนการที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของระบบบำบัดและราคาก่อนนำไปใช้งาน (Tychanowicz *et al.*, 2004) วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการกรองด้วยเมมบรน เป็นต้น (Yang *et al*., 2011)

ปัจจุบันกระบวนออกซิเดชั่นทางเคมี เป็นกระบวนการลดมลพิษ (detoxify) ของสารปนเปื้อนโดยการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปของสารที่มีพิษน้อยลง และยังเป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดของเสียอันตรายและไม่อันตราย น้ำดื่ม และน้ำเสียชุมชน ที่สำคัญเป็นวิธีที่กำลังรับความนิยมในการประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียประเภทสิ่งทอ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ใช้เวลาในการบำบัดสีย้อมน้อย เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กระบวนการบำบัดที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เป็นปฏิกิริยาเกิดสภาวะออกซิเดชั่นโดยการเปลี่ยนอะตอมของสารประกอบด้วยการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (electron transfer) จากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง โดยสารเคมีที่หน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ทำให้เลขออกซิเดชั่นของสารเพิ่มขึ้น (สูญเสียอิเล็กตรอน) สำหรับสารเคมีที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจะทำให้เลขออกซิเดชั่นของสารลดลง (รับอิเล็กตรอน) เรียกสารเคมีนั้นว่า ตัวรีดิวซ์ (reducing agent)

โดยกระบวนการออกซิเดชั่นทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนได้หลายชนิด เนื่องจากมีการใช้สารเคมีที่ทำปฏิกิริยารุนแรง เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โอโซน (O_3) เปอร์แมงกาเนต (MnO_4^-) และเปอร์ซัลเฟต ($S_2O_8^{2-}$) (Yang *et al*., 2010, Yang *et al*., 2011, Li and Hu, 2011) โดยสารเคมีดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสารปนเปื้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้สุดท้าย คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ หรือเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนเป็นสารชนิดอื่นที่มีความเป็นพิษลดลงหรือเป็นสารประกอบที่พบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไป นอกจากนี้สารเคมีกลุ่มนี้เป็นสารเคมีที่หาง่ายในท้องตลาด ความเป็นพิษต่ำเมื่อเทียบกับสารออกซิไดซ์ประเภทอื่น และง่ายต่อการใช้งาน (Sathesan, 2002) เกรียงศักดิ์ (2546) รายงานว่าเมื่อเกิดการออกซิเดชั่นทางเคมีกับสารปนเปื้อน อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารปนเปื้อนดังต่อไปนี้

4.1 เกิดการย่อยสลายโครงสร้างหลักของสารปนเปื้อน

4.2 เกิดการย่อยสลายโครงสร้างหลักของสารปนเปื้อนมีผลให้มีความเป็นพิษของสารลดลง

4.3 เกิดการย่อยสลายสารปนเปื้อนทำให้องค์ประกอบของสารอินทรีย์คาร์บอนของสารปนเปื้อนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แม้ว่ากระบวนการออกซิเดชันทางเคมีจะให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก็ต่อเมื่อเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แต่หากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีไม่สมบูรณ์ก่อให้เกิดสารตัวกลางหรือผลิตภัณฑ์รอง ซึ่งอาจก่อให้เกิดเป็นสารอันตรายอีกชนิดหนึ่ง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณของสารออกซิไดซ์อาจไม่เพียงพอ หรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยาไม่เหมาะสม เช่น ปริมาณตัวเร่ง ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ และปัจจัยที่เกี่ยวข้องให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. กระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น (persulfate oxidation)

เปอร์ซัลเฟตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสารออกซิแดนซ์ที่รุนแรงมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard Oxidation-Reduction Potential : E°) เท่ากับ 2.01 โวลต์ เป็นสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกับสารบางชนิด มีความเสถียรในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง และราคาถูก

Oh *et al*. (2009) และ Liang *et al.* (2011) ได้อธิบายสมการการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ซัลเฟต โดยแสดงดังสมการที่ 1 และ 2

$$S_2O_8^{2-} + \text{initiator} \longrightarrow 2SO_4^{-}\bullet \ (\text{or } SO_4^{-}\bullet + SO_4^{2-}) \quad (1)$$

$$SO_4^{-}\bullet + e^{-} \longrightarrow SO_4^{2-} \quad (2)$$

ปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่ง ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้แต่ใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน ดังนั้นการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นการส่งเสริมให้เปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($SO_4^{-}\bullet$) ได้รวดเร็วขึ้น (Liang *et al*., 2008)

การเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การกระตุ้นด้วยความร้อน (Chen *et al*., 2011, Huang *et al*., 2002) การเติมโลหะทรานซิชั่น เช่น เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (ZVMI) หรือ (Fe^0) (Devi *et al*., 2009) คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ซิลเวอร์ไอออน (Ag^{+}) (Zhao *et al*., 2010) แมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) เหล็กวาเลนท์ศูนย์ (Fe^0) เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Kao *et al*., 2011) การใช้แสง (photolysis) (Yeber *et al*., 2010) และการใช้คลื่นเสียง (sonochemical) (Palanivelu *et al*., 2010) เป็นต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เฟอร์รัสไอออนสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟตได้เร็วกว่ากระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์แมงกาเนต (Zhao *et al.*, 2010) นอกจากนี้เฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งโมเลกุลของออกซิเจน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน และน้ำ จนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Rao *et al*., 1995; Xu and Li., 201)

การใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโลหะเหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดมลพิษ และเป็นสารที่มีราคาถูก หาง่าย (Li *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2010) จึงนิยมนำมาประยุกต์ในการบำบัดสารมลพิษได้หลายประเภท เช่น การกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน เช่น สารกำจัดศัตรูพืช โลหะหนัก (Jeen *et al*., 2008, Morrison *et al.*, 2002) ตัวทำละลายที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ (chlorinated solvent) (Oliver *et al.*, 2000; Liu *et al*., 2006) และปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น อีกทั้งใช้เป็นกำแพงปฏิกิริยา (permeable reactive barrier, PRB) (Georgios *et al.*, 2006) ทั้งนี้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะกรดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัสไอออนและเข้าไปทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระของสารตัวออกซิไซด์นั้นๆ โดยอนุมูลอิสระของสารตัวออกซิไซด์ที่เกิดขึ้นได้จะไปทำการย่อยสลายสารปนเปื้อนต่าง ๆ ให้มีความเป็นพิษลดลงได้ (Zhao *et al.*, 2010) ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น Devi *et al.* (2009) ศึกษาการย่อยสลายแอนทราคิวโนน (anthraquinone) ของสีชนิด Alizarin Red S (ARS) โดยเปรียบเทียบกระบวนการโฟโตเฟตตัน (Photo Fenton process) และกระบวนการออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟต นอกจากนี้การเติมผงเหล็กวาเลนท์ศูนย์เพื่อเร่งให้กระบวนการทั้งสองเกิดได้เร็วขึ้น ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟตที่มีผงเหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งสามารถย่อยสลาย ARS ได้ดีกว่า เช่นเดียวกับ Devi *et al.* (2009) ศึกษาการย่อยสลายสีเมธิลออเจนจ์ (methyl orange; MO) โดยใช้เปอร์ซัลเฟตและเหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ซึ่งผลการศึกษาพบว่าในสภาวะความเป็นกรดและมีเหล็กวาเลนท์ศูนย์ปริมาณมากในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสี MO สูงขึ้น สำหรับ Cheng *et al.* (2012) และ Xu et al. (2010) ศึกษาการย่อยสลายสีออเรนจ์จี (Orange G; OG) โดยใช้เปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟต เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้เร็วขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสี OG สูงขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Anipsitakis and Dionysiou (2004), Gemeray *et al.* (2007) และ Li *et al.* (2009) ได้รายงานว่านาโนซิลเวอร์ออกไซด์หรือซิลเวอร์นาโน (Nana silver oxide; Ag^0) และซิลเวอร์ไอออน เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นได้เป็นอย่างดี (Zhao *et al.*, 2010)

6. จลศาสตร์การเกิดปฏิกิริยา (Kinetic reaction rate)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือจลศาสตร์ (kinetic) สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของปฏิกิริยา (Law of man action) ที่ระบุอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ฉัตรเพชร, 2553) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการโดยทั่วไป แสดงดังสมการที่ 3 (ประภัสสร, 2554)

$$\frac{dC_A}{dt} = -kf(C_A, C_B, \ldots) \qquad (3)$$

โดย C_A หมายถึง ความเข้มข้นของสารตั้งต้น A

C_B หมายถึง ความเข้มข้นของสารตั้งต้น B

k หมายถึง ค่าคงที่อัตราของการเกิดปฏิกิริยา (rate constant)

t หมายถึง เวลา

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่ากฎอัตรา (rate law) ได้แก่ อัตราการของปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับผลคูณระหว่าง k และฟังก์ชั่นของความเข้มข้นของสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา $f(C_A, C_B, \ldots)$ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 4 (ประภัสสร, 2554)

$$\frac{dC_A}{dt} = -kf(C_A^{\alpha}, C_B^{\beta}, \ldots) \qquad (4)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เลขยกกำลังเหนือความเข้มข้นของสารตั้งต้น หมายถึง อันดับของปฏิกิริยา (Reaction order) ซึ่งในสมการที่ 4 ซึ่งอันดับที่ α สำหรับสาร A และอันดับที่ β สำหรับสาร B โดยที่อันดับปฏิกิริยารวมได้แก่ n = α + β ซึ่งอันดับรวมของปฏิกิริยาหรืออันดับสำหรับสารใด ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม หากปฏิกิริยานั้นมีสารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว แสดงดังสมการที่ 5 (ประภัสสร, 2554)

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC^n \qquad (5)$$

โดย C หมายถึง ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

n หมายถึง อันดับ

6.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หรือ n = 0 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6

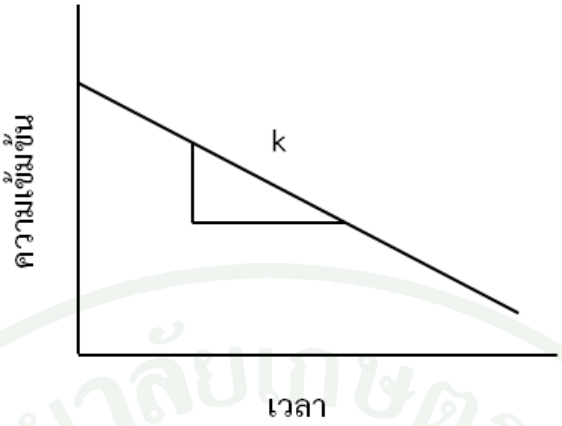
$$\frac{dC_A}{dt} = -k \qquad (6)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น $M/L^3/T$ ซึ่งหาก C = C_0 ที่ t = 0 เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 6 ได้เป็นสมการที่ 7

$$C = C_0 - kt \qquad (7)$$

กราฟความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ซึ่งหมายถึงอัตราการย่อยสลายของสารตั้งต้นที่มีค่าคงที่กับเวลา เมื่อวาดความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษและเวลาได้กราฟเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 3 (ประภัสสร, 2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ที่มา: ประภัสสร, 2554

6.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction)

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง หรือ n = 1 เขียนได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC \quad (8)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น T^{-1} หาก $C = C_0$ ที่ $t = 0$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 8 ได้เป็นสมการที่ 9 และ 10

$$\ln C . \ln C_0 = -kt \quad (9)$$

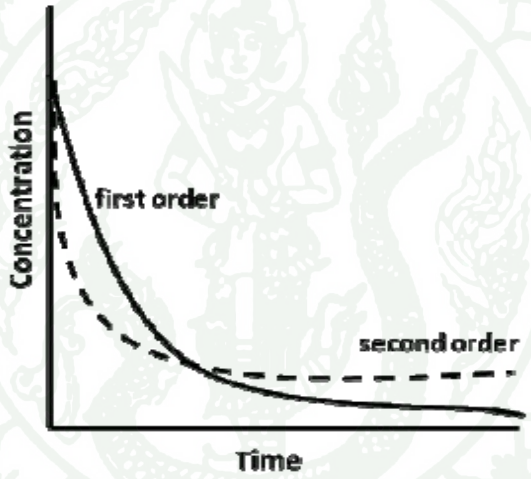
หรือ

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (10)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการเบื้องต้น อัตราการย่อยสลายแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ช่วงเวลาก่อนหน้า ดังนั้นอัตราการย่อยสลายลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ดังแสดงภาพที่ 4 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่ากราฟแสดงความเข้มข้นเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป และกราฟระหว่าง ln C เมื่อเทียบกับเวลา t แสดงเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความลาดชัน = -k ค่า ln C ลดลงเมื่อเวลา t ผ่านไปและเมื่อปริมาณ C หมดไปครึ่งหนึ่ง เวลา t เรียกว่า ครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) หมายถึง เวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารมลพิษลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณสารดั้งเดิม ดังสมการที่ 11 (ประภัสสร, 2554)

$$C = \frac{C_0}{2} \qquad (11)$$



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order) และปฏิกิริยาอันดับสอง (second order)

ที่มา: ประภัสสร, 2554

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างความเข้มข้นของสาร A และความเข้มข้นของสาร B โดยที่มีการลดลงของความเข้มข้นของสาร A เพียงสารเดียว ซึ่งในระบบมีความเข้มข้นของสาร B คงที่ แสดงดังสมการที่ 12 ถึง 14 หรือเป็นการเติมสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งในปฏิกิริยาให้มีความเข้มข้นที่มากเกินพอตลอดการดำเนินไปของปฏิกิริยา (ประภัสสร, 2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$C_A + C_B \longrightarrow \text{product} \qquad (12)$$

โดย C_A หมายถึง ปริมาณความเข้มข้นสาร A

C_B หมายถึง ปริมาณความเข้มข้นสาร B

ดังนั้น

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^{\,n} C_B^{\,n} \qquad \text{ขณะที่ } n = 1 \qquad (13)$$

เนื่องจากความเข้มข้นของสาร B คงที่ ดังนั้น

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^{\,n} \qquad \text{ขณะที่ } n = 1 \qquad (14)$$

จึงเรียกจลนศาสตร์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Pseudo first order reaction

6.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง (second order)

ปฏิกิริยาอันดับสอง หรือ $n = 2$ เขียนได้ดังสมการที่ 15

$$\frac{dCA}{dt} = -kC^2 \qquad (15)$$

โดยที่ k มีหน่วยเป็น $L^3/M/T$ หาก $C = C_0$ ที่ $t = 0$ เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 15 ได้เป็นสมการที่ 16

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt \qquad (16)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง 1/C เทียบกับเวลา t แสดงเป็น เส้นตรง โดยอัตราการย่อยสลายแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ช่วงเวลาก่อนหน้า และสังเกตเห็นได้ว่ากราฟความ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เข้มข้นจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น แต่กราฟของอัตราการย่อยสลายอันดับสองนี้ และมีส่วนโค้งมากกว่ากราฟของอัตราการย่อยสลายอันดับหนึ่ง (ภาพที่ 4) (ประภัสสร, 2554)

7. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง (Respond surface method; RSM)

RSM เป็นเทคนิคทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้แผนภาพ surface plot ที่สร้างเป็นแผนภาพ 3 มิติ ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นที่สนใจของนักวิจัย ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรร่วมการทดลองหลายปัจจัย การตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะคือ การตอบสนองมากที่สุดหรือการตอบสนองต่ำที่สุด ขึ้นอยู่กับธรรมชาติการทดลอง ซึ่งเป็นการแสดงหรือตัวแทนทางเรขาคณิตที่ได้รับเมื่อผลตอบสนองของตัวแปร เมื่อเขียนกราฟเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรเหล่านั้น จากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังกล่าวทำให้สามารถพิจารณาผลตอบสนองของตัวแปรและปัจจัยที่สนใจเหล่านั้นพร้อมกัน โดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้ คือ การวางแผนการทดลอง (experimental design) การวิเคราะห์สมการถดถอย (regression analysis) และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้างแผนภาพ surface plot (อนุวัตร, 2549)

แบบจำลองทั่วไป

$$Y = f(X_1 + X_2 + \ldots X_n) + \varepsilon$$

โดย Y คือ ค่าตอบสนอง (response) หรือ dependent variable

$X_1 + X_2 + \ldots X_n$ คือ ตัวแปรที่สนใจ หรือ independent variable

ε คือ เทอมของค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

รูปแบบความเที่ยงตรงของฟังก์ชั่นการตอบสนองหรือค่า f สามารถประมาณได้โดยฟังก์ชั่นเชิงเส้นตรง หรือเส้นโค้งของตัวแปรเชิงปริมาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression relationship) ตามสมการที่ 17

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_1 X_2 + \ldots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (17)$$

ความสัมพันธ์ หรือฟังชันของตัวแปรเหล่านี้มักใช้ปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองพหุนาม (polynormial model) หรือปฏิกิริยาลำดับที่ 2 สำหรับความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (quadratic regression relationship) แสดงดังสมการที่ 18 (Khuri and Cornell., 1987)

$$\begin{aligned} Y = {} & \beta_0 + \beta_i X_i + \beta_i X_2 + \ldots + \beta_n X_n \\ & + \beta_{ii} X_1^2 + \ldots + \beta_{nn} X_n^2 \\ & + \beta_{ij} X_1 X_2 + \ldots + \beta_{n-1,n} X_n - {}_1 X_n + \varepsilon \end{aligned} \quad (18)$$

โดย β_0 หมายถึง จุดตัด (intercept) บนแกน Y

β_I หมายถึง ผลเชิงเส้นตรง (linear effect) ของ) X_i เมื่อ i = 1, 2, 3,..n

β_{ii} หมายถึง ผลเชิงเส้นตรง (quadratic effect) ของ X_i เมื่อ i = 1, 2,3,.., n

β_{ij} หมายถึง ผลของปฏิกิริยาสัมพันธ์ (interaction effect) ของ) X_i และ X_j เมื่อ i = 1, 2, 3,…, n

สำหรับเทอมของความคลาดเคลื่อน โดยปกติจะกำหนดให้มีการกระจายตัวเทียบกับค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าแปรปรวนเป็น σ^2 ความแปรปรวนในเชิงปริมาณ σ^2 ในการกระจายตัวของค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างจุดต่าง ๆที่ออกแบบกับความคลาดเคลื่อนในการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ความแปรปรวนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างจุดต่าง ๆ ที่ออกแบบสามารถอธิบายได้โดยฟังก์ชั่นของการตอบสนอง หากทราบความแปรปรวนดังกล่าวโดยปกติฟังก์ชั่นของการตอบสนองที่เป็นจริงและไม่ทราบมาก่อน ดังนั้นจึงต้องประมาณการค่าดังกล่าว เป็นผลให้การกระจายตัวของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน ไม่เฉพาะแต่ความคลาดเคลื่อน จากการทดลองเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากการขาดความสอดคล้องของสมการที่ประมาณการขึ้นที่เรียกว่า “lack of fit of estimated model” ถ้าสมการที่ประมาณขึ้นมามีความสอดคล้องในการตอบสนองที่กำลังคาดคะเนแล้วผลรวมกำลังสอง (sum of square; SS) ของความคลาดเคลื่อนจะเกิดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เพื่อประเมินความเหมาะสมของสมการ (อนุวัตร, 2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการทางสถิติที่ใช้คือวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (the least square method) เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ฟังก์ชั่นที่ใช้เรียกว่า ฟังก์ชันของการตอบสนองที่เหมาะสม (fitted response function) โดยถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองของสมการถดถอยที่ตั้งสมมติฐานขั้น เมื่อพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการตอบสนองที่ถูกตั้งสมมติฐานขึ้นซึ่งถูกแทนด้วยค่าประมาณผลลัพธ์ คือ ฟังก์ชันการตอบสนองจะทำให้สอดคล้องแสดงดังในสมการที่ 19 (นิสา, 2552)

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + \ldots\ldots + b_nX_n \quad (19)$$

สมการดังกล่าวเป็นฟังก์ชันการตอบสนองเชิงเส้นที่ถูกทำให้สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนการตอบสนองที่ต้องการของตัวแปรอิสระ (independent variable) เมื่อฟังก์ชันการตอบสนองที่ถูก ทำให้สอดคล้องได้นำมาสร้างกราฟในลักษณะเป็นฟังก์ชันตัวแปรเชิงปริมาณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างกราฟนี้ เรียกว่า response surface plot หรือ contour maps (นิสา, 2552)

ขั้นตอนการทำ response surface methodology (RSM) (อนุวัตร, 2549)

7.1 เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้างแผนภาพ surface plot คือ factorial in completely randomized design (CRD) หรือ randomized block design (RBD), fractional factorial in CRD หรือ RBD, rotatable design, Central composite design (CCD), Box-Behnken design และ mixture design เป็นต้น

7.2 สร้างสมการ regression ที่ดีที่สุด สร้าง surface plot จากสมการที่หามาได้

7.3 ตรวจสอบ optimization

7.4 Verification โดยทำ independent run ภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว

7.5 ถ้าแบบจำลองไม่เหมาะสม (invalid) ให้สร้างแบบจำลองใหม่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. แผนการทดลองแบบ Central composite design; CCD

เป็นแบบการทดลองที่ดัดแปลงจากแฟคทอเรียลโดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพิ่มจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยโดยที่ลดจำนวนสิ่งทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับการแฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์ ผลที่ได้ คือ สามารถใช้แบบจำลองที่มีอันดับสูงขึ้นได้ เช่น ถ้าใช้ 5^2 factorial (การทดลองที่มี 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 5 ระดับ) ทำการทดลองทั้งหมด 20 สิ่งทดลอง ถึงจะใช้แบบจำลอง quadratic ได้ แต่ใช้ CCD ที่ดัดแปลงจาก 2^2 factorial และเพิ่มจำนวนสิ่งทดลองบางจุด (extra point ที่เรียกว่า star point) เพื่อเพิ่มจำนวนระดับ ของปัจจัยจะได้สิ่งทดลองที่มี 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมี 5 ระดับเหมือนกัน (แต่ไม่ใช่แฟคทอเรียลแบบสมบูรณ์) โดยจะใช้สิ่งทดลองเพียงแค่ 12 สิ่งทดลองก็สามารถใช้แบบจำลอง quadratic ได้เช่นเดียวกัน (อนุวัตร, 2549) การสร้างสิ่งทดลองใน CCD จะสร้าง 3 ส่วน ได้แก่

8.1 จุดที่เป็นหัวมุมของลูกบาศก์ของแฟคทอเรียล 2^n หรือ 2^n

8.2 ส่วนที่เป็นการผสมกัน 2.n ของระดับที่จุดสูงสุดหรือต่ำสุดของแกน ซึ่งบางครั้งเรียกว่า star point หรือ axial point ($\pm\alpha$)

8.3 ส่วนสุดท้าย คือ จำนวนซ้ำ (r) ที่ทำการทดลองที่จุดกึ่งกลาง

ดังนั้นจำนวนสิ่งทดลองจึงมักเป็นผลรวมของทั้ง 3 ส่วน และมักจะศึกษาไม่เกิน 5 ถึง 6 ปัจจัย การคำนวณได้จากสมการที่ 20

$$\alpha = 1^{-(1/2)}.[[(n_c + n_s + r)^{1/2} - n_c^{1/2}]^2 .n_c]^{0.25} \quad (20)$$

โดย n หมายถึง จำนวนสิ่งทดลอง

เช่น ถ้า CCD มีฐานจาก factorial 2^2 ดังนั้น

$n_c = 4$, $n_s = 2n = 4$ และให้ $r = 1$

$$\alpha = 1^{-(1/2)}.[[(4 + 4 + 1)^{1/2} - 4^{1/2}]^2 .4]^{0.25} = 1.414$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อให้ CCD เป็นการทดลองแบบ rotatable design ด้วย กำหนดให้ $\alpha = (n_c)^{1/4}$ แต่ในทางปฏิบัติมักจะกำหนดให้ CCD เป็นการทดลองแบบ rotatable design ซึ่งค่า α ของ CCD ที่ศึกษา 2 และ 3 ปัจจัยมีค่าเท่ากับ 1.414 และ 1.682 ตามลำดับ และทำการทดลองที่จุดกลางเพิ่มเติม เพื่อใช้ประมาณค่าความแปรปรวนของการทดลองตามภาพที่ 5 ซึ่งเป็นแผนภาพการสร้าง rotatable CCD โดยรายละเอียดของสิ่งทดลองแสดงในตารางที่ 1 การคำนวณค่าระดับจริงที่ใช้ในการทดลองใช้สมการในการเปลี่ยนแปลงรหัส แสดงดังในสมการที่ 21 (จรัญ, 2551)

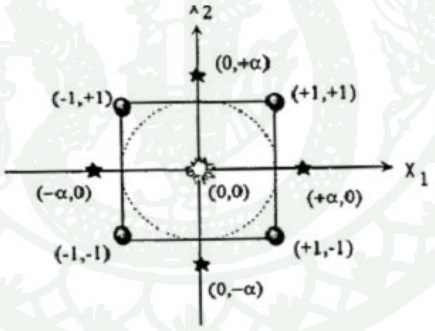
$$C_i = \frac{X_i - X_0}{\triangle X_i} \qquad (21)$$

โดย C_i หมายถึง ค่ารหัสของปัจจัยในการทดลอง

X_i หมายถึง ค่าจริงของปัจจัยในการทดลอง

X_0 หมายถึง ค่าเฉลี่ยของระดับของปัจจัยในการทดลอง

$\triangle X_i$ หมายถึง ค่าช่วงกลางของระดับของปัจจัยในการทดลอง



ภาพที่ 5 สิ่งทดลอง (design point) สำหรับสมการกำลังสอง

ที่มา: อนุวัตร (2549)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 แผนการทดลอง CCD ที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย

ลำดับที่	X_1 (รหัส)	X_2 (รหัส)	X_3 (รหัส)	
1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	+1	
3	-1	+1	-1	
4	-1	+1	+1	สิ่งทดลองที่เป็น 2^2 full factorial
5	+1	-1	-1	
6	+1	-1	+1	
7	+1	+1	-1	
8	+1	+1	+1	
9	$-\alpha$	0	0	
10	0	$-\alpha$	0	
11	0	0	$-\alpha$	สิ่งที่เพิ่มขึ้นมา 2 ปัจจัย
12	$+\alpha$	0	0	
13	0	$+\alpha$	0	
14	0	0	$+\alpha$	
15-20	0	0	0	สิ่งทดลองที่ทำซ้ำตรงจุดกึ่งกลาง

9. การวิเคราะห์สมการถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปในการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งประกอบด้วย ตัวแปรที่สนใจ (dependent variable) และตัวแปรตามที่แทนปัจจัยต่าง ๆ หรือตัวแปรอิสระ (independent variable)

เมื่อพิจารณาว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในลักษณะใดแล้วมาสร้างรูปแบบการถดถอยเพื่อแทนลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสร้างสมการการถดถอย (regression equation) จากรูปแบบที่กำหนด นอกจากนี้สมการถดถอยที่สร้างขึ้นเป็นสมการที่เหมาะสมหรือไม่นั้นจะพิจารณาได้จากค่าสถิติและการทดสอบสมมติฐานของค่าสถิติที่ใช้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรับแล้ว (adjusted coefficient of determination; R^2_{adj}) ส่วนการทดสอบสมมติฐานเป็นการพิจารณาว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว มีอิทธิพลหรือมีส่วนในการอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามหรือไม่ (นวรัตน์, 2548) ในการวิเคราะห์การถดถอยเพียง 1 ตัวแปร เรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (simple regression analysis) ส่วนกรณีที่มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหูคูณ (multiple regression analysis)

9.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว และตัวแปรตาม ซึ่งรูปแบบสมการการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ดังแสดงในสมการที่ 22 (จรัญ, 2551)

$$Y = \beta_0 + \beta_i X + \varepsilon \qquad (22)$$

โดย β_0 หมายถึง ค่าคงที่

β_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรง

ε หมายถึง ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

9.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (multiple linear regression)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่มีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งเขียนสมการการถดถอยเชิงพหูคูณเมื่อมีตัวแปรอิสระ k ตัว ดังแสดงในสมการที่ 23 (จรัญ, 2551)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \varepsilon \qquad (23)$$

โดย β_0 หมายถึง ค่าคงที่

β_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงของตัวแปร X_i

ε หมายถึง ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการถดถอยเชิงพหุคูณเป็นการทดสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($\beta_1, \beta_2, \ldots \beta_k$) มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ซึ่งหากพบว่ามีอย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0 แสดงได้ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง (Y) และตัวแปรอิสระ ($X_1, X_2, .. X_k$) (จรัญ, 2551)

สมสติฐานที่ใช้ทดสอบ คือ

$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$

(ตัวแปรหรือปัจจัยที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์)

$H_1 : \beta_1$ อย่างน้อย 1 ค่าที่ไม่เท่ากับ 0

(มีตัวแปรหรือปัจจัยอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์)

ซึ่งหากยอมรับ H_0 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม แต่หากปฏิเสธ H_0 หมายความว่ามีตัวแปรอิสระ X_j อย่างน้อย 1 ตัว ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แสดงว่าสมการการถดถอยที่สร้างสามารถอธิบายการผันแปรของตัวแปรอิสระได้ (จรัญ, 2551)

9.2.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการการถดถอย

1) normal probability plot ของค่าคลาดเคลื่อน

normal probability plot เป็นการสร้างกราฟที่พล๊อตค่าของข้อมูลที่เกิดขึ้นกับค่าที่คาดไว้ (expected value) ซึ่งถ้าข้อมูลตัวอย่างสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติแล้วค่าที่คาดไว้จะเป็นเส้นตรงและค่าจริงอยู่บริเวณรอบๆ เส้นตรง โดยค่าที่อยู่เหนือเส้นตรง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คือ ค่าจริงมากกว่าค่าที่คาดไว้ ส่วนค่าที่อยู่ใต้เส้นตรง คือ ค่าจริงที่น้อยกว่าค่าที่คาดไว้ใช้ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ (จรัญ, 2551)

2) การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

การทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระหรือความคงที่ของความคลาดเคลื่อนโดยใช้กราฟการกระจาย (scatter plot) ระหว่างค่า regression standardized residual บนแกน Y กับค่า regression predicted value บนแกน X พบว่ามีจุดการกระจายอย่างไม่มีรูปแบบและการกระจายรอบศูนย์แสดงว่ามีค่าการแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่ (จรัญ, 2551)

3) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรทำนายสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ } X_1, X_2, \ldots X_k}{\text{ความแปรผันทั้งหมด}}$$

Hu, (1999) รายงานสมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก (ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใด ๆ ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม ซึ่งค่า R^2 เท่ากับ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์) แต่ข้อเสียของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคือเมื่อ ตัวแปรอิสระเพิ่มขึ้นทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งกรณีที่จำนวนข้อมูลของตัวอย่างที่ศึกษามีน้อย การพิจารณา R^2 อาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะค่า R^2 มีค่าสูงเกินความเป็นจริง ซึ่งการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของค่า R^2 สามารถแก้ไขได้โดยใช้ค่า R^2 adjust แทน โดยถ้าค่า R^2 adjust มีค่ามากกว่า 64 เปอร์เซ็นต์ (> 64) แสดงว่ารูปแบบของสมการเหมาะสม (จรัญ, 2551)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4) การเลือกสมการการถดถอยที่ดีที่สุด

การวิจัยเชิงปริมาณตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษาจะมีหลายตัวแปรสมการถดถอยที่เหมาะสมควรเป็นสมการที่มีตัวแปรอิสระน้อยที่สุดและอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ดีที่สุด ดังนั้นเมื่อมีตัวแปรตามหลายตัวจึงควรเลือกตัวแปรอิสระที่สำคัญ ซึ่งการเลือกตัวแปรอิสระที่สำคัญสามารถทำได้ด้วยวิธีการเลือกสมการการถดถอยแบบต่าง ๆ โดยวิธีการเลือกสมการการถดถอยที่ดีที่สุดที่นิยมใช้ ได้แก่ วิธีการพิจารณาทุกสมการ (all possible regression) วิธีลดตัวแปรอิสระ (backward elimination procedure) วิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระ (forward selection procedure) และวิธีการเพิ่มตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (stepwise procedure) (จรัญ, 2551)

10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yang *et al.* (2010) ศึกษาการย่อยสลายสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 (acid orange 7, AO7) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟต เปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต (Peroxymonosulfate) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขของการกระตุ้นด้วยความร้อน (ช่วง 25-80 องศาเซลเซียส) และแสงอัลตราไวโอเลตที่ 254 นาโนเมตร (nm) ผลการศึกษาในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชั่น พบว่าระดับความร้อนมากกว่า 50 องศาเซลเซียสให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 โดยปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟตในการย่อยสลายอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมา คือ เปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่ 254 นาโนเมตร พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟต มากที่สุด รองลงมา คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเปอร์ออกซีโมโนซัลเฟต

Xu and Li (2010) ศึกษาการย่อยสลายสีอะโซชนิดออเรนท์ จี (orange G, OG) ที่มีความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ด้วยการใช้เปอร์ซัลเฟตกับเฟอร์รัสไอออน โดยภายใต้อิทธิพลค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน อุณหภูมิ และไอออนอนินทรีย์ ได้แก่ คลอไรด์ ไนเตรต (NO_3^-) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และฟอสเฟต ($H_2PO_4^-$) ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออน 4 ต่อ 4 หรือ 1 ต่อ 1 ภายใต้ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5 สามารถย่อยสลายสีอะโซชนิดออเรนท์ จี ในสารละลาย ได้ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลา 30 นาที เมื่อมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนมากขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีอะโซชนิดออเรนท์ จี เพิ่มตาม สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น คือ 313 เคลวิน สำหรับไอออนอนินทรีย์ที่มีอยู่ในสีอะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

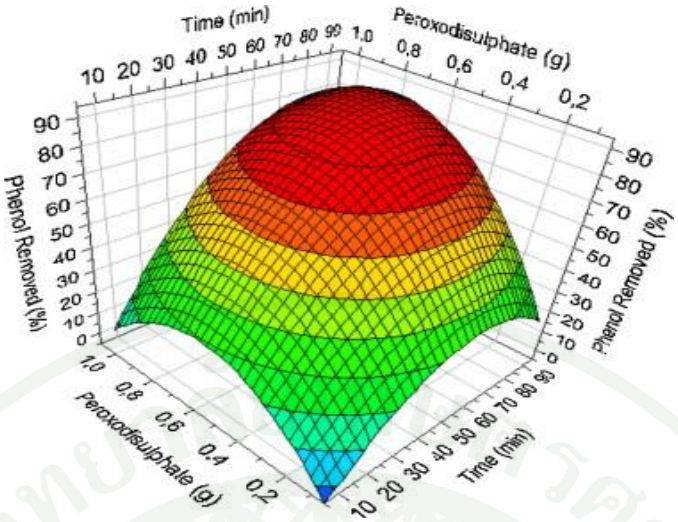
โซชนิดออเรนท์ จี ไปยับยั้งการย่อยสลายสีอะโซชนิดออเรนท์ จี โดยเฉพาะไบคาร์บอเนตรองลงมา คือ ฟอสเฟต คลอไรด์ และไนเตรต ตามลำดับ

Yang *et al.* (2011) ศึกษาการย่อยสลายสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 (acid orange 7 : AO7) ในรูปสารละลาย โดยปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟต ออกซิเดชั่นร่วมกับเม็ดถ่านกัมมันต์ (granular activated carbon; GAC) ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยอนุมูลอิสระของซัลเฟตที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชั่น เข้าไปรวมตัวอยู่ใกล้กับบริเวณพื้นผิวของเม็ดถ่านกัมมันต์ โดยเม็ดถ่านกัมมันต์ทำหน้าที่ในการดูดซับสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 ได้บางส่วน ขณะที่อนุมูลอิสระของซัลเฟตช่วยย่อยสลายโครงสร้างของสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 ได้อีกส่วนหนึ่ง เมื่อมีปริมาณของเปอร์ซัลเฟตและเม็ดถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น สามารถย่อยสลายสีอะโซอิคชนิดออเรนท์ 7 ได้สูง นอกจากนี้เม็ดถ่านกัมมันต์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

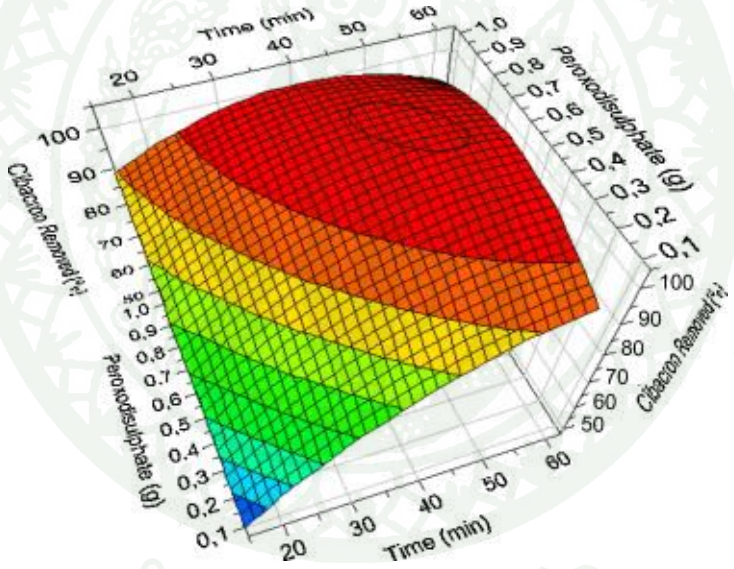
Li and Hu (2011) ศึกษาการย่อยสลายสีย้อมชนิดเอซิโครม บลู เค (acid chrome blue K; ACBK) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ในสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ และอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมชนิดเอซิโครม บลู เค 70 เปอร์เซ็นต์

Yeber *et al.* (2010) ศึกษาจุดที่เหมาะสมการย่อยสลายสี cibacron brilliant yellow 3 (CBY-3) และ 3,4-dichlorophenal โดยกระบวนการออกซิเดชั่นของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเลต ด้วยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิว ผลการศึกษาพบว่าในระยะเวลา 40 นาที ที่ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.4 กรัม สามารถย่อยสลายสี 3,4-dichlorophenal ได้มากที่สุด ขณะที่โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.5 กรัม จะเหมาะสมกับสี cibacron brilliant yellow 3 ซึ่งการศึกษานี้ใช้แผนภาพคอนทัวร์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย ดังแสดงรายละเอียดภาพที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 6 ผลของจุดสภาวะที่เหมาะสมแบบพื้นที่ผิวตอบสนองของการทดลอง
(ก) สี3,4 dichlorophenal (ข) สี cibacron brilliant yellow 3 (CBY-3)

ที่มา: Yeber *et al.* (2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

1.1 เครื่องชั่งสารไฟฟ้าแบบละเอียดความถูกต้อง $\pm$0.0001 กรัม (analytic balance)

1.2 เครื่องเขย่าสาร (shaker)

1.3 เครื่องเหวี่ยงสารละลาย (centrifuge)

1.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

1.5 ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 25, 50, 100, 250, 500 และ 1,000 มิลลิลิตร

1.6 บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 25, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิลิตร

1.7 กระบอกตวง (graduated cylinder) ขนาด 10, 50 และ 100 มิลลิลิตร

1.8 กระดาษชั่งสาร (weighting papers)

1.9 หลอดปั่นเหวี่ยง (centrifuge tube) ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.10 หลอดหยดสาร (dropper)

1.11 ช้อนตักสาร (spatula)

1.12 แท่งแก้วคน (stirring rod)

1.13 ไมโครปิเปตต์ (Micro pipette) ขนาด 0.5 และ 1 มิลลิลิตร

1.14 ขวดฉีดน้ำกลั่น (wash bottle)

1.15 อุปกรณ์เบ็ดเตล็ด ได้แก่ หนังยาง ถุงมือ กระดาษชำระ ฯลฯ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. สารเคมี

2.1 สีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค 5 (Reactive Black 5)

2.2 โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($Na_2S_2O_8$)

2.3 ผงเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (Zero valent ion)

2.4 เฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$)

2.5 เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4.7H_2O$)

2.6 ผงซิลเวอร์นาโน (Ag^0)

2.7 ซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$)

2.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

2.9 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc.H_2SO_4)

2.10 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

2.11 น้ำกลั่น

3. เครื่องมือวิเคราะห์

เครื่อง UV-Spectrophotometer รุ่น SHIMADZU UV-1700

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

1. การศึกษาข้อมูลและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการ และพัฒนางานวิจัยให้สามารถนำไปปรับใช้ในจริงในการกำจัดสีย้อมสังเคราะห์ในระดับอุตสาหกรรมได้ เช่น การหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นมาใช้ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

2. การเตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

ละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์น้ำหนัก 1 กรัม (g) ใส่ลงในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร (mL) ได้สารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)

3. การศึกษาการดูดกลืนแสงและค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

3.1 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

นำสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร (Satapanajaru *et al.*, 2010) และจดบันทึกค่าที่วัดได้ ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของการศึกษา

3.2 วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

นำสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวัดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การศึกษาทดลองการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นเบื้องต้น (Prelimination experiment)

ย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออน 200 มิลลิโมลาร์ต่อ 1 มิลลิโมลาร์ ซึ่งสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนที่ใช้ในการศึกษานี้ดัดแปลงจากการศึกษาของ Xu and Li. (2010) โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 หลอด เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 96 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 30 นาที และ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ นำตัวอย่างที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร นำค่าที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เหลืออยู่ และคำนวณหาค่าคงที่อัตราของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (degradation kinetic rate constant : k)

5. การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยกระบวนการออกซิเดชั่นของเปอร์ซัลเฟต

5.1 ศึกษาความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

ย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ปริมาตร 10 มิลลิลตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ กับการเติมเฟอร์รัสไอออน ที่ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4 และผลของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีที่สุด ถูกนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.2 ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น ที่มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต

นำความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ดีที่สุดจากการศึกษาข้อที่ 5.1 มาทำการทดลองการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมเฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4 และความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ถูกย่อยสลายโดยเปอร์ซัลเฟตดีที่สุด ถูกนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

5.3 ศึกษาสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อของเฟอร์รัสไอออนในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

นำเฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ลงในหลอดที่มีสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมเปอร์ซัลเฟตที่ปริมาณความเข้มข้นจากการทดลองที่ 5.1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4 ซึ่งผลของสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีที่สุดไปใช้ในการศึกษาต่อไป

5.4 ศึกษาสภาวะความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเป็น 5, 7, 9 และ 11 ด้วยกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ ตวงสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เตรียม 10 มิลลิลิตร เติมเปอร์ซัลเฟตต่อตัวเร่งตามสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีที่สุด ซึ่งได้จากการศึกษาที่ 5.3 ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.5 ศึกษาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ซึ่งจำแนกเป็น 2 ชนิด คือ ตัวเร่งที่เป็นสารละลาย ได้แก่ สารละลายเฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน และซิลเวอร์ไอออน และตัวเร่งที่เป็นของแข็ง ได้แก่ ผงเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และผงซิลเวอร์นาโน

5.5.1 ชนิดของตัวเร่งที่เป็นสารละลาย

เติมสารละลายเฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน และซิลเวอร์ไอออน ตามสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาที่ 5.3 ลงในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4

5.5.2 ชนิดของตัวเร่งที่เป็นของแข็ง

เติมเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และซิลเวอร์นาโนตามสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการศึกษาที่ 5.3 ลงในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4

5.6 ศึกษาผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นและตัวเร่งปฏิกิริยา

5.6.1 ศึกษาผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อการใช้เปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออน

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เตรียม 10 มิลลิลิตร เติมสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีที่สุด จากการศึกษาที่ 5.5 ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4

5.6.2 ศึกษาผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อกระบวนการเปอร์ซัลเฟตและเหล็กวาเลนท์ศูนย์

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร นำสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ที่เตรียม 10 มิลลิลิตร เติมสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์ที่มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีที่สุด จากการศึกษาที่ 5.5 ทำซ้ำจำนวน 3 หลอด จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 4

6. การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ที่คงเหลือ และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

6.1 คำนวณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่คงเหลือ

หลังจากการเก็บตัวอย่างสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เวลาต่าง ๆ นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ผ่านการวัดด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร มาเทียบค่ากับกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ภาคผนวก ข) และคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์คงเหลือ ตามสมการที่ 24

$$C = C_0 - C_t \quad (24)$$

โดย C หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เหลือ

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

C_t หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ณ เวลาหนึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2 คำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

นำค่าความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์คงที่เหลือมาคำนวณหาความเข้มข้นสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ตามสมการที่ 25

$$\text{เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (25)$$

โดย C หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เหลือ

C_0 หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

C_t หมายถึง ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ณ เวลาหนึ่ง

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เปรียบเทียบผลของการศึกษาด้วยวิธี DMRT (Duncan multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรมทางสถิติ

8. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยวิธีตอบสนองพื้นที่ผิว (RSM)

8.1 วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง

แผนการทดลองสำหรับการหาพื้นผิวตอบสนองนั้นมีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์กับกลุ่มของปัจจัยที่ศึกษา ในการศึกษาครั้งนี้ได้ออกแบบการทดลองแบบ central composite design ที่มี 3 ปัจจัย ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8.1.1 จำนวนจุดของ factorial point มีจำนวนเท่ากับ 2(k) โดยแต่ละปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย จะทำการทดลอง 2 ระดับ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ -1 แทนระดับต่ำ และ +1 แทนระดับสูง ดังนั้น การทดลองสำหรับ factorial point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$(X_1, X_2, X_3) = (\pm 1, \pm 1, \pm 1)$$

8.1.2 จำนวนจุดของ center point (n_o) ต้องมีการทำซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อคำนวณหา pure error ในการวิเคราะห์ การทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ การทดลองสำหรับ center point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

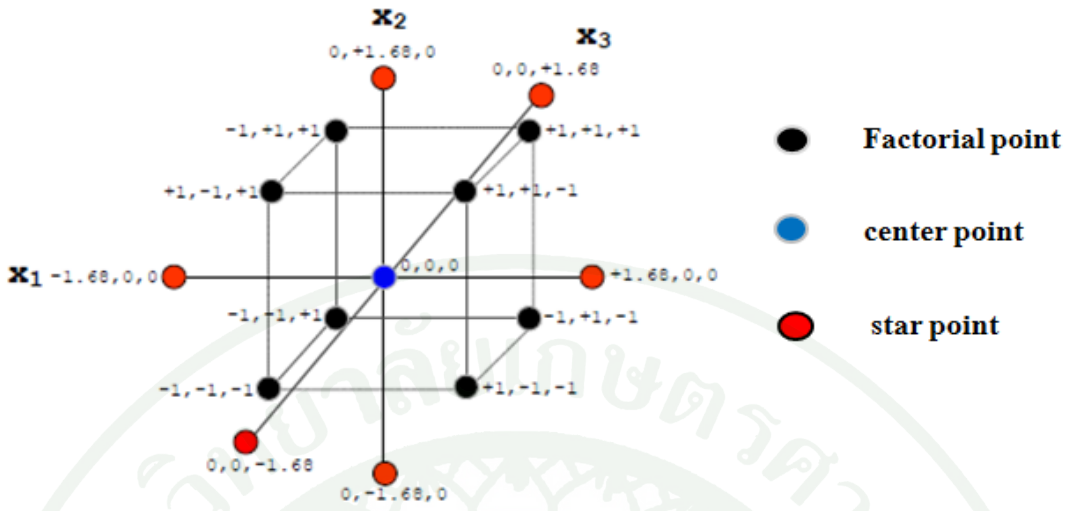
$$(X_1, X_2, X_3) = (0, 0, 0)$$

8.1.3 จำนวนจุดของ star point มีจำนวนเท่ากับ 2(k) โดยแต่ละจุดห่างจาก center point ด้วยระยะเท่ากันคือระยะ α โดย $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ เมื่อศึกษา 3 ปัจจัยจึงมีค่า α เท่ากับ ±1.68 การทดลองสำหรับ star point สามารถเขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$(X_1, X_2, X_3) = (\pm 1.68, \pm 1.68, \pm 1.68)$$

สามารถออกแบบจำนวนชุดการทดลองได้จาก $2k + 2k + n_0$ เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปรที่ต้องการศึกษา และ n_0 คือ จ้านวนซ้ำการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (center point) ดังนั้นเมื่อศึกษา 3 ปัจจัย จึงเท่ากับ 2(3) + 2(3) + 8 สามารถออกแบบการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ซึ่งแต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบ central composite design ที่มี 3 ปัจจัย

ที่มา: จรัญ, 2551

การศึกษาปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาศึกษาปัจจัยต่าง ๆที่มีประสิทธิภาพต่อการย่อยสลาย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยในการศึกษานี้ได้ใช้รูปแบบการทดลองแบบ CCD โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, +1, $+\alpha$) ซึ่งสามารถกำหนดค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ผ่านการคำนวณโดยสมการที่ 21 ได้ดังนี้ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 232, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนและความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์มีค่าเป็น 0, 2, 4, 8 และ 10 มิลลิโมลาร์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 3, 5, 6, 9 และ 10 ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 สำหรับแบบแผนการทดลอง central composite design ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งมีจำนวนชุดการทดลองทั้งสิ้น 20 ชุดการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 และ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 2 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยวิธี CCD

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.68	-1	0	1	+1.68
X_1 ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต	232	300	400	500	568
X_2 ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน	0	2	4	8	10
X_3 ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น	3	5	6	9	10

ตารางที่ 3 การกำหนดช่วงของปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น โดยวิธี CCD

X_i ปัจจัยที่ต้องการศึกษา	ระดับ				
	-1.68	-1	0	1	+1.68
X_1 ความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต	232	300	400	500	568
X_2 ปริมาณผงเหล็กวาเลนท์ศูนย์	0	2	4	8	10
X_3 ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น	3	5	6	9	10

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 แผนการทดลองแบบ CCD ในการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลำดับที่	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	300	2	5	
2	-1	-1	+1	300	2	9	
3	-1	+1	-1	300	8	5	
4	-1	+1	+1	300	8	9	สิ่งทดลองที่เป็น
5	+1	-1	-1	500	2	5	2^2 full factorial
6	+1	-1	+1	500	2	9	
7	+1	+1	-1	500	8	5	
8	+1	+1	+1	500	8	9	
9	-1.682	0	0	232	4	6	
10	0	-1.682	0	400	0	6	
11	0	0	-1.682	400	4	3	สิ่งที่เพิ่มขึ้นมา
12	+1.682	0	0	568	4	6	2 ปัจจัย
13	0	+1.682	0	400	10	6	
14	0	0	+1.682	400	4	10	
15-20	0	0	0	400	4	6	สิ่งทดลองที่ทำซ้ำ ตรงจุดกึ่งกลาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 แผนการทดลองแบบ CCD ในการศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นเปอร์ซัลเฟต เหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลำดับที่	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	300	2	5	
2	-1	-1	+1	300	2	9	
3	-1	+1	-1	300	8	5	
4	-1	+1	+1	300	8	9	สิ่งทดลองที่เป็น
5	+1	-1	-1	500	2	5	2^2 full factorial
6	+1	-1	+1	500	2	9	
7	+1	+1	-1	500	8	5	
8	+1	+1	+1	500	8	9	
9	-1.682	0	0	232	4	6	
10	0	-1.682	0	400	0	6	
11	0	0	-1.682	400	4	3	สิ่งที่เพิ่มขึ้นมา
12	+1.682	0	0	568	4	6	2 ปัจจัย
13	0	+1.682	0	400	10	6	
14	0	0	+1.682	400	4	10	
15-20	0	0	0	400	4	6	สิ่งทดลองที่ทำซ้ำ ตรงจุดกึ่งกลาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ตามแบบการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ 20 การทดลอง หลังจากการเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์คงเหลือ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้การหาสมการการถดถอยเชิงพหุคูณ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ และปัจจัยที่นำมาศึกษาทั้ง 3 ปัจจัยโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ และตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองที่ได้จากทำนายค่าของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยใช้การหาพื้นผิวตอบสนองด้วยโปรแกรมทางสถิติ

8. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการ อาคารทวีญาณสุคนธ์ ชั้น 10 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

9. ระยะเวลาที่ทำการวิจัย

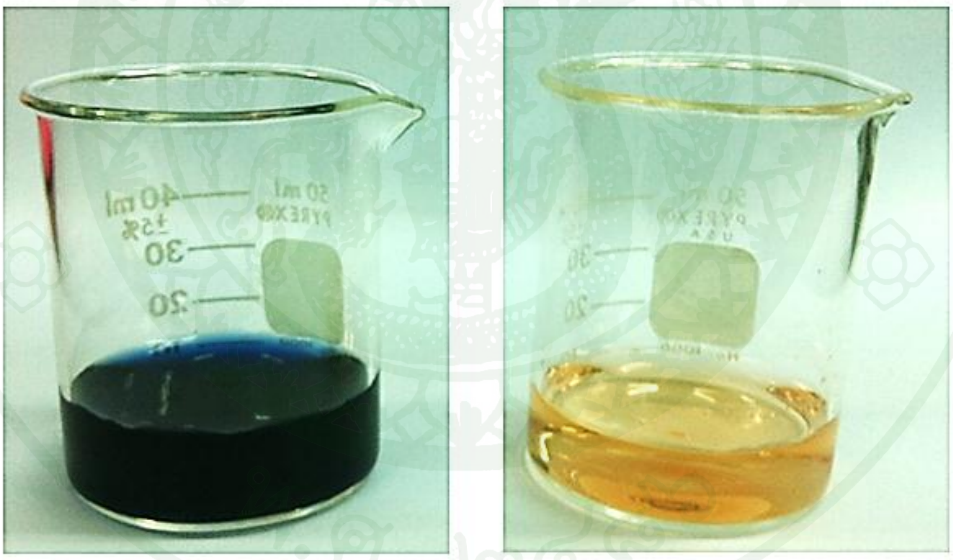
เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2555 ถึง เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นเบื้องต้น

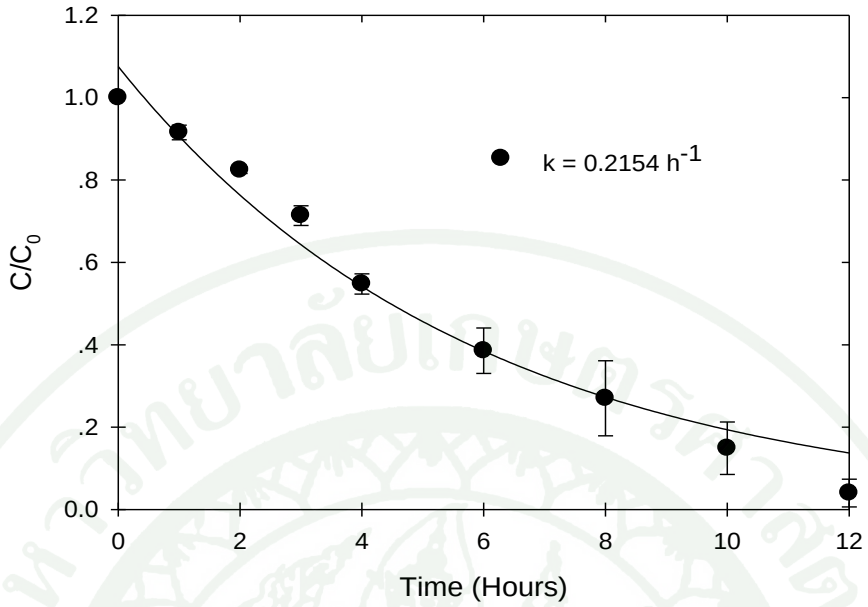
ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์โดยมีเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าในระยะเวลา 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.2154 ชั่วโมง$^{-1}$ (h^{-1}) ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ สามารถย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้จึงนำสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่ 200 ต่อ 1 มาใช้เป็นสัดส่วนสารเคมีเริ่มต้นสำหรับการศึกษาต่อไป



(ก) (ข)

ภาพที่ 8 ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ก) ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น (ข) ความเข้มของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สุดท้ายที่ 12 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



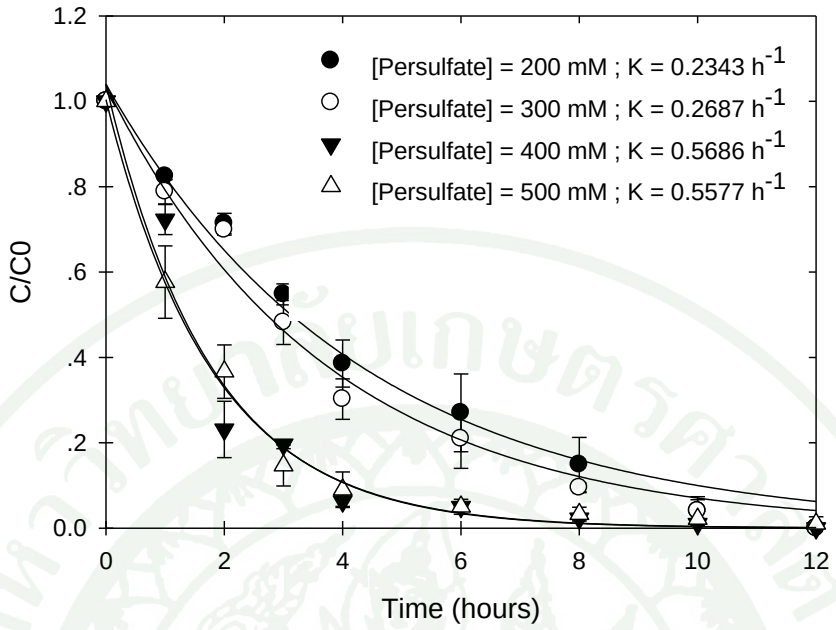
ภาพที่ 9 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เบื้องต้น โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

2.1 ผลของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

การศึกษาการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ โดยมีเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่าอัตราค่าคงที่ของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในระยะเวลา 12 ชั่วโมงเท่ากับ 0.2343, 0.2687, 0.5686 และ 0.5577 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 10โดยที่เวลา 4 ชั่วโมงพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีย้อม มีค่าเป็น 67, 79, 94 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 10 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 200, 300, 400 และ 500 มิลลิโมลาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยาคือเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (มิลลิโมลาร์)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ที่ระเวลา 4 ชั่วโมง)
200	67 ± 0.02
300	79 ± 0.05
400	94 ± 0.01
500	90 ± 0.05

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค ไฟท์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตจาก 200 มิลลิโมลาร์ ถึง 400 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ทำให้แตกตัวเกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟตมากขึ้นและเข้าไปออกซิไดซ์สีย้อมได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมลดลง (Liang *et al*., 2008; Xu and Li., 2010) ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตมากกว่า 400 มิลลิโมลาร์พบว่าไม่ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีขึ้นแต่กลับทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายลดลง เหตุผลมาจากอนุมูลอิสระของซัลเฟตที่เกิดจากกระบวนเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นมีมากเกินพอ ทำให้อนุมูลอิสระของซัลเฟตเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเองหรืออนุมูลอิสระของซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต (Liang *et al*., 2008) แสดงดังสมการที่ 26 และ 27 ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระของซัลเฟตกับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ จึงมีผลทำให้อนุมูลอิสระของซัลเฟตทำการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้น้อยลง ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Xu and Li. (2010) ที่ศึกษาในสีออเรนจ์จี; Yang *et al*. (2011) ที่ศึกษาในสีเอซิดออเรนจ์ 7

$$SO_4^{-}\bullet + SO_4^{-}\bullet \longrightarrow 2SO_4^{2-} \quad (26)$$

$$SO_4^{-}\bullet + S_2O_8^{2-} \longrightarrow S_2O_8^{2-} + SO_4^{2-} \quad (27)$$

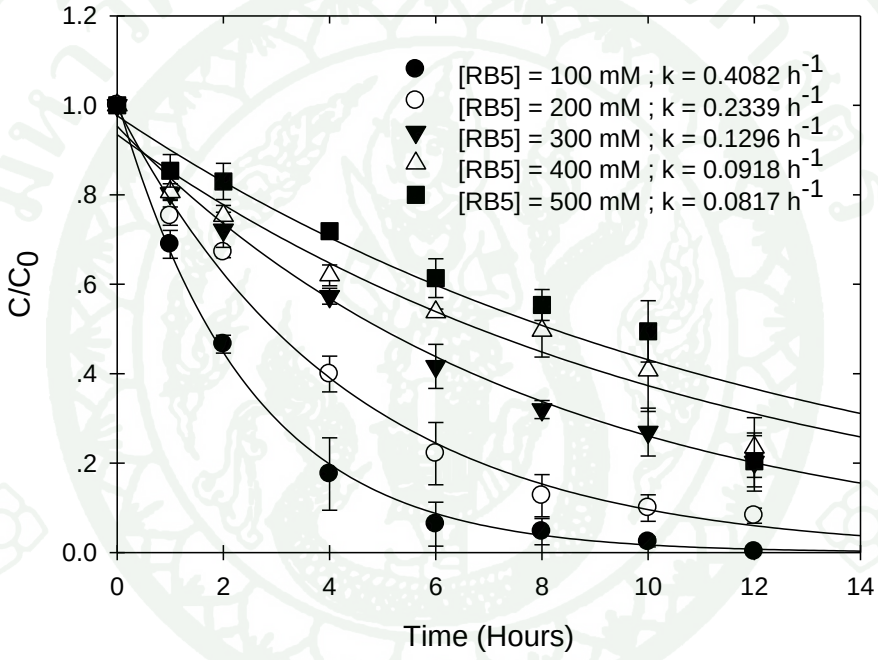
ดังนั้นการเลือกใช้เปอร์ซัลเฟตในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ควรเลือกใช้ความเข้มข้นให้เหมาะสมเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งการศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมกับการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ที่ 400 มิลลิโมลาร์ซึ่งจะนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

2.2 ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้นที่มีผลต่อความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต

ผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 400 มิลลิโมลาร์ (จากผลการศึกษาที่ 2.1) กับเฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1 มิลลิโมลาร์ พบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าเป็น 0.5797, 0.2339, 0.1296, 0.0918 และ 0.0817 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ แสดงดังในภาพที่ 11 และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ที่เวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4 ชั่วโมง พบว่ามีค่าเป็น 82, 60, 43, 38 และ 28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 7 จากผลการศึกษาเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการย่อยสลายโดยเปอร์ซัลเฟต เมื่อความเข้มข้นของสารสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงขึ้น พบว่าอัตราการย่อยสลายของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ลดลง เนื่องจากอนุมูลอิสระของซัลเฟตสำหรับการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ไม่เพียงพอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Devi *et al*.(2009) และ Li and Hu (2009) ที่ทำการศึกษาในสีเมธิลออเรนจ์ และสีเอซิดโครมบลูเค สำหรับสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้นต่ำจะถูกย่อยสลายโดยเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 400 มิลลิโมลาร์ ได้อย่างดี



ภาพที่ 11 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

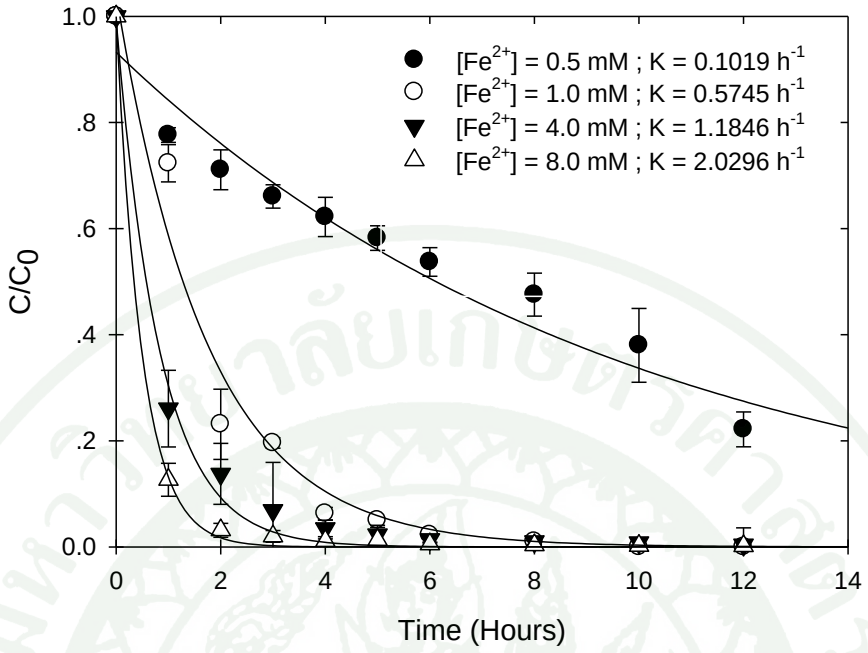
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง)
100	82 ± 0.08
200	60 ± 0.04
300	43 ± 0.02
400	38 ± 0.02
500	28 ± 0.01

2.3 สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตกับความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์ กับความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ ผลการศึกษาพบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 12 ชั่วโมงมีค่าเป็น 0.1019, 0.5745, 1.1846 และ 2.0296 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 12 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เวลา 4 ชั่วโมง มีค่าเป็น 46, 77, 93 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน (มิลลิโมลาร์)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง)
0.5	46 ± 0.08
1	77 ± 0.01
4	96 ± 0.09
8	98 ± 0.01

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เฟอร์รัสไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นเพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟตแสดงดังสมการที่ 28 ซึ่งมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Antoniou *et al.,* 2010; Chen *et al.,* 2009; Xu *et al.,* 2010;) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen *et al.* (2009) อย่างไรก็ตามหากเติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณสูงเกินไปจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟตในระบบมากเกินพอและอนุมูลอิสระของซัลเฟตอาจทำปฏิกิริยากันเอง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นในสมการที่ 26 หรืออนุมูลอิสระของซัลเฟตทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนแทนที่ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ซัลเฟตไอออน (Mcelroy *et al.,* 1990; Xu *et al.,* 2010) แสดงดังสมการที่ 29 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารอินทรีย์ลดลง (Liang *et al.,* 2004; Kim *et al.,* 2009; Yang *et al.,* 2011)

$$Fe^{2+} + S_2O_8^{2-} \longrightarrow Fe^{3+} + SO_4^{-}\bullet + SO_4^{2-} \quad (28)$$

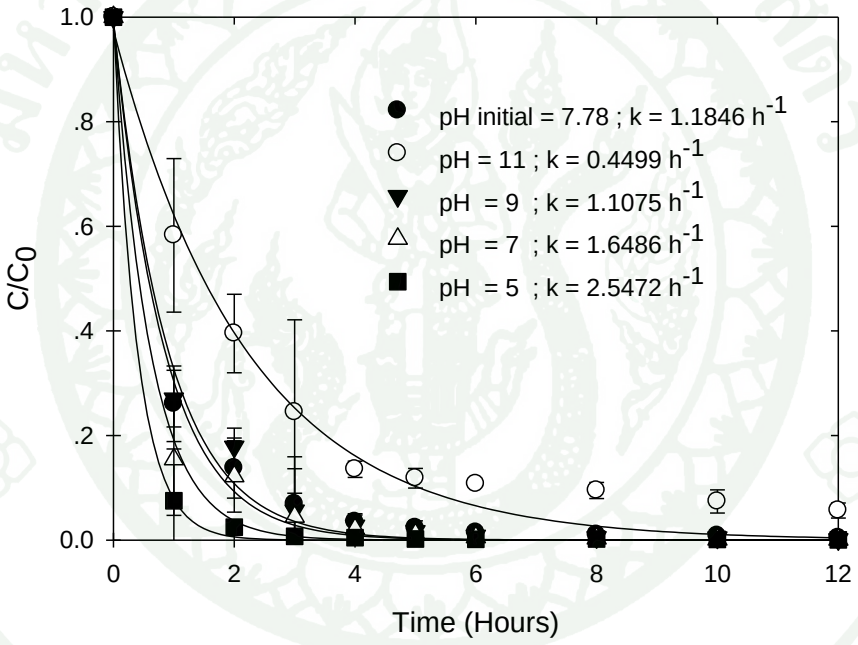
$$Fe^{2+} + SO_4^{-}\bullet \longrightarrow Fe^{3+} + SO_4^{2-} \quad (29)$$

ดังนั้นการนำเฟอร์รัสไอออนมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นจึงควรใช้ในปริมาณที่ให้เพียงพอต่อการเร่งปฏิกิริยาโดยไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณมากจนเกินไป สำหรับการใช้เฟอร์รัสไอออนในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมคือ 4 มิลลิโมลาร์ เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่เวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมที่มีการใช้เฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์มีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กับการใช้เฟอร์รัสไอออนความเข้มข้น 8 มิลลิโมลาร์ ดังนั้นสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรจึงเท่ากับ 400 ต่อ 4 หรือ 100 ต่อ 1 ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวนี้ถูกนำไปใช้กับการศึกษาต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 สภาวะความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อกระบวนการปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

ผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟตที่ 400 ต่อ 4 พบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าเป็น 2.5472, 1.6486, 1.1075 และ 0.4499 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 13 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเท่ากับ 99, 96, 94 และ75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังในตารางที่ 9



ภาพที่ 13 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง)
5	99 ± 0.00
7	96 ± 0.04
9	94 ± 0.08
11	75 ± 0.17

แนวโน้มค่าคงที่อัตราของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เพิ่มขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดมากกว่าในสภาวะที่เป็นด่าง เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายในการศึกษานี้พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้นที่อยู่ในช่วง 5 ถึง 9 พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากเปอร์ซัลเฟตที่เติมลงไปในน้ำมีการปลอดปล่อยโปรตอน (H^+) ออกมา (Stylidi *et al*., 2003; Stylidi *et al*., 2004) แสดงดังในสมการที่ 30 ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบถูกปรับลดลงจนมีสภาวะเป็นกรด (ดังภาคผนวก ข) และสนับสนุนให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นได้ดี แต่สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 11 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างมีการปรับลดลงได้น้อยกว่า คาดว่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่เติมลงไปไม่เพียงพอต่อการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 11 ให้ลดต่ำลงจนมีสภาวะความเป็นกรดได้ทำให้สีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ยังคงอยู่ในสภาวะความเป็นด่าง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์จึงอยู่ในระดับต่ำกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีสภาวะเป็นกรด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu (2008) ที่กล่าวไว้ว่าในสภาวะกรดมีปริมาณโปรตอนละลายในน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งโปรตอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟตเกิดเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว แสดงดังในสมการที่ 31 และ 32 ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$2S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \longleftrightarrow 4SO_4^{2-}{}_{(aq)} + O_{2\,(aq)} + H^+{}_{(aq)} \quad (30)$$

$$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + H^+{}_{(aq)} \longrightarrow HS_2O_8^-{}_{(aq)} \quad (31)$$

$$HS_2O_8^-{}_{(aq)} \longrightarrow SO_4^{2-}{}_{(aq)} + H^+{}_{(aq)} + SO_4^{-}\bullet_{(aq)} \quad (32)$$

เมื่อมีสภาวะความเป็นด่างสูงมีไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายเป็นจำนวนมาก ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน ที่ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นสารประกอบของเหล็กไฮดรอกไซด์ แสดงดังสมการที่ 33 ถึง 36 โดยสารประกอบของเหล็กไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทำให้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารปนเปื้อนลดลงตามไปด้วย (Xu and Li 2010)

$$Fe^{2+}{}_{(aq)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow FeOH^+{}_{(aq)} + H^+{}_{(aq)} \quad (33)$$

$$Fe^{3+}{}_{(aq)} + H_2O_{(l)} \longrightarrow FeOH^{2+}{}_{(aq)} + H^+{}_{(aq)} \quad (34)$$

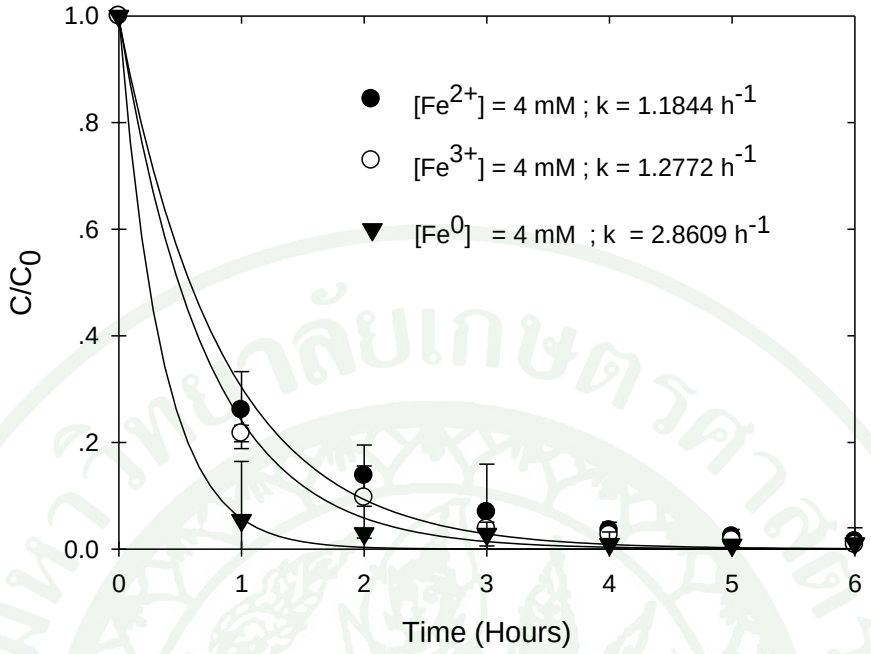
$$Fe^{3+}{}_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \longrightarrow FeO(OH)^{2+}{}_{(aq)} + 2H^+{}_{(aq)} \quad (35)$$

$$2Fe^{3+}{}_{(aq)} + 2H_2O_{(l)} \longrightarrow Fe_2(OH)_2^{4+}{}_{(aq)} + 2H^+{}_{(aq)} \quad (36)$$

2.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยเฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ เท่ากับ 1.1844, 1.2772 และ 2.8609 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยที่เหล็กวาเลนท์ศูนย์มีประสิทธิภาพย่อยสลายดีที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตัวเร่งของเฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์

การที่เหล็กวาเลนท์ศูนย์มีประสิทธิภาพสูงในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ เนื่องจากเหล็กวาเลนท์ศูนย์เกิดกระบวนการออกซิเดชั่นขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรดหรือทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งเมื่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เกิดกระบวนการออกซิเดชั่นจะเกิดการถ่ายเทอิเล็กตอนออกมา ทำให้เกิดเป็นเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออนออกมาอย่างต่อเนื่อง (Zhao *et al.*, 2010) โดยเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออนที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้อย่างต่อเนื่องเช่นกัน (Rao *et al*., 1995; Oh *et al*., 2010) แสดงดังในสมการที่ 37 ถึง 39 นอกจากนี้อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนออกซิเดชั่นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์สามารถทำลายโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง (Satapanajaru *et al*., 2011) ทำให้อนุมูลอิสระของซัลเฟตที่มีอยู่ในระบบทำการย่อยสลายโมเลกุลของสีได้ง่ายยิ่งขึ้น ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีกว่าการใช้เฟอร์รัสไอออนและเฟอร์ริกไอออน อย่างไรก็ดีการใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์แทนการใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \bullet 7H_2O$) และเฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) เป็นการหลีกเลี่ยงการเติมไอออนลบเข้าไป ทำให้ลดปริมาณของสารตกค้างที่เหลืออยู่ในระบบได้ (Xu and Li, 2010; Zhao *et al.*, 2010)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + Fe^0{}_{(s)} \xrightarrow{\text{Acidic pH}} 2SO_4^{2-}{}_{(aq)} + Fe^{2+}{}_{(aq)} \quad (37)$$

$$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + Fe^{2+}{}_{(aq)} \longrightarrow Fe^{3+}{}_{(aq)} + SO_4^{2-}{}_{(aq)} + SO_4^{-}\bullet_{(aq)} \quad (38)$$

$$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + Fe^{3+}{}_{(aq)} \longrightarrow Fe^{2+}{}_{(aq)} + SO_4^{2-}{}_{(aq)} + SO_4^{-}\bullet_{(aq)} \quad (39)$$

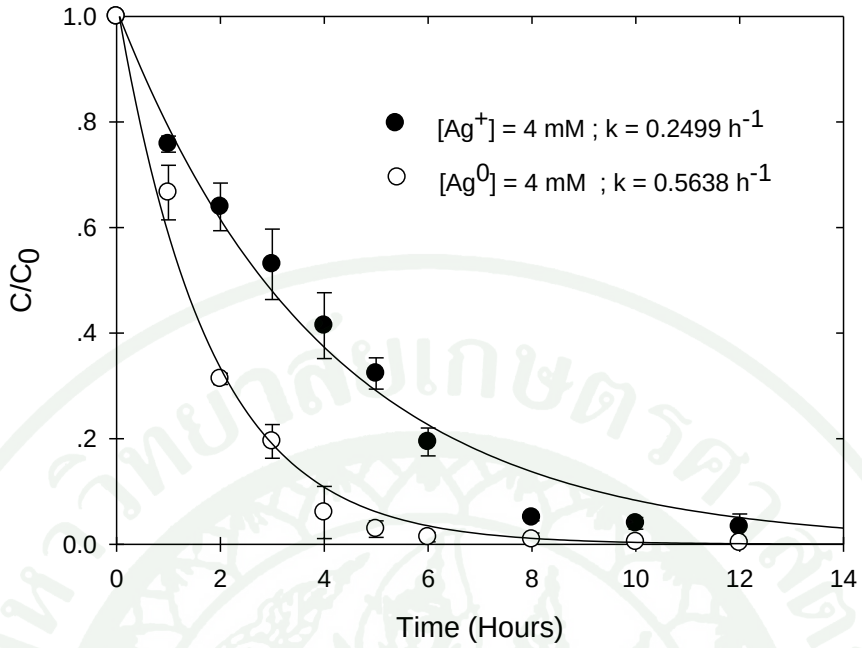
เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ด้วยการใช้เฟอร์ริกไอออนและเฟอร์รัสไอออนในการเร่งปฏิกิริยา พบว่าทั้งสองชนิดนี้มีอัตราการย่อยสลายสีย้อมที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาของ Dionysiou and Anipsitakis (2004) พบว่าซิลเวอร์นาโนและซิลเวอร์ไอออนมีประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นได้เป็นอย่างดี สำหรับผลการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาของซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออนในครั้งนี้ พบว่าซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้ดีกว่าซิลเวอร์ไอออน ดังแสดงในภาพที่ 15 เนื่องจากซิลเวอร์นาโนมีคุณลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กวาเลนท์ศูนย์ เมื่อซิลเวอร์นาโนอยู่ในสภาวะกรดหรือทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นซิลเวอร์ไอออนอย่างต่อเนื่อง แสดงดังในสมการที่ 40 และ 41 (Gemeray *et al*., 2007; Antoniou *et al*., 2010) ซึ่งซิลเวอร์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมได้ดี ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการออกซิเดชั่นของซิลเวอร์นาโนสามารถทำลายโครงสร้างของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ทำให้โครงสร้างของสีมีขนาดเล็กลง อนุมูลอิสระของซัลเฟตจึงย่อยสลายสีย้อมได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้การที่ใช้ซิลเวอร์นาโนแทนซิลเวอร์ไนเตรตก็เป็นการลดไอออนลบได้เช่นกัน

$$Ag^0{}_{(s)} \longrightarrow Ag^+{}_{(aq)} + e^- \quad (40)$$

$$S_2O_8^{2-}{}_{(aq)} + Ag^+{}_{(aq)} \longrightarrow Ag^{2+}{}_{(aq)} + SO_4^{2-}{}_{(aq)} + SO_4^{-}\bullet_{(aq)} \quad (41)$$

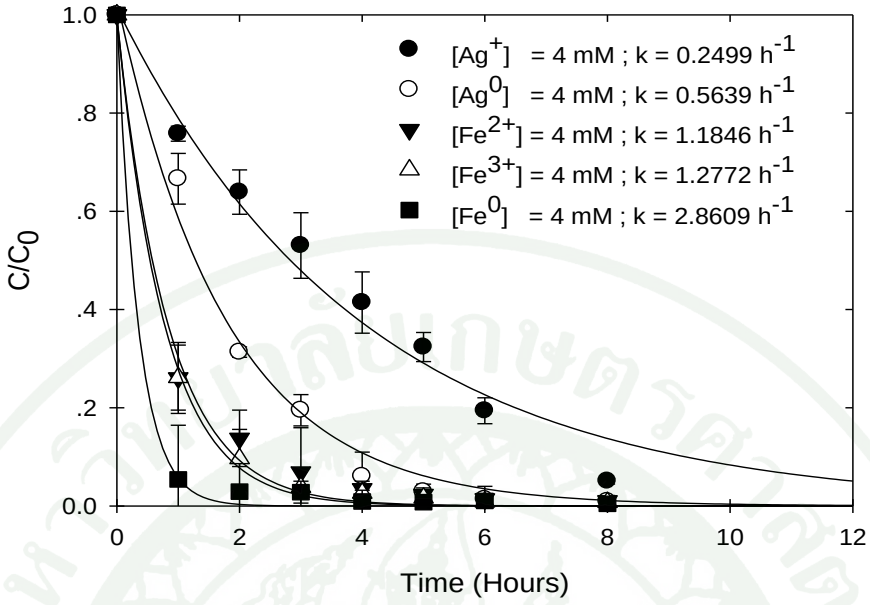
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 15 อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตัวเร่งของซิลเวอร์ไอออน และซิลเวอร์นาโน และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นโดยส่วนใหญ่ที่นิยมคือเฟอรัสไอออน เนื่องจากเป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษ และพบได้ในธรรมชาติโดยทั่วไป อีกทั้งใช้งานง่ายและมีราคาถูก (Liang *et al*., 2004; Zhao *et al*., 2010; Ruhl *et al*., 2012) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในภาพรวมทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เหล็กวาเลนท์ศูนย์ ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออนต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมา คือ เฟอร์ริกไอออน เฟอร์รัสไอออน ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 16

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เหล็กวาเลนท์ศูนย์ ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์

2.6 ผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น

ในกระบวนการย้อมสีโดยทั่วไปมักจะมีการเติมเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ลงไปปริมาณมากเนื่องจากสีย้อมผ้าส่วนมากมีประจุลบ การเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปจะเป็นการเพิ่ม ionic strength ของน้ำช่วยลดแรงตึงผิวทำให้สีย้อมสามารถเข้าสู่เส้นใยผ้าได้ดีขึ้น จากการที่เติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปเกิดไอออนอนินทรีย์ละลายน้ำ คือ คลอไรด์ไอออนปริมาณมาก ซึ่งความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนโดยเฉลี่ยในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมสีย้อมอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Vishnu *et al*., 2008) อาจมีผลต่อกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น สำหรับการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำการศึกษาความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ที่มีผลต่อเปอร์ซัลเฟตร่วมกับการใช้ตัวเร่ง 2 ชนิด คือ เฟอร์รัสไอออนซึ่งเป็นตัวเร่งที่นิยมใช้ และเหล็กวาเลนท์ศูนย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.6.1 ผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อการใช้เปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออน

ผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออน 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟตที่ 400 ต่อ 4 พบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 12 ชั่วโมงมีค่าเป็น 1.1846, 0.3132, 0.2360, 0.2129 และ 0.1972 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 17 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ที่เวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 93, 57, 51, 48 และ45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 10 จากผลการทดลองแสดงเห็นได้ว่า แนวโน้มของอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ลดลง เมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนมากขึ้น เนื่องจากคลอไรด์ไอออนที่มีอยู่ในระบบจะเข้าไปขัดขวางการย่อยสลายสีย้อม โดยคลอไรด์ไอออนทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้เป็นอนุมูลอิสระของคลอไรด์ ดังแสดงในสมการที่ 42 และอนุมูลอิสระของคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองและทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไอออนที่เหลืออยู่ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับมาเป็นคลอไรด์ไอออนดังเดิม ดังแสดงในสมการที่ 43 ถึง 44 (Huie *et al.*, 199; Buxton *et al*., 1999; Chenju *et al*., 2006)

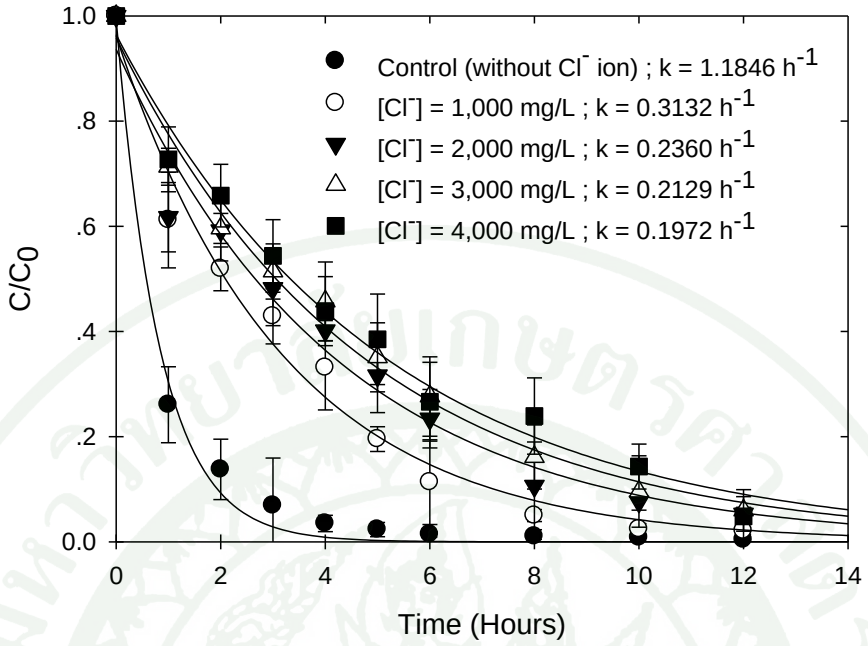
จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้ศักยภาพของอนุมูลอิสระของซัลเฟตในการออกซิไดซ์กับสีย้อมต่ำลง (Xu and Li, 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อคลอไรด์ไอออนในสีย้อมปริมาณมากขึ้น ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมจึงลดลง

$$SO_4^{-\bullet}{}_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} \longrightarrow SO_4^{2-}{}_{(aq)} + Cl^{-\bullet}{}_{(aq)} \quad (42)$$

$$Cl^{-\bullet}{}_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} \longrightarrow Cl^-_2{}^{\bullet}{}_{(aq)} \quad (43)$$

$$Cl^-_2{}^{\bullet}{}_{(aq)} + Cl^-_2{}^{\bullet}{}_{(aq)} \longrightarrow 2Cl^-_{(aq)} \quad (44)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่ 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟต 400 ต่อ 4

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสซัลเฟต 400 ต่อ 4

ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง)
0	93 ± 0.09
1,000	57 ± 0.05
2,000	51 ± 0.07
3,000	48 ± 0.05
4,000	45 ± 0.07

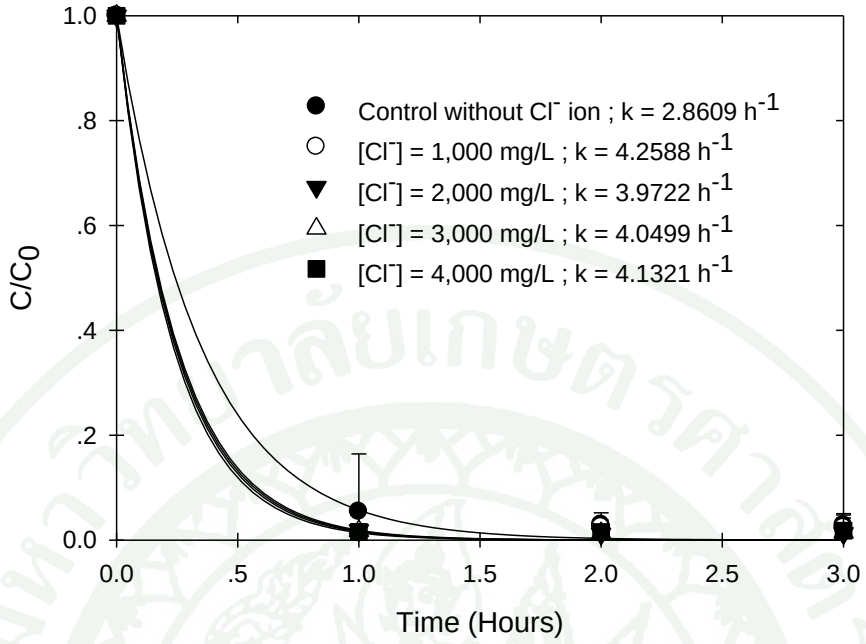
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.6.2 ผลของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้นในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีผลต่อการใช้เปอร์ซัลเฟตและเหล็กวาเลนท์ศูนย์

ผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์ พบว่าอัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าเป็น 2.8609, 4.2588, 3.9722, 4.0499 และ 4.1321 ชั่วโมง$^{-1}$ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมที่เวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 93.0, 97.7, 98.7. 98.6 และ 98.2 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 11 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนในสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายสีย้อมมีค่าสูงกว่าสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ปราศจากคลอไรด์ไอออน เนื่องจากคลอไรด์ไอออนทำหน้าที่เป็นตัวช่วยสนับสนุนให้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เกิดการผุกร่อน (Kim *et al*., 2007; Satapanajaru *et al*., 2011; ประภัสสร, 2554) ทำให้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น และมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนออกมา และเกิดเป็นเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออนอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์จึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ของการศึกษาครั้งนี้เห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อทำการทดสอบทางสถิติของค่าคงที่อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทราบว่าการใช้เปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์ที่ 400 ต่อ 4 สามารถย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่หลากหลายได้ได้เป็นอย่างดี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 อัตราการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ 0, 1,000, 2,000, 3,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีคลอไรด์ไอออนแตกต่างกัน โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4

ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง)
0	93.0 ± 0.09
1,000	97.7 ± 0.02
2,000	98.7 ± 0.01
3,000	98.6 ± 0.01
4,000	98.2 ± 0.03

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิว

3.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่มีสภาวะเหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิว

ผลการศึกษาปัจจัยทั้งสามปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสออกไซด์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) จากการทดสอบในตารางที่ 4 ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 12 โดยเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายมีค่าสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์อยู่ในช่วงการทดลองที่ 15 ถึง 20 เป็นจุด center point โดยที่กำหนดให้ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของเฟอร์รัสออกไซด์ 4 มิลลิโมลาร์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6 นอกจากนี้ในการทดลองที่ 13 ซึ่งเป็นจุด star point มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงเช่นกันโดยมีค่า 99 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีการใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 10 มิลลิโมลาร์ โดยที่เฟอร์รัสไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น เมื่อความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนมีความเข้มข้นสูง ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen *et al* (2009) อย่างไรก็ตามหากมีการใช้เฟอร์รัสไอออนความเข้มข้นสูงอาจมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมลดลงดังนั้นควรเลือกความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนให้เหมาะสมกับความเข้มข้นของสีย้อม โดยไม่จำเป็นต้องใช้เฟอร์รัสไอออนที่มีความเข้มข้นสูงมากจนเกินไป อีกทั้งยังเป็นการประหยัดการใช้สารเคมีอีกด้วย ตรงกันข้ามในการทดลองที่ 10 ซึ่งไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในระบบ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ต่ำที่สุดโดยมีค่าเพียง 36 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในแต่ละการทดลองโดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

ลำดับ	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	300	2	5	70.26
2	-1	-1	+1	300	2	9	69.14
3	-1	+1	-1	300	8	5	79.16
4	-1	+1	+1	300	8	9	79.93
5	+1	-1	-1	500	2	5	76.81
6	+1	-1	+1	500	2	9	43.00
7	+1	+1	-1	500	8	5	78.69
8	+1	+1	+1	500	8	9	59.12
9	-1.682	0	0	232	4	6	58.72
10	0	-1.682	0	400	0	6	36.48
11	0	0	-1.682	400	4	3	89.82
12	+1.682	0	0	568	4	6	86.61
13	0	+1.682	0	400	10	6	99.13
14	0	0	+1.682	400	4	10	73.99
15	0	0	0	400	4	6	98.63
16	0	0	0	400	4	6	98.23
17	0	0	0	400	4	6	98.20
18	0	0	0	400	4	6	98.19
19	0	0	0	400	4	6	98.53
20	0	0	0	400	4	6	99.19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1.1 การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

1) การทดสอบสมมติฐานของสมการการถดถอยหรือสมการความสัมพันธ์

จากการนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณเพื่อทำการประเมินผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ผลการวิเคราะห์พบว่ามีค่าสถิติ F เท่ากับ 4.792 โดยค่า degree of freedom (df) เท่ากับ (9, 10) มีค่านัยสำคัญของการทดสอบ (p-value) เท่ากับ 0.011 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) แสดงดังในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA [b]) ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

Model	Sum of squares	df	Mean square	F	*p*-value
Regression	5784.049	9	642.672	4.792	0.011
Residual	1341.232	10	134.123		
total	7125.280	19			

[a.] predictors: (constant), X_3^2, X_1X_2, X_2^2, X_2X_3, X_1X_2, X_1X_3, X_1^2, X_3

[b.] dependent variable: % degradation

3.1.2 การประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณ

เมื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรที่ศึกษาและทิศทางของอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาว่ามีทิศทางในทางบวกหรือทางลบต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ซึ่งผลการประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณ แสดงดังในตารางที่ 14

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

Independent variable	coefficients	Standard error	t-value	*p*-value
Intercept	-291.722	88.357	-3.302	0.008
X_1	1.183	0.285	4.151	0.002
X_2	23.265	7.952	2.926	0.015
X_3	29.507	13.332	2.213	0.051
$X_1 X_2$	-0.005	0.013	-0.353	0.732
$X_1 X_3$	-0.042	0.020	-2.159	0.050
$X_2 X_3$	0.263	0.636	-0.413	0.688
X_1^2	-0.001	0.000	-3.561	0.005
X_2^2	-1.630	0.371	-4.389	0.001
X_3^2	-0.992	0.750	-1.323	0.215

[a] Significant at 5% level ($p<0.05$), $R^2 = 0.812$; $R^2_{adj} = 0.642$

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากตารางที่ 14 พบว่าตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ซึ่งมีค่า *p*-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (X_3) พจน์กำลังสองของปริมาณความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1^2) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ($X_1 X_3$) และพจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2^2) สำหรับตัวแปรอิสระที่ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีค่า *p*-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ($X_1 X_2$) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ($X_2 X_3$) และพจน์กำลังสองของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3^2) เมื่อทำการเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ แสดงดังในตารางที่ 15 มาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบสมการการถดถอยที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังในสมการที่ 45

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหลังจากเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)

Independent variable	coefficients	Standard error	t-value	*p*-value
Intercept	-221.191	70.263	-3.148	0.008
X_1	1.117	0.268	4.173	0.001
X_2	18.783	3.823	4.913	0.000
$X_1 X_3$	-0.043	0.019	-2.267	0.041
X_1^2	-0.001	0.000	-3.534	0.004
X_2^2	-1.548	0.354	-4.379	0.001

[a] Significant at 5% level ($p<0.05$), $R^2 = 0.879$; $R^2_{adj} = 0.668$

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) หลังจากการเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.879 ซึ่งหมายความว่าการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ได้มีอิทธิพลจากตัวแปรอิสระทั้งสามตัวแปร 87.9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 12.1 เปอร์เซ็นต์ คือ ตัวแปรอิสระที่ไม่สามารถควบคุมได้ Hu (1999) ได้อธิบายว่า สมการการถดถอยที่นำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 แต่หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก อีกทั้งหาก R^2 adjust มีค่ามากกว่า 64 เปอร์เซ็นต์ (> 0.64) แสดงว่ารูปแบบสมการเหมาะสม

$$Y = -221.191 + 1.117 X_1 + 18.783 X_2 + 14.723 X_3 - 0.043 X_1X_3 - 0.001 X_1^2 - 1.548 X_2^2 \quad (45)$$

จากสมการ Y หมายถึง เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

X_1 หมายถึง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต

X_2 หมายถึง ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน

X_3 หมายถึง ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

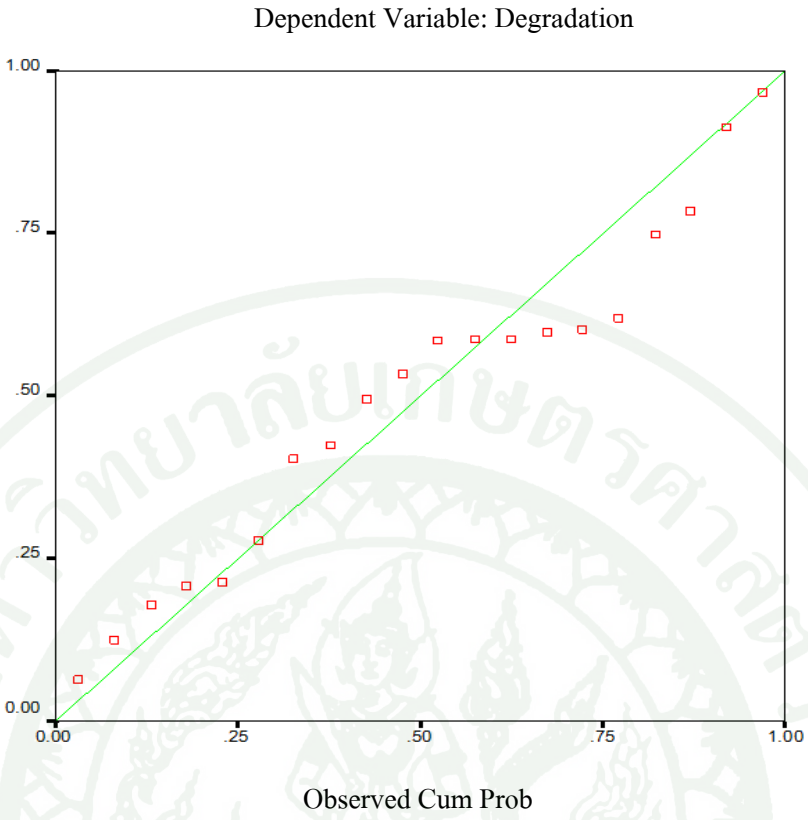
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 45 สังเกตได้ว่าตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลทางบวก (ค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก) คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) มีผลต่อค่าการตอบสนอง (Y) ซึ่งหมายความว่าหากเพิ่มค่าของตัวแปรอิสระดังที่กล่าวข้างต้น ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงขึ้น ขณะที่ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลทางลบ (ค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ) ได้แก่ พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_1X_3) พจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1^2) พจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2^2) ถือได้ว่าไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง

นอกจากนี้การนำสมการถดถอยที่ได้ไปใช้งานต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (model adequacy checking) ก่อน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (residual analysis) ด้วยการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ผลตรวจสอบเห็นได้ว่าลักษณะของจุดบนกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง และมีเพียงบางส่วนที่โค้งออกจากแนวเส้นตรง แสดงดังในภาพที่ 19

ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย โดยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนด้วยการพล๊อตกราฟ normal probability plot ให้ผลสรุปได้ว่ารูปแบบของสมการถดถอยจากการทดลอง ถือว่าเป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสม ซึ่งสามารถนำสมการถดถอยที่ได้นี้มาใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.3 การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายโดยสมการถดถอยของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

เมื่อนำสมการการถดถอยที่เหมาะสม (สมการที่ 45) มาวิเคราะห์เพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมระหว่างค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายโดยสมการถดถอย (ตารางที่ 16) พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสีย้อมมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ผลการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์แต่ละการทดลอง โดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_2)

ลำดับ	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์	
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการทำนาย
1	-1	-1	-1	300	2	5	70.26	64.40
2	-1	-1	+1	300	2	9	69.14	71.69
3	-1	+1	-1	300	8	5	79.16	45.52
4	-1	+1	+1	300	8	9	79.93	91.51
5	+1	-1	-1	500	2	5	76.81	84.80
6	+1	-1	+1	500	2	9	43.00	57.69
7	+1	+1	-1	500	8	5	78.69	104.62
8	+1	+1	+1	500	8	9	59.12	99.01
9	-1.682	0	0	232	4	6	58.72	62.97
10	0	-1.682	0	400	0	6	36.48	50.75
11	0	0	-1.682	400	4	3	89.82	108.54
12	+1.682	0	0	568	4	6	86.61	82.80
13	0	+1.682	0	400	10	6	99.13	83.78
14	0	0	+1.682	400	4	10	73.99	91.20
15	0	0	0	400	4	6	98.63	101.11
16	0	0	0	400	4	6	98.23	101.11
17	0	0	0	400	4	6	98.20	101.11
18	0	0	0	400	4	6	98.19	101.11
19	0	0	0	400	4	6	98.53	101.11
20	0	0	0	400	4	6	99.19	101.11

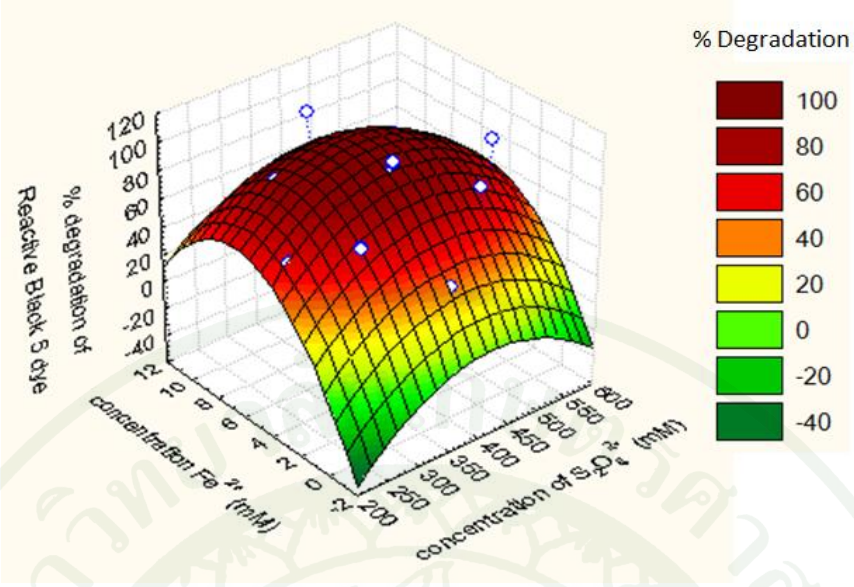
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1.4 การหาจุดที่เหมาะสมของการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

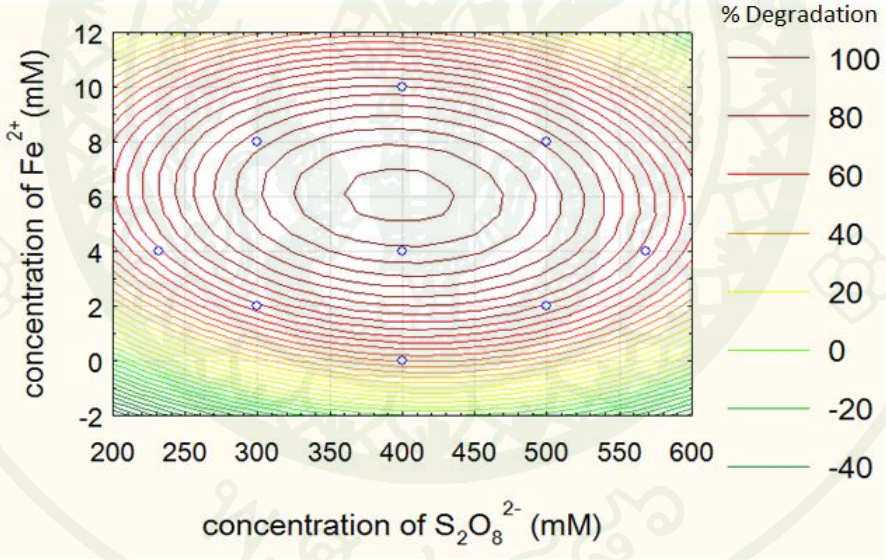
ผลของภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (20ก) และคอนทัวร์พล๊อต (20ข) ดังแสดงในภาพที่ 20 ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งกำหนดระดับกลางของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6 พบว่าแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมสูงขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเพิ่มขึ้น

จากการพิจารณาจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองที่มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงที่สุด พบว่ามีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 395 มิลลิโมลาร์ และ 6.2 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

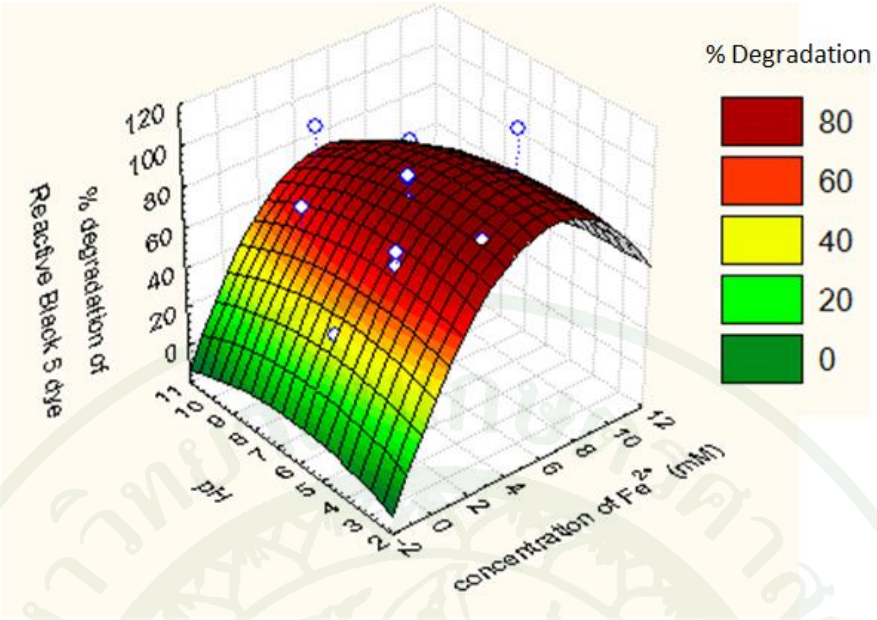
ภาพที่ 20 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และเฟอร์รัสไอออนต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

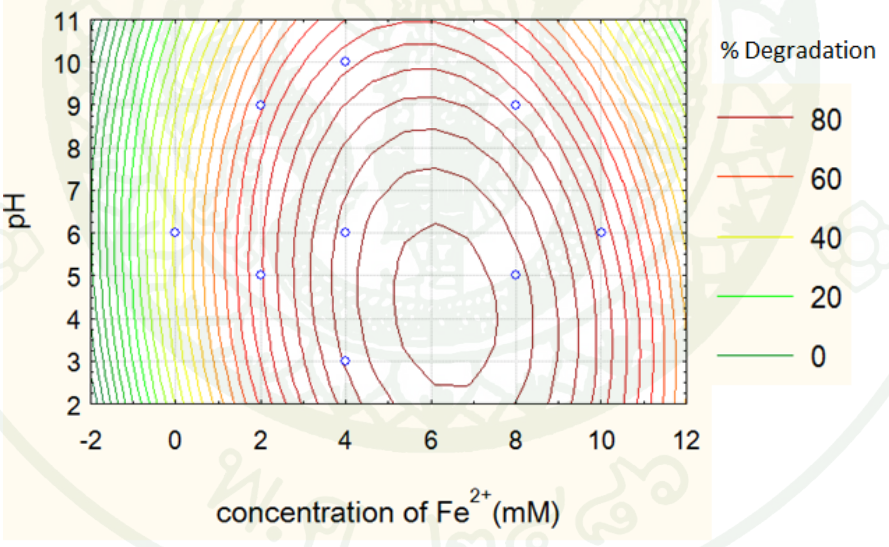
แผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (21 ก) และคอนทัวร์พล๊อต (21 ข) แสดงดังในภาพที่ 21 ระหว่างความเข้มข้นของสารเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดระดับกลางของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ผลการศึกษาในระยะเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเพิ่มขึ้น และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่ำลง โดยจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองที่มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์มากที่สุด พบว่ามีความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 6.35 มิลลิโมลาร์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 4.5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

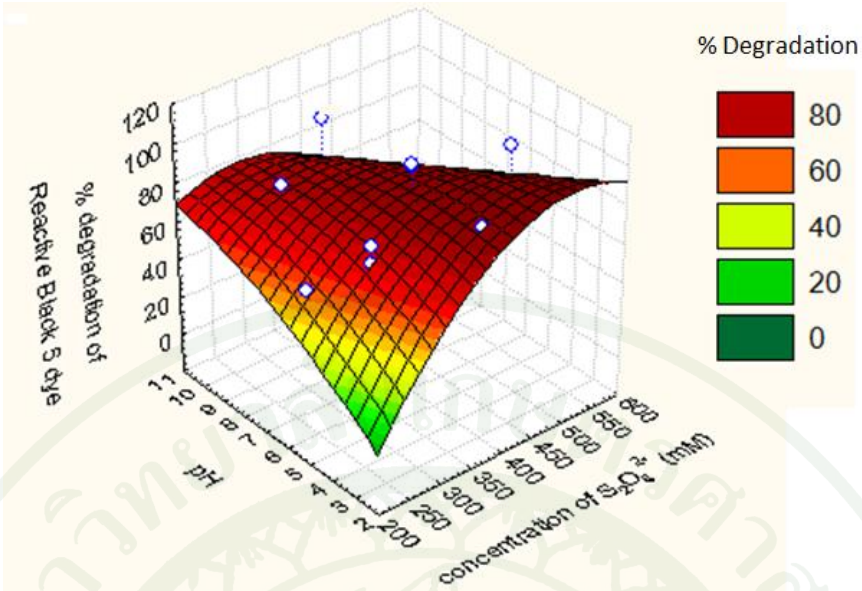
ภาพที่ 21 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

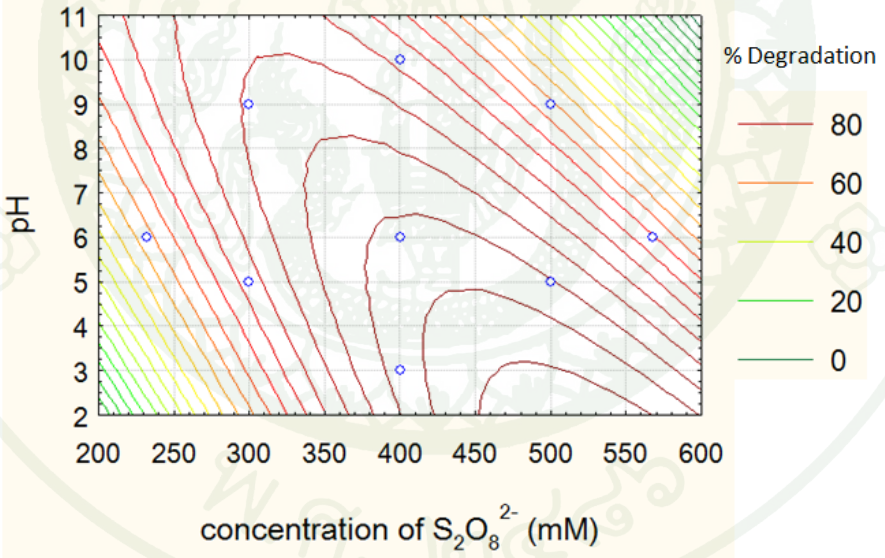
แผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (22 ก) และคอนทัวร์พล๊อต (22 ข) แสดงดังในภาพที่ 22 ระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดระดับกลางของความเข้มข้นสารเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์

ผลการศึกษาพบว่าในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ไม่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน เนื่องจากไม่สามารถหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ผิวตอบสนองจากแผนภาพคอนทัวร์พล๊อตได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนองทั้ง 3ภาพ พบว่าจุดที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 395 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 6.35 มิลลิโมลาร์ ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 4.5 เมื่อนำจุดที่เหมาะสมดังกล่าวมาทำการทดลองซ้ำเพื่อเป็นการยืนยันเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์อีกครั้ง ผลการทดลอง พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงถึง 99.5 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง

3.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสภาวะที่เหมาะสมต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิว

ผลการศึกษาปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) จากการทดสอบในตารางที่ 5 ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 17 โดยเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงการทดลองที่ 15 ถึง 20 เป็นจุด central point โดยที่กำหนดให้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6 นอกจากนี้ในการทดลองที่ 5, 7, 8, 12 และ 13 มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงเช่นกัน โดยมีค่า 90.08, 95.88, 93.77 และ 99.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูง เมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่ำและมีการใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และเหล็กวาเลนท์ศูนย์เพิ่มขึ้น

ในทางกลับกันเมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างสูง และมีการใช้ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และเหล็กวาเลนท์ศูนย์น้อยลง มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ต่ำลง ดังเช่นในการทดลองที่ 1 ถึง 4, 6, 9 ถึง 11 และ 14

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในแต่ละการทดลอง โดยการศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น(X_3)

ลำดับ	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			เปอร์เซ็นต์
ทดลอง	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	การย่อยสลายสี
1	-1	-1	-1	300	2	5	85.23
2	-1	-1	+1	300	2	9	83.79
3	-1	+1	-1	300	8	5	89.80
4	-1	+1	+1	300	8	9	82.00
5	+1	-1	-1	500	2	5	90.08
6	+1	-1	+1	500	2	9	89.33
7	+1	+1	-1	500	8	5	95.88
8	+1	+1	+1	500	8	9	93.77
9	-1.682	0	0	232	4	6	61.38
10	0	-1.682	0	400	0	6	45.72
11	0	0	-1.682	400	4	3	86.62
12	+1.682	0	0	568	4	6	97.68
13	0	+1.682	0	400	10	6	99.65
14	0	0	+1.682	400	4	10	84.76
15	0	0	0	400	4	6	92.47
16	0	0	0	400	4	6	95.21
17	0	0	0	400	4	6	93.29
18	0	0	0	400	4	6	93.76
19	0	0	0	400	4	6	94.09
20	0	0	0	400	4	6	94.06

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.1 การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

1) การทดสอบสมมติฐานของสมการการถดถอยหรือสมการความสัมพันธ์

จากการนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ เพื่อทำการประเมินผลของปัจจัยศึกษาต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น ผลการวิเคราะห์พบว่ามีค่าสถิติ F เท่ากับ 2.314 โดยค่า degree of freedom (df) เท่ากับ (9, 10) มีค่านัยสำคัญของการทดสอบ (*p*-value) เท่ากับ 0.104 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น มีผลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 80 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.20$) แสดงดังในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA [b]) ของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

Model	Sum of squares	df	Mean square	F	*p*-value
Regression	2097.383	9	233.043	2.314	0.104
Residual	1007.193	10	100.719		
total	3104.575	19			

[a.] predictors: (constant), X_3^2, X_1X_2, X_2^2, X_2X_3, X_1X_2, X_1X_3, X_1^2, X_3

[b.] dependent variable: % degradation

3.2.2 การประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณ

เมื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่ศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรที่ศึกษาและทิศทางของอิทธิพลของตัวแปรที่ศึกษาว่ามีทิศทางในทางบวกหรือทางลบต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ซึ่งผลการประมาณสัมประสิทธิ์การถดถอยเชิงพหุคูณ แสดงดังในตารางที่ 19

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าคามเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)

Independent variable	coefficients	Standard error	t-value	*p*-value
Intercept	35.867	12.078	2.970	0.090
X_1	0.065	0.024	2.678	0.017
X_2	10.037	3.067	3.273	0.005
X_3	-0.342	0.650	-0.527	0.610
$X_1 X_2$	-8.430	0.012	-0.007	0.994
$X_1 X_3$	-0.003	0.016	-0.199	0.846
$X_2 X_3$	-0.162	0.223	-1.323	0.198
X_1^2	0.000	0.000	-1.393	0.184
X_2^2	-0.743	0.284	-2.620	0.019
X_3^2	-0.342	0.594	-0.576	0.575

[a] Significant at 80% level ($p<0.20$), $R^2 = 0.822$; $R^2_{adj} = 0.676$

เมื่อพิจารณาค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจากตารางที่ 19 พบว่าตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ซึ่งมีค่า *p*-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.20 คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเหล็กวาเลนท์ศูนย์และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ($X_2 X_3$) พจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1^2) และพจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2^2)สำหรับตัวแปรอิสระที่ไม่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีค่า *p*-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.20 คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและเหล็กวาเลนท์ศูนย์ ($X_1 X_2$) พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ($X_1 X_3$) และพจน์กำลังสองของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3^2) เมื่อทำการเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์แสดงดังในตารางที่ 20 มาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบสมการการถดถอยที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังในสมการที่ 46

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการการถดถอยและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหลังจากเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์โดยปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)

Independent variable	coefficients	Standard error	t-value	*p*-value
Intercept	35.867	12.078	2.970	0.090
X_1	0.065	0.024	2.678	0.017
X_2	10.037	3.067	3.273	0.005
$X_2 X_3$	-0.162	0.223	-1.323	0.198
X_1^2	0.000	0.000	-1.393	0.184
X_2^2	-0.743	0.284	-2.620	0.019

[a] Significant at 20% level ($p<0.20$), $R^2 = 0.793$; $R^2_{adj} = 0.652$

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) หลังจากการเลือกตัวแปรอิสระที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.793 ซึ่งหมายความว่าการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ได้มีอิทธิพลจากตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวแปร 79.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 20.7 เปอร์เซ็นต์ คือ ตัวแปรอิสระที่ไม่สามารถควบคุมได้ Hu (1999) ได้อธิบายว่า สมการการถดถอยที่นำไปใช้ควรมีค่า R^2 อย่างน้อย 0.75 แต่หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก อีกทั้งหาก R^2 adjust มีค่ามากกว่า 64 เปอร์เซ็นต์ (> 0.64) แสดงว่ารูปแบบสมการเหมาะสม

$$Y = - 35.867 + 0.065 X_1 + 10.037 X_2 – 0.162X_2X_3 – 0.743X_2^2 \quad (46)$$

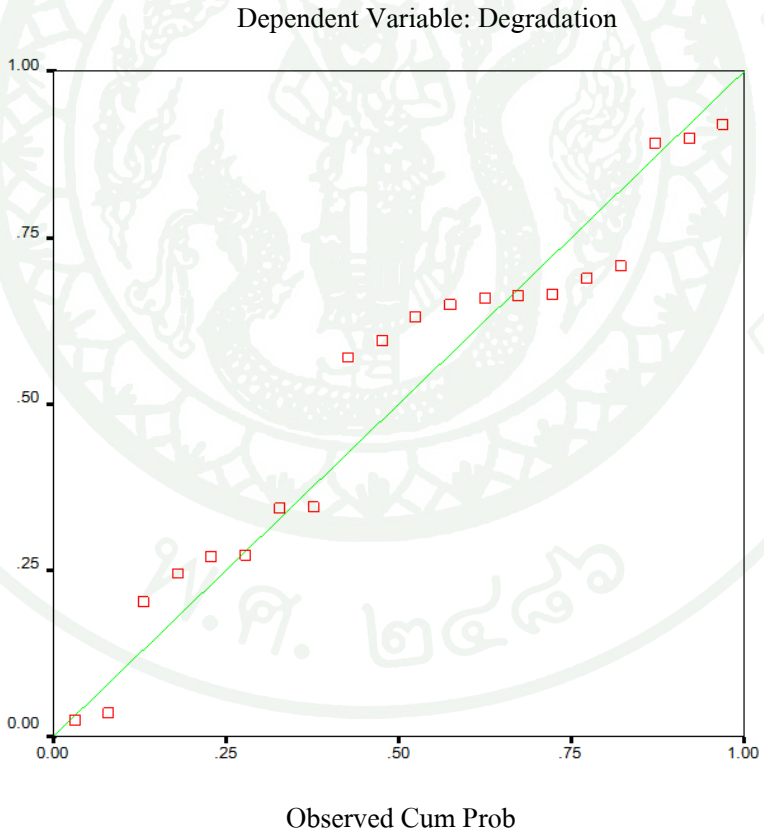
จากสมการ Y หมายถึง เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

X_1 หมายถึง ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต

X_2 หมายถึง ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 46 สังเกตได้ว่าตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลทางบวก (ค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก) คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) มีผลต่อค่าการตอบสนอง (Y) ซึ่งหมายความว่า หากเพิ่มค่าของตัวแปรอิสระดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงขึ้น ขณะที่ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลทางลบ (ค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบ) ได้แก่ พจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_2X_3) พจน์กำลังสองของความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2^2) ถือได้ว่าไม่มีผลต่อค่าการตอบสนอง และก่อนนำสมการถดถอยที่ได้ไปใช้งานต้องทำการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (model adequacy checking) โดยตรวจสอบความคลาดเคลื่อน ด้วยวิธีการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (normal distribution) ผลตรวจสอบเห็นได้ว่าลักษณะของจุดบนกราฟส่วนใหญ่มีการกระจายตัวในแนวเส้นตรง และมีบางส่วนที่โค้งออกจากแนวเส้นตรง แสดงดังในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 normal probability plot ของค่าความคลาดเคลื่อน โดยใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบสมการถดถอย โดยการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนด้วยการพล๊อตกราฟ normal probability plot ผลสรุปที่ได้พบว่ารูปแบบของสมการถดถอยจากการทดลอง ถือว่าเป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสม ซึ่งจะนำสมการถดถอยที่ได้นี้มาใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ต่อไป

อย่างไรก็ตามหากสังเกตปัจจัยศึกษาที่เกี่ยวข้องในสมการที่ 46 จะเห็นได้ว่าไม่พบปัจจัยของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3) ปรากฏอยู่ ซึ่งแท้ที่จริงค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเป็นหนึ่งในสามของปัจจัยหลักที่ทำการศึกษา ซึ่งเมื่อสมการถดถอยข้างต้นนี้มาใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อม ควรกำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นให้อยู่สภาวะเดียวกับจุด central point ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นสภาวะที่มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายดีที่สุดที่ได้จากการทดลองแบบ CCD ดังแสดงในตารางที่ 17

3.2.3 การเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

เมื่อนำสมการการถดถอยที่เหมาะสม (สมการที่ 46) มาวิเคราะห์เพื่อทำนายผลโดยสมการถดถอยของ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างเหล็กวาเลนท์ศูนย์และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_2X_3) ที่ทำการศึกษาต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมระหว่างค่าจริงที่ได้จากการทดลองและค่าจากการทำนายโดยสมการถดถอย พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของสีย้อมมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 21

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 ผลการเปรียบเทียบค่าจริงจากการทดลองและค่าทำนายของเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ในแต่ละการทดลองโดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (X_1) ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ (X_2) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (X_3)

ลำดับทดลอง	รหัสของปัจจัย			ค่าจริงที่ศึกษา			เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์	
	X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	ค่าจริงจากการทดลอง	ค่าทำนายโดยสมการ
1	-1	-1	-1	300	2	5	85.23	70.89
2	-1	-1	+1	300	2	9	83.79	65.18
3	-1	+1	-1	300	8	5	89.80	81.63
4	-1	+1	+1	300	8	9	82.00	76.45
5	+1	-1	-1	500	2	5	90.08	83.85
6	+1	-1	+1	500	2	9	89.33	82.55
7	+1	+1	-1	500	8	5	95.88	94.63
8	+1	+1	+1	500	8	9	93.77	89.45
9	-1.682	0	0	232	4	6	61.38	75.32
10	0	-1.682	0	400	0	6	45.72	61.87
11	0	0	-1.682	400	4	3	86.62	88.18
12	+1.682	0	0	568	4	6	97.68	97.16
13	0	+1.682	0	400	10	6	99.65	78.21
14	0	0	+1.682	400	4	10	84.76	83.65
15	0	0	0	400	4	6	92.47	86.24
16	0	0	0	400	4	6	95.21	86.24
17	0	0	0	400	4	6	93.29	86.24
18	0	0	0	400	4	6	93.76	86.24
19	0	0	0	400	4	6	94.09	86.24
20	0	0	0	400	4	6	94.06	86.24

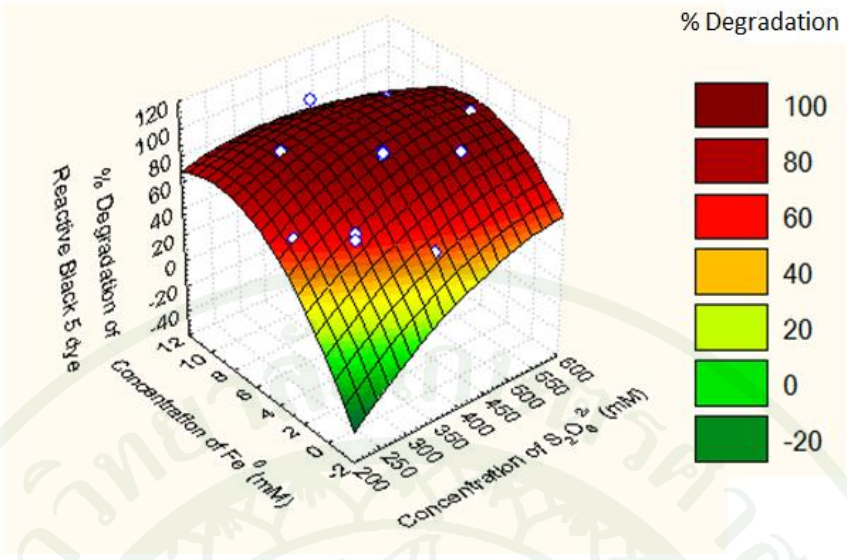
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.4 การหาจุดที่เหมาะสมของการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

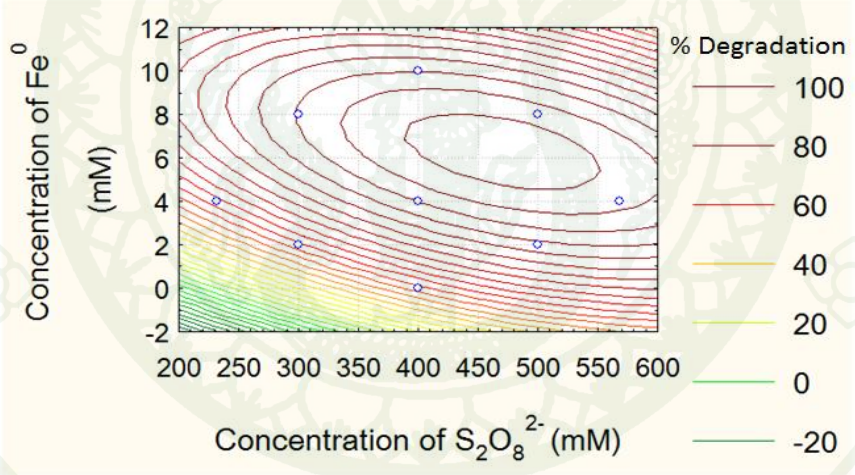
ผลของภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (24 ก) และคอนทัวร์พล๊อต (24 ข) แสดงดังในภาพที่ 24 ระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ต่อเปอร์เซ็นต์การการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ซึ่งกำหนดระดับกลางของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เท่ากับ 6 พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ในระยะเวลา 1 ชั่วโมงสูงขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ในปริมาณมาก

จากการพิจารณาจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองที่มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงที่สุด เมื่อมีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 470 มิลลิโมลาร์ และ 6.9 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

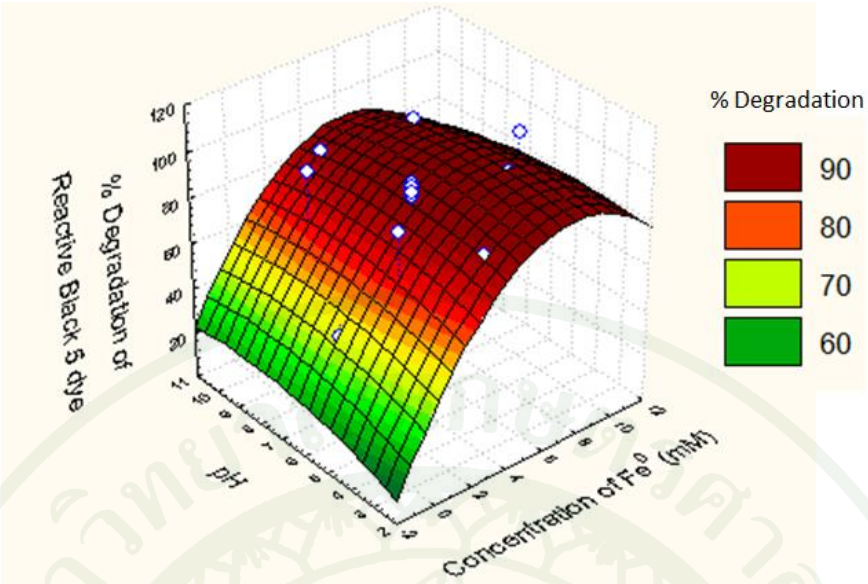
ภาพที่ 24 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟต และความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ กำหนดค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

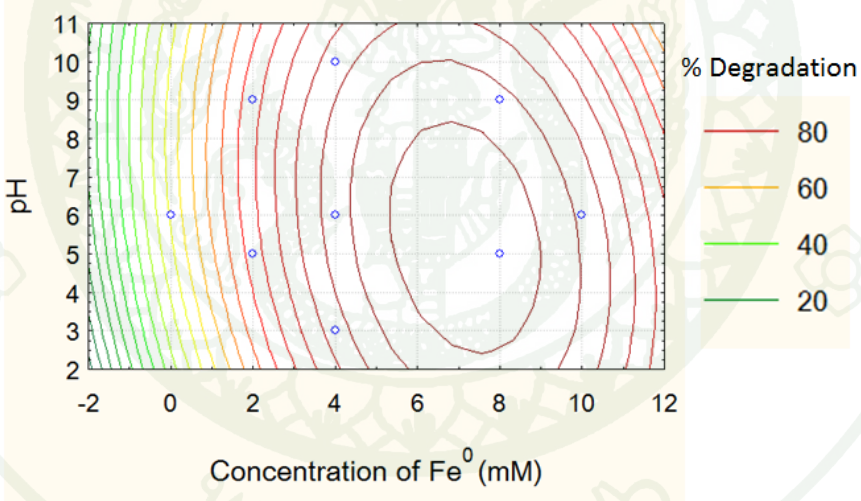
ผลของแผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (25ก) และคอนทัวร์พล๊อต (25ข) แสดงดังในภาพที่ 25 ระหว่างความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดระดับกลางของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ผลการศึกษาในระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงขึ้น เมื่อมีแนวโน้มของค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นในระดับต่ำ ขณะที่มีความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ในปริมาณมากขึ้น (Rao *et al*., 1995; Deng et al., 2000; Yang and Lee, 2005; Zhao *et al.*, 2010) ซึ่งแสดงเหตุผลไว้แล้วข้างต้นดังข้อที่ 2.5 จากการพิจารณาจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองที่มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงที่สุด เมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.75 และมีความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 6.9 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

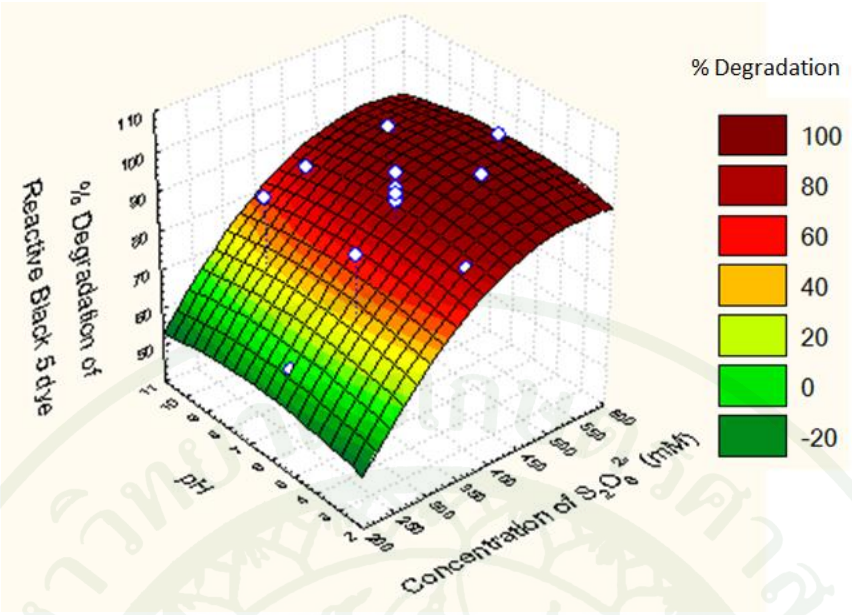
ภาพที่ 25 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์และค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค ไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 400 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

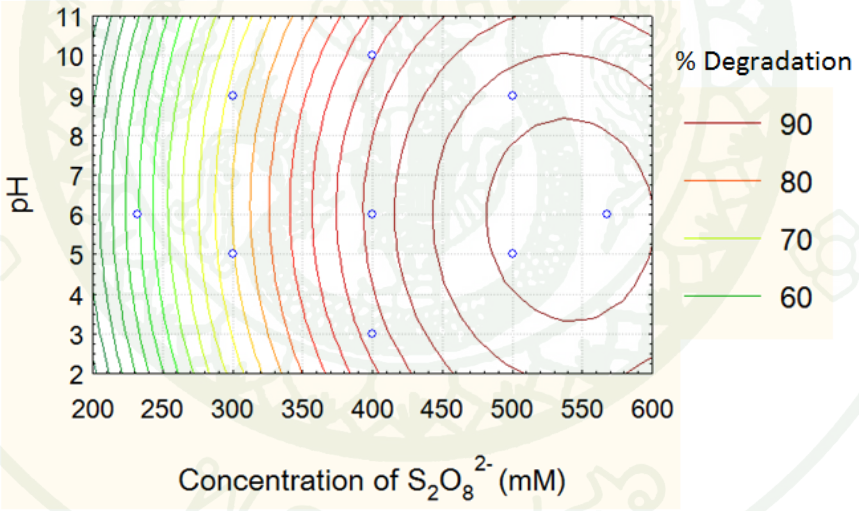
สำหรับผลของแผนภาพพื้นที่ผิวตอบสนอง (26ก) และคอนทัวร์พล๊อต (26ข) แสดงดังในภาพที่ 26 ระหว่างความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดระดับกลางของความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์ พบว่าในระยะเวลา 1 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็ค ไฟท์เพิ่มขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตสูงขึ้น และมีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่ำลง ทั้งนี้ในสภาวะความเป็นกรดสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นได้เป็นอย่างดี แสดงดังในสมการที่ 31 และ 32

เมื่อพิจารณาจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองพบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์สูงที่สุด คือ มีความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 5.75 และมีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 540 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 26 (ก) ภาพพื้นผิวตอบสนอง (ข) คอนทัวร์พล๊อต ของความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 4 มิลลิโมลาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการวิเคราะห์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของพื้นที่ผิวตอบสนองทั้ง 3 ภาพ พบว่าจุดที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรได้มากที่สุด คือ มีความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 540 มิลลิโมลาร์ มีความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 6.9 มิลลิโมลาร์ และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.75 จากนั้นนำจุดที่เหมาะสมดังกล่าวมาทำการทดลองเพื่อยืนยันเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์อีกครั้ง ซึ่งผลการทดลองจริง พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์มีค่าเป็น 98.1 เปอร์เซ็นต์ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟบบล็คไฟท์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่น พบว่าเมื่อมีการใช้เปอร์ซัลเฟตและเฟอร์รัสไอออนที่ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสีรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้ดี สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 1 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 สามารถย่อยสลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรได้เป็นอย่างดี เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นโดยใช้เฟอร์รัสไอออน เฟอร์ริกไอออน เหล็กวาเลนท์ศูนย์ ซิลเวอร์ไอออน และซิลเวอร์นาโน พบว่าเหล็กวาเลนท์ศูนย์ให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมได้มากที่สุด รองลงมาเป็นเฟอร์ริกไอออน เฟอร์รัสไอออน ซิลเวอร์นาโน และซิลเวอร์ไอออน ตามลำดับ และผลการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่มีคลอไรด์ไอออนผสมอยู่ พบว่าเมื่อใช้เฟอร์รัสไอออนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมลดลงเนื่องจากคลอไรด์ไอออนเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นทำให้เกิดอนุมูลอิสระของซัลเฟตที่เข้าทำการออกซิไดซ์กับสีย้อมได้น้อยลง ขณะที่เมื่อใช้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลับพบว่ามีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมได้ดีกว่า เนื่องมาจากคลอไรด์ไอออนช่วยสนับสนุนให้เหล็กวาเลนท์ศูนย์เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออนซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องจึงมีผลต่อย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้เป็นอย่างดี

จากผลการศึกษาจุดที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด คือ เฟอร์รัสไอออน และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ด้วยวิธีการตอบสนองพื้นที่ผิว (RSM) พบว่าความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 395 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 6.35 มิลลิโมลาร์ และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 3.75 โดยในระยะเวลา 4 ชั่วโมง มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 99.1 เปอร์เซ็นต์ และความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตเท่ากับ 540 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 6.9 มิลลิโมลาร์ และมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.75 ซึ่งในระยะเวลา 1 ชั่วโมงมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมเท่ากับ 98.1 เปอร์เซ็นต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

แม้ว่ากระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชั่นสามารถย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากนำมาประยุกต์ใช้จริงกับน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม จำเป็นต้องศึกษาสัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นก่อน เนื่องจากสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมมีความเข้มข้นค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 ถึง 14 ซึ่งหากไม่ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมก่อนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตที่ใช้อาจไม่เพียงพอ นอกจากนี้ควรมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเริ่มต้นให้อยู่ในสภาวะความกรด เพื่อเป็นการกระตุ้นให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมดีขึ้น

สำหรับการทำนายเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายสีย้อมโดยการใช้สมการถดถอยที่ได้จากการวางแผนทดลองแบบ CCD ควรทำการทดลองจริงร่วมควบคู่ไปด้วย เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสีย้อมก่อนนำไปใช้งานจริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี

ขนิษฐา สุวรรณรัตน์ 2550. **สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.**แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true,25 กรกฎาคม 2555.

โครงการศูนย์ข้อมูลสิ่งทอเชิงลึก สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. 2555. **รายงานสถานการณ์อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย ประจำเดือนกุมภาพันธ์ ปี 2555**. แหล่งที่มา: http://www.thaitextile.org/main/index_t.php, pdf., 25 กรกฎาคม 2555.

จรัญ ประจันบาล. 2551. **การหาค่าที่เหมาะสมเพื่อการผลิตเอนไซม์เบต้า-กลูคาเนสจากเชื้อรา Aspergillus terreus ASKU 10 ด้วยการหมักแบบแห้งและการใช้ฟางเข้าหมักร่วมกับเชื้อส่งเสริมการเติบโตเพื่อการเพาะปลูกข้าวโพดฝักอ่อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฉัตรเพชร ยศพล. 2553. **จลพลศาสตร์ของปฏิกิริยา.** แหล่งที่มา: http://eng.sut.ac.th/envi/modules/menu/ 12858995071285741660 1009-Class%20Note%20432-426-Ch2.pdf, 17 ธันวาคม 2555.

ชิดชนก เชิงเชาว์. 2541. **การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการวิจัยทางการศึกษา**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี.

ประภัสสร สุนทรโชติ. 2554. **การประยุกต์อนุภาคเหล็กวาเลนท์ศูนย์ขนาดนาโนเมตร (NZVI) ในการบำบัดเมโทลาคลอร์และไซโครไนท์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทักษิณ ฤกษ์สำราญ. 2552. **การศึกษาชนิดและขนาดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและสารอาหารที่มีผลต่อการผลิตเอนไซด์ย่อยลิกนินของ *Pleurotus ostreatus* DOA10 เพื่อใช้กำจัดสีย้อม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิสา ร่มส้มซ่า. 2552. **สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเอนไซม์โปรติเอสที่ใช้ลอกกาวไหมจาก *Bacillus* sp. C4 โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นวรัตน์ จันทร์กระเวน. 2548. **การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเฉือนลูกบอลในกระบวนการเชื่อมวงจร : กรณีศึกษาโรงงานผลิตเซมิคอนดักเตอร์.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รัชนีย์ รุกชาติ. 2555. **สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง**. แหล่งที่มา: http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm, 25 กรกฎาคม 2555.

อนุวัตร แจ้งชัด. 2549. **สถิติสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์.** ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรงเทพฯ.

Anipsitakis, G.P., and D.D Dionysion. 2004. Radical generation by the interaction of transition metals with common oxidant. **Environmental Science and Technology** 38: 3705-3712.

Antoniou M.G., A. Armah, D.L. Cruz and D. Dionysios. 2010. Degradation of microcystin-LR using sulfate radicals generated through photolysis, thermolysis and e^- transfer mechanisms. **Applied Catalysis B: Environmental** 96: 290-298

Banat, M.I., P. Nigam, D. Singh and R. Marchant. 1996. Microbial decolorization of textile dye containing effluents. **Bioresource Technology** 58: 217-227.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bhunia, P., A.K. Verma and R.R. Dash. 2012. A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. **Journal of Environmental Management** 93: 154-168.

Buxton GV, M Bydder, GA Salmon. 1999. The reactivity of chlorine atoms in aqueous solution Part II. The equilibrium $SO_4^{-} + Cl^{-} \Leftrightarrow Cl + SO_4^{2-}$. **Physical Chemistry Chemical Physics** 1:269–73.

Chen, K.F., C.M. Kao, L.C. Wu, R.Y. Surampalli and S.H. Liang. 2009. Methyl tert-butyl ether (MTBE) degradation by ferrous ion-activated persulfate oxidation: feasibility and kinetics studies. **Water Environment Research**. 81: 687–694.

Cheng G.N., Y. Wang, X.G. Zhang, G.M. Zeng, D.W. Huang, M. Ruan and X.W. Li. 2012. Decolorization of an azo dye Orange G in microbial fuel cells using Fe(II)-EDTA catalyzed persulfate**. Bioresource Technology** 126: 101-106.

Chenju L., Z.S Wang, and N. Mohanty. 2006. Influences of carbonate and chloride ions on persulfate oxidation of trichloroethylene at 20 °C. **Science of the Total Environment** 370: 271-277.

Christie, R., 2001. **Colour Chemistry**. The Royal Society of Chemistry, Cambridge United Kingdom

Chung, K.T., S.E. Stevens and C.E. Cerniglia. 1992. The reduction of azo dyes by the intestinal microflora. **Critical Review in Microbiology** 18: 175-190.

Deng, N., F. Luo, F. Wu, M. Xiao, and X. Wu. 2000. Discoloration of aqueous reactive dye solutions in the UV/ Fe0 system. **Water Research** 34 (8): 2,408-2,411.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Devi L.G., K.E. Rajashekhar, K.S.A. Raju and S.G. Kumar. 2009. Kinetic modeling based on the non-linear regression analysis for the degradation of Alizarin Red S by advanced photo Fenton process using zero valent metallic iron as the catalyst**. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** 314: 88 –94.

Eren Z. and F.N. Acar. 2006. Adsorption of Reactive Black 5 from an aqueous solution: equilibrium and kinetic studies. **Desalination** 194: 1–10.

Gemeray A.H., A.F.M. Habib and M.A.B. El-Din. 2007. Kinetics and mechanism of uncatalzed and Ag(I)-catalyzed oxidative decolorization of Sunset Yellow and Ponceau 4R with peroxydisulphate. **Dyes and Pigment** 74: 458-463.

Georgios, B., K. Kostas and P. Ioannis. 2006. Laboratory evaluation of Fe0 barriers to treat acidic leachates. **Minerals Engineering** 19: 505-514.

Hardin, I.R., H. Cao and S.S. Wilson. 2000. Decolorization of textile wastewater by selective fungi. **TCCE ADR.** 32: 38-42.

Huang, K., A.C. Richard and G.E. Hoag. 2002. Kinetics of heat-assisted persulfate oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE). **Chemosphere** 49: 413-420.

Huie RE, CL Clifton, P Neta. 1991. Electron transfer reaction rates and equilibria of the carbonate and sulfate radical anions. **Radiation Physics Chemistry** 38: 477–81.

Jeen S. W., D.W. Blowes and R.W. Gillham. 2008. Performance evaluation of granular iron for removing hexavalent chromium under different geochemical conditions. **Journal of Contaminant Hydrology** 95(1-2): 76–91.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jiangmei Y., T. Huiwang, Z. Muling, T. Jun, Z. Shihong, Y. Zhiying, W. Wei, W. Jiaqiang. PVP-Capped Silver Nanoparticles as Catalyst for Oxidative Coupling of Thiols to Disulfides. **Chinese Journal of Catalysis** 30(9): 856-858

Kao, Y.C. Kuo, K.F. Chen and B.M. Yang. 2011. In situ oxidation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using passive ISCO system. **water research** 45: 2,496-2,506.

Kim, J.M. H Park, H.S. Park, and C. Yoon. 2009. Oxidation of polyvinyl alcohol by persulfate activated with heat Fe^{2+} and zero-valent iron. **Journal of Hazardous Materials**. 168**:** 346-351.

Kim, J.S., P.J. Shea , J.E. Yang and J.E. Kim. 2007. Halide salts accelerate degradation of high explosives by zerovalent iron**. Environmental Pollution** 147: 634-641.

Khuri, A.I. and J.A. Cornell. 1987. **Response surface designs and analyses.** Marcel Dekber, New York.

Li S.X., W. Dong, N.K. Mak, Z.W. Cai, X.R. Xu, H.B. Li and Y. Jiang. 2009. Degradation of diphenylamine by persulfate: Performance optimization, kinetic and mechanism. **Journal of Hazardous Materials** 164: 26-31.

Li S.X. and W. Hu.. 2011. Decolourization of Acid Chrome Blue K by Persulfate. **Procedia Environmental Sciences** 10: 1,078-1,084.

Li, X.Q., D. W. Elliott and W.X. Zhang. 2006. Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences** 31: 111-122.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Liang, C., C. Huang and Y. Chen. 2008. Potential for activated persulfate degradation of BTEX contamination. **Water Research** 42: 4,091-4,100.

Liang, C.J., C.J. Bruell., M.C. Marley and K.L. Sperry. 2004. Persulfate oxidation for in situ remediation of TCE. II. Activated by chelated ferrous ion**. Chemosphere** 55: 1,225-1,233.

Liang, S.H., C.M. Kao, Y.C. Kuo, K.F. Chen and B.M. Yang. 2011. In situ oxidation of petroleum-hydrocarbon contaminated groundwater using passive ISCO system. **Water Research** 45: 2,496-2,506.

Lien, H.L. and W., Zhang. 2001. Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethenes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 191: 97-105.

Liu C. C., D.H. Tseng and C.Y. Wang. 2006. Effects of ferrous ions on the reductive dechlorination of trichloroethylene by zerovalent iron. **Journal of Hazardous Material** 136 (3): 706–713.

Mcelroy W.J., & S.J. Waygood. (1990). Kinetics of the reactions of the SO_4^- radical with SO_4^-, $S_2O_8^{2-}$, H_2O and Fe^{2+}. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions** 86: 2,557-2,564.

Meyer, U. 1981. Biodegradation of synthetic organic colorant. **FEMS Symp.** 12:371-385.

Morrison S. J., D.R. Metzler and B.P. Dwyer. 2002. Removal of As, Mn, Mo, Se, U, V and Zn from groundwater by zero-valent iron in a passive treatment cell: reaction progress modeling. **Journal of Contaminant Hydrology** 56 (1-2): 99–116.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Oh S.K., H.W. Kim, J.M. Park, H.S. Park and C. Yoon. 2009. Oxidation of polyvinyl alcohol by persulfate activated with heat, Fe^{2+}, and zero-valent iron. **Journal of hazardous materials** 168: 346-351.

Oh S.Y., S.G. Kang and P.C. Chiu. 2010. Degradation of 2,4-dinitrotoluene by persulfate activation with zero-valent iron. **Science of the Total Environment** 408: 3464-3468.

Oliver S., E. Markus, F. Margit, W. Marcus, W. Wolfgang and D. Anddress. 2000. Degradating of TCE with iron: The role of competing chromate and nitrate reduction. **Ground Water** 38 (3): 403–409.

Palanivelu k., P. Gayathri & P.J.D.R. (2010). Sonochemical degradation of textile dyes in aqueous solution using sulphate radicals activated by immobilized cobalt ions. **Ultrasonics Sonochemistry** 17: 566-571.

Rao S.R., J.A. Finch and N. Kuyucak. 1995. TECHNICAL NOTE FERROUS-FERRIC OXIDATION IN ACIDIC MINERAL PROCESS EFFLUENTS: COMPARISON OF METHODS. **Mineruls Engineering** 8: 905-911.

Reife, A. and H. S. Freeman. 1996. **Carbon adsorption of dyes and selected intermediates**. Environmental chemistry of dyes and pigments. Wiley, New York.

Roessler A., and X. Jin. 2003. State of the art technologies and new electrochemical methods for the reduction of vat dyes. **Dyes and Pigments** 59 (3): 223-235.

Ruhl, A.S., M. Jekel and A. Weber. 2012. Influence of dissolved inorganic carbon and calcium on gas formation and accumulation in iron permeable reactive barriers. **Journal of Contaminant Hydrology** 142–143: 22–32.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Satapanajaru T., C. Chompuchan, P. Suntornchot and P. Pengthamkeerati. 2011. Enhancing decolorization of Reactive Black 5 and Reactive Red 198 during nano zerovalent iron treatment. **Desalination** 266: 218–230.

Sathesan, S. 2002. **Natural and Enhanced remediation system**. CRC Press Inc, Florida.

Shuang S., Z. He., J. Qiu., L. Xu. and J. Chen. 2007. Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters. **Separation and Purification Technology** 55: 238-245.

Stylidi M., D.I. Kondarides and X.E. Verykios. 2003. Pathways of solar light-induced photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous TiO2 suspensions. **Applied Catalysis B: Environmental** 40: 271-286.

Stylidi M., D.I. Kondarides and X.E. Verykios. 2004. Visible light-induced photocatalytic degradation of acid orange 7 in aqueous TiO_2 suspensions. **Applied Catalysis B: Environmental** 47: 189-201.

Tunc O., T. Hacer and Z. Aksu. 2009. Potential use of cotton plant waste for the removal of Remazol Black B reactive dye**. Journal of Hazardous Materials** 163: 187–198.

Tychanowicz, G.K., A. Zilly, C.G.M. de Souza and R.M. Peralta. 2004. Decolorisation of industrial dyes by solid-state fermentation of *Pleurotus pulmonarius*. **Process Biochem.** 39: 855-859.

Van der Zee, F.p. 2002. **Anaerobic azo dye reduction**. PhD Thesis. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Vaidya A. A. and Datye K. V. 1982. Environmental pollution during chemical processing of synthetic fiber. **Colorate** 14: 3-10.

Venceslau, P. C., and J.J. Simon. 1994. Characterization of textile wastewater. **Environmental Technology** 15: 917-929.

Vendevivere, P.C., and W. Verstraete. 1998. Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry. **Journal of Chemical Technology** 72: 289-302.

Vigo, T.L. 1994. **Textile Processing and Properties.** Elsevier, New York.

Vishnu G., S. Palanisamy and K. Joseph. 2008. Assessment of fieldscale zero liquid discharge treatment systems for recovery of water and salt from textile effluents. **Journal of Cleaner Production** 16: 1,081-1,089

Wang, J. 1994. **Analytical Electrichemistry**. VCH, New York.

Wu, C. 2008. Effects of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Red 198 in UV/TiO_2-based systems. **Dye and Pigment** 77: 31-38.

Xu, X.R. and X.Z. Li. 2010. Degradation of azo dye Orange G in aqueous solutions by persulfate with ferrous ion. **Separation and Purification Technology** 72: 105-111.

Yang, G.C.C. and H.L. Lee. 2005. Chemical reduction of nitrate by nanosized iron:kinetics and pathways. **Water Research** 39: 884-894.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Yang S., W. Ping, Y. Xin, S. Liang, Z. Wenyi, S. Xueting and N. Rui. 2010. Degradation efficiencies of azo dye Acid Orange 7 by the interaction of the heat, UV and anions with common oxidants: Persulfate, peroxymonosulfate and hydrogen peroxide. **Journal of Hazardous Materials** 179: 552-558.

Yang S., Y. Xin, S. Xueting, N.Rui and W.Leilei. 2011. Activated carbon catalyxed persulfate oxidation of Azo dye acid orange 7 at ambient temperature**. Journal of Hazardous Materials** 186: 659-666.

Yeber M.C., D. L. and J.F. 2010. Catalytic activity of the $SO_4^{-\bullet}$ radical for photodegration of the azo dye Cibacron Brilliant Yellow 3 and 3,4-dichlorophenol: Optimization by application of response surface methodology. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** 215: 90-95.

Zhao J., Y. Zhang, X. Quan and S. Chen. 2010. Enhanced oxidation of 4-chlorophenol using sulfate radicals generated from zero-valent iron and peroxydisulfate at ambient temperature. **Separation and Purification Technology** 71: 302-307

Zollinger, H. 1991. **Synthetic, Property and Application of Organic Dyes and Pigments.** Weinheim, New York.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. วิธีการเตรียมกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์เริ่มต้น

1.1 เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ มาตรฐานนำมาใช้งาน (working standard solution) เริ่มจากเตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 0, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.2 นำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร

1.3 นำค่าที่อ่านได้มาคำนวณความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ แต่ละความเข้มข้น จากนั้นนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าที่วัดได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ทำการศึกษาต่อไป

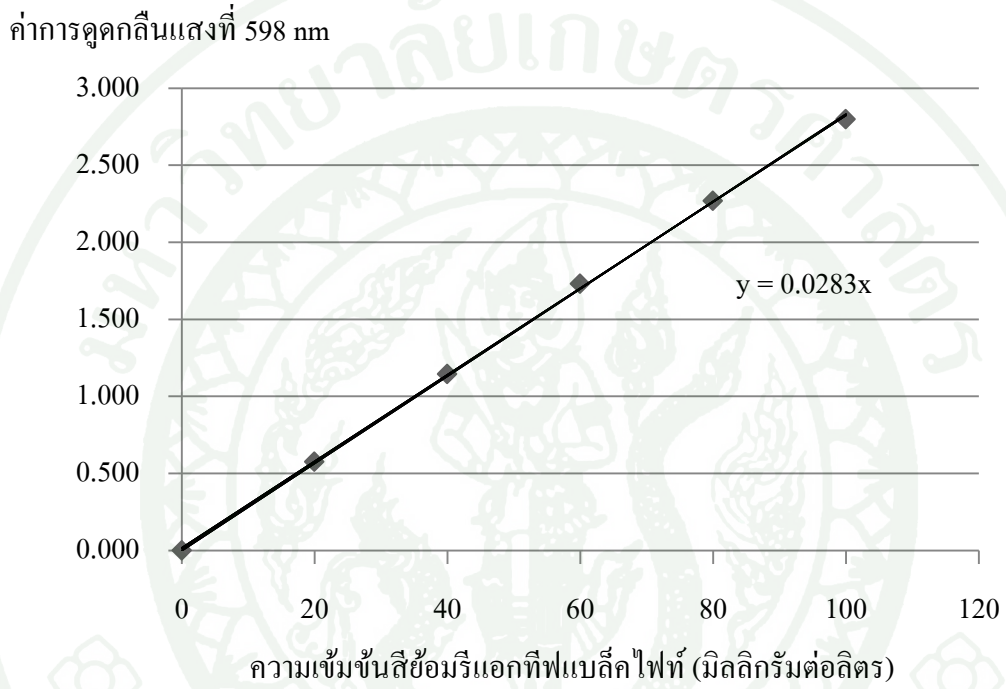
2. ผลการทดลองการสร้างกราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

ตารางผนวกที่ ก1 ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ (598 นาโนเมตร)
1	0	0.000
2	20	0.576
3	40	1.145
4	60	1.732
5	80	2.270
6	100	2.798

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลของการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 0, 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเครื่อง UV-Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 598 นาโนเมตร พบว่าเส้นกราฟความเข้มข้นมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9996 และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ค่า R^2 เป็นที่ยอมรับมีค่ามากกว่า 0.9995)



ภาพผนวกที่ ก1 กราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 200 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.334	2.495	2.458	2.429	85.830	14.170
1	2.341	2.312	2.344	2.332	82.415	17.585
2	2.011	2.027	2.022	2.020	71.378	28.622
3	1.545	1.529	1.576	1.550	54.770	45.230
4	1.063	1.107	1.104	1.091	38.563	61.437
5	0.892	0.985	0.887	0.921	32.556	67.444
6	0.888	0.659	0.737	0.761	26.902	73.098
8	0.596	0.573	0.428	0.532	18.810	81.190
10	0.493	0.400	0.371	0.421	14.888	85.112
12	0.139	0.075	0.089	0.101	3.569	96.431
24	0.006	0.007	0.008	0.007	0.247	99.753

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 300 มิลลิโมลาร์ และใช้เฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.311	2.334	2.312	2.319	81.943	18.057
1	2.209	2.244	2.241	2.231	78.846	21.154
2	1.995	1.945	1.995	1.978	69.906	30.094
3	1.361	1.352	1.377	1.363	48.174	51.826
4	0.797	0.894	0.875	0.855	30.224	69.776
5	0.601	0.636	0.542	0.593	20.954	79.046
6	0.401	0.397	0.392	0.397	14.016	85.984
8	0.251	0.344	0.208	0.268	9.458	90.542
10	0.181	0.165	0.159	0.168	5.948	94.052
12	0.122	0.080	0.129	0.110	3.899	96.101
24	0.004	0.002	0.004	0.003	0.118	99.882

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.301	2.290	2.280	2.290	80.931	19.069
1	2.027	2.107	2.005	2.046	72.309	27.691
2	1.328	1.393	1.337	1.353	47.797	52.203
3	0.691	0.578	0.694	0.654	23.121	76.879
4	0.172	0.189	0.172	0.178	6.278	93.722
5	0.141	0.163	0.159	0.154	5.453	94.547
6	0.132	0.111	0.129	0.124	4.382	95.618
8	0.066	0.062	0.063	0.064	2.250	97.750
10	0.037	0.041	0.035	0.038	1.331	98.669
12	0.031	0.034	0.033	0.033	1.154	98.846
24	0.000	0.000	0.001	0.000	0.012	99.988

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการใช้สารเปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และใช้สารเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.222	2.271	2.155	2.216	78.304	21.696
1	1.594	1.681	1.716	1.664	58.787	41.213
2	1.652	1.704	1.538	1.631	57.644	42.356
3	1.041	0.920	0.952	0.971	34.311	65.689
4	0.371	0.407	0.466	0.415	14.653	85.347
5	0.227	0.304	0.238	0.256	9.058	90.942
6	0.139	0.108	0.138	0.128	4.535	95.465
8	0.105	0.098	0.074	0.092	3.263	96.737
10	0.061	0.060	0.062	0.061	2.155	97.845
12	0.046	0.015	0.041	0.034	1.201	98.799
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.142	2.165	2.150	2.152	76.05	23.95
1	1.979	1.917	1.954	1.950	68.90	31.10
2	1.319	1.298	1.338	1.318	46.58	53.42
4	0.536	0.551	0.404	0.497	17.56	82.44
6	0.138	0.138	0.234	0.170	6.01	93.99
8	0.100	0.14	0.157	0.132	4.68	95.32
10	0.076	0.071	0.055	0.067	2.38	97.62
12	0.006	0.009	0.004	0.006	0.22	99.78
24	0.002	0.002	0.000	0.001	0.05	99.95

ตารางผนวกที่ ข5 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เจือจาง 5 เท่า	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	0.988	0.877	0.916	0.927	32.76	163.78	18.11
1	0.893	0.798	0.864	0.852	30.09	150.47	24.76
2	0.766	0.731	0.783	0.760	26.86	134.28	32.86
4	2.283	2.281	2.213	2.259	79.82		60.09
6	1.286	1.172	1.298	1.252	44.24		77.88
8	0.774	0.699	0.687	0.720	25.44		87.28
10	0.533	0.592	0.567	0.564	19.93		90.04
12	0.447	0.477	0.476	0.467	16.49		91.76
24	0.312	0.228	0.252	0.264	9.33		95.34

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เจือจาง 5 เท่า	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	1.361	1.352	1.377	1.363	48.17	240.87	19.71
2	1.239	1.256	1.181	1.225	43.30	216.49	27.84
4	0.989	0.976	0.954	0.973	34.38	171.91	42.70
6	0.747	0.722	0.652	0.707	24.98	124.91	58.36
8	0.566	0.528	0.535	0.543	19.19	95.94	68.02
10	0.495	0.481	0.396	0.457	16.16	80.80	73.07
12	1.646	1.734	1.773	1.718	60.69		79.77
24	1.418	1.335	1.292	1.348	47.64		84.12

ตารางผนวกที่ ข8 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เจือจาง 5 เท่า	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	2.445	2.427	2.375	2.416	85.36	426.80	14.64
2	2.395	2.321	2.329	2.348	82.98	414.90	17.02
4	2.027	2.035	2.039	2.034	71.86	359.31	28.14
6	1.786	1.707	1.716	1.736	61.35	306.77	38.65
8	1.603	1.534	1.563	1.567	55.36	276.80	44.64
10	1.321	1.431	1.447	1.400	49.46	247.29	50.54
12	2.885	2.891	2.789	2.888	102.05		79.59
24	2.742	2.797	2.865	2.801	98.99		80.20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข9 ผลของการใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์ ในการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เจือจาง 5 เท่า	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	1.816	1.812	1.846	1.825	64.48	322.38	19.41
2	1.731	1.687	1.695	1.704	60.22	301.12	24.72
4	1.428	1.400	1.382	1.403	49.59	247.94	38.02
6	1.209	1.223	1.218	1.217	42.99	214.96	46.26
8	1.102	1.077	1.189	1.123	39.67	198.35	50.41
10	0.992	0.957	0.818	0.922	32.59	162.96	59.26
12	2.605	2.637	2.733	2.658	93.93		76.52
24	1.688	1.906	1.813	1.802	63.69		84.08

ตารางผนวกที่ ข6 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 0.5 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	1.387	0.762	1.358	1.075	37.968	62.032
2	1.852	1.872	1.988	1.904	67.279	32.721
3	1.612	1.774	1.683	1.690	59.706	40.294
4	1.487	1.653	1.443	1.528	53.981	46.019
5	1.032	0.909	1.073	1.005	35.501	64.499
6	0.684	0.595	0.617	0.632	22.332	77.668
8	0.411	0.411	0.342	0.388	13.710	86.290
10	0.302	0.380	0.243	0.308	10.895	89.105
12	0.074	0.075	0.076	0.075	2.650	97.350
24	0.013	0.001	0.009	0.008	0.271	99.729

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 1 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	1.936	2.094	1.969	2.000	70.660	29.340
2	1.954	1.799	1.856	1.870	66.066	33.934
3	1.577	1.467	1.437	1.494	52.780	47.220
4	1.417	1.514	1.452	1.461	51.625	48.375
5	1.177	1.414	1.201	1.264	44.664	55.336
6	1.420	0.699	0.688	0.936	33.062	66.938
8	0.511	0.495	0.625	0.544	19.211	80.789
10	0.275	0.329	0.216	0.273	9.658	90.342
12	0.129	0.141	0.182	0.151	5.324	94.676
24	0.014	0.018	0.021	0.018	0.624	99.376

ตารางผนวกที่ ข12 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	0.769	0.655	0.789	0.738	26.066	73.934
2	0.455	0.367	0.347	0.390	13.769	86.231
3	0.287	0.106	0.192	0.195	6.890	93.110
4	0.084	0.115	0.097	0.099	3.486	96.514
5	0.067	0.052	0.079	0.066	2.332	97.668
6	0.045	0.035	0.041	0.040	1.425	98.575
8	0.035	0.028	0.024	0.029	1.025	98.975
10	0.015	0.029	0.026	0.023	0.824	99.176
12	0.012	0.011	0.011	0.011	0.400	99.600
24	0.002	0.002	0.002	0.002	0.071	99.929

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข13 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์รัสไอออน 8 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	0.381	0.371	0.323	0.358	12.662	87.338
2	0.077	0.103	0.086	0.089	3.133	96.867
3	0.051	0.049	0.069	0.056	1.991	98.009
4	0.029	0.036	0.029	0.031	1.107	98.893
5	0.019	0.024	0.069	0.037	1.319	98.681
6	0.016	0.014	0.011	0.014	0.483	99.517
8	0.010	0.009	0.008	0.009	0.318	99.682
10	0.006	0.007	0.006	0.006	0.224	99.776
12	0.005	0.004	0.004	0.004	0.153	99.847
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000

ตารางผนวกที่ ข14 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม ต่อลิตร โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์และเฟอร์ริกไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	0.606	0.631	0.603	0.613	21.673	78.327
2	0.204	0.306	0.308	0.273	9.635	90.365
3	0.105	0.106	0.112	0.108	3.804	96.196
4	0.069	0.087	0.065	0.074	2.603	97.397
5	0.048	0.045	0.044	0.046	1.614	98.386
6	0.027	0.013	0.028	0.023	0.801	99.199
8	0.022	0.019	0.020	0.020	0.718	99.282
10	0.017	0.014	0.014	0.015	0.530	99.470
12	0.012	0.011	0.010	0.011	0.389	99.611
24	0.001	0.000	0.000	0.000	0.012	99.988

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข15 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเหล็กวาเลนท์ศูนย์ 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	0.092	0.060	0.015	0.056	1.961	98.039
2	0.083	0.074	0.092	0.083	2.933	97.067
3	0.093	0.054	0.092	0.080	2.815	97.185
4	0.011	0.014	0.052	0.026	0.907	99.093
5	0.018	0.023	0.024	0.022	0.766	99.234
6	0.017	0.008	0.063	0.029	1.037	98.963
8	0.012	0.013	0.012	0.013	0.442	99.558
10	0.032	0.036	0.036	0.034	1.201	98.799
12	0.063	0.025	0.017	0.035	1.237	98.763
24	0.034	0.096	0.038	0.056	1.979	98.021

ตารางผนวกที่ ข16 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และซิลเวอร์ไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	2.128	2.150	2.157	2.145	75.795	24.205
2	1.845	1.823	1.758	1.809	63.910	36.090
3	1.428	1.559	1.516	1.501	53.039	46.961
4	1.244	1.139	1.133	1.172	41.413	58.587
5	0.919	0.944	0.885	0.916	32.367	67.633
6	0.554	0.572	0.520	0.549	19.388	80.612
8	0.150	0.140	0.140	0.143	5.065	94.935
10	0.111	0.124	0.102	0.112	3.969	96.031
12	0.099	0.114	0.066	0.093	3.286	96.714
24	0.041	0.058	0.041	0.050	1.749	98.251

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข17 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และซิลเวอร์นาโน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	1.849	1.922	1.922	1.886	66.625	33.375
2	0.879	0.894	0.878	0.887	31.325	68.675
3	0.557	0.580	0.517	0.551	19.482	80.518
4	0.210	0.186	0.115	0.170	6.019	93.981
5	0.094	0.087	0.064	0.082	2.886	97.114
6	0.047	0.029	0.039	0.038	1.355	98.645
8	0.038	0.014	0.026	0.026	0.919	99.081
10	0.018	0.011	0.009	0.013	0.448	99.552
12	0.010	0.009	0.006	0.008	0.294	99.706
24	0.007	0.005	0.005	0.006	0.200	99.800

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข18 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง สุดท้าย	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	4.92	4.44	0.305	0.226	0.108	0.213	7.527	92.473
2	4.88	4.32	0.078	0.058	0.073	0.070	2.462	97.538
3	4.87	4.24	0.016	0.019	0.025	0.020	0.707	99.293
4	4.78	4.19	0.015	0.011	0.014	0.013	0.471	99.529
5	4.66	4.31	0.008	0.004	0.007	0.006	0.224	99.776
6	4.71	4.22	0.007	0.005	0.002	0.005	0.165	99.835
8	4.60	3.62	0.003	0.007	0.007	0.006	0.200	99.800
10	4.91	4.12	0.001	0.006	0.003	0.003	0.118	99.882
12	4.53	3.64	0.000	0.001	0.002	0.001	0.035	99.965
24	4.73	3.46	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข19 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง สุดท้าย	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	6.43	4.48	0.505	0.313	0.491	0.436	15.418	84.582
2	6.33	5.04	0.376	0.266	0.391	0.344	12.167	87.833
3	5.42	4.25	0.178	0.098	0.102	0.126	4.452	95.548
4	6.36	4.48	0.061	0.072	0.045	0.059	2.097	97.903
5	5.29	4.34	0.024	0.039	0.029	0.031	1.084	98.916
6	5.75	4.24	0.011	0.018	0.015	0.015	0.518	99.482
8	5.45	4.28	0.005	0.010	0.009	0.008	0.283	99.717
10	5.33	4.22	0.004	0.003	0.001	0.003	0.094	99.906
12	5.21	4.01	0.003	0.002	0.001	0.002	0.071	99.929
24	5.36	4.19	0.001	0.001	0.000	0.001	0.024	99.976

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข20 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง สุดท้าย	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	6.95	5.05	0.798	0.796	0.703	0.766	27.055	72.945
2	6.94	4.85	0.544	0.474	0.498	0.505	17.856	82.144
3	7.59	5.33	0.104	0.251	0.122	0.159	5.618	94.382
4	6.22	4.81	0.098	0.057	0.078	0.078	2.744	97.256
5	6.21	4.92	0.056	0.046	0.043	0.048	1.708	98.292
6	6.72	4.11	0.026	0.028	0.016	0.023	0.824	99.176
8	6.54	4.75	0.017	0.016	0.013	0.015	0.542	99.458
10	6.23	4.22	0.018	0.011	0.013	0.014	0.495	99.505
12	6.11	5.02	0.003	0.002	0.008	0.004	0.153	99.847
24	5.94	4.45	0.002	0.003	0.002	0.002	0.082	99.918

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข21 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 โดยใช้เปอร์ซัลเฟต 400 มิลลิโมลาร์ และเฟอร์รัสไอออน 4 มิลลิโมลาร์

ชั่วโมง	ค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง สุดท้าย	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	10.95	10.83	1.791	1.658	1.498	1.649	58.269	41.731
2	10.93	10.86	1.191	1.122	1.041	1.118	39.505	60.495
3	10.94	10.86	0.876	0.677	0.524	0.692	24.464	75.536
4	10.97	10.87	0.399	0.382	0.368	0.383	13.534	86.466
5	10.89	10.90	0.327	0.321	0.356	0.335	11.826	88.174
6	10.90	10.88	0.308	0.301	0.303	0.304	10.742	89.258
8	10.94	10.77	0.276	0.279	0.251	0.269	9.494	90.506
10	10.98	10.88	0.201	0.234	0.192	0.209	7.385	92.615
12	10.95	10.86	0.151	0.177	0.153	0.160	5.665	94.335
24	10.92	10.81	0.031	0.055	0.093	0.060	2.108	97.892

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข22 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	1.940	1.917	1.834	1.897	67.032	32.968
1	1.732	1.641	1.823	1.732	61.201	38.799
2	1.491	1.421	1.495	1.469	51.908	48.092
3	1.210	1.163	1.268	1.214	42.886	57.114
4	0.876	1.028	0.907	0.937	33.110	66.890
5	0.558	0.573	0.527	0.553	19.529	80.471
6	0.228	0.364	0.371	0.321	11.343	88.657
8	0.130	0.141	0.153	0.141	4.994	95.006
10	0.067	0.079	0.058	0.068	2.403	97.597
12	0.057	0.054	0.067	0.059	2.097	97.903
24	0.005	0.006	0.005	0.005	0.188	99.812

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข23 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	1.989	2.011	1.964	1.988	70.247	29.753
1	1.681	1.747	1.813	1.747	61.731	38.269
2	1.741	1.656	1.630	1.676	59.211	40.789
3	1.287	1.380	1.427	1.365	48.221	51.779
4	1.157	1.134	1.119	1.137	40.165	59.835
5	0.852	0.977	0.857	0.895	31.637	68.363
6	0.600	0.682	0.706	0.663	23.416	76.584
8	0.392	0.283	0.228	0.301	10.636	89.364
10	0.211	0.234	0.203	0.216	7.633	92.367
12	0.135	0.188	0.128	0.150	5.312	94.688
24	0.007	0.016	0.009	0.011	0.377	99.623

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข24 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.081	2.165	2.039	2.095	74.028	25.972
1	1.988	2.011	2.057	2.019	71.331	28.669
2	1.719	1.676	1.665	1.687	59.600	40.400
3	1.514	1.438	1.413	1.455	51.413	48.587
4	1.343	1.207	1.330	1.293	45.701	54.299
5	0.920	1.012	1.047	0.993	35.088	64.912
6	0.812	0.838	0.696	0.782	27.633	72.367
8	0.526	0.411	0.433	0.457	16.137	83.863
10	0.229	0.234	0.349	0.271	9.564	90.436
12	0.174	0.163	0.171	0.169	5.984	94.016
24	0.021	0.025	0.011	0.019	0.671	99.329

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข25 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเฟอร์รัสไอออนเท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	2.121	2.011	2.069	2.067	73.039	26.961
1	2.069	2.114	1.992	2.058	72.733	27.267
2	1.891	1.904	1.795	1.863	65.842	34.158
3	1.471	1.609	1.536	1.539	54.370	45.630
4	1.306	1.175	1.243	1.241	43.863	56.137
5	1.149	1.129	0.991	1.090	38.504	61.496
6	0.828	0.678	0.756	0.754	26.643	73.357
8	0.736	0.596	0.699	0.677	23.922	76.078
10	0.452	0.368	0.396	0.405	14.323	85.677
12	0.190	0.089	0.132	0.137	4.841	95.159
24	0.018	0.006	0.013	0.012	0.436	99.564

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข26 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	0.037	0.052	0.041	0.043	1.53	98.47
1	0.057	0.035	0.022	0.038	1.34	98.66
2	0.067	0.045	0.099	0.070	2.49	97.51
3	0.051	0.052	0.079	0.066	2.31	97.69
4	0.034	0.059	0.057	0.050	1.77	98.23
5	0.093	0.039	0.072	0.068	2.40	97.60
6	0.061	0.055	0.026	0.047	1.67	98.33
8	0.084	0.087	0.065	0.079	2.78	97.22
10	0.062	0.035	0.058	0.052	1.83	98.17
12	0.051	0.037	0.041	0.043	1.52	98.48
24	0.023	0.016	0.091	0.043	1.53	98.47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข27 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	0.058	0.063	0.036	0.052	1.85	98.15
1	0.045	0.051	0.06	0.052	1.84	98.16
2	0.032	0.045	0.026	0.034	1.21	98.79
3	0.029	0.046	0.035	0.037	1.30	98.70
4	0.033	0.078	0.06	0.057	2.01	97.99
5	0.030	0.069	0.04	0.046	1.64	98.36
6	0.039	0.043	0.066	0.049	1.74	98.26
8	0.04	0.023	0.060	0.041	1.45	98.55
10	0.028	0.053	0.04	0.040	1.43	98.57
12	0.035	0.033	0.083	0.050	1.78	98.22
24	0.022	0.017	0.029	0.023	0.80	99.20

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข28 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	0.049	0.085	0.054	0.063	2.21	97.79
1	0.053	0.043	0.043	0.048	1.70	98.30
2	0.034	0.040	0.038	0.037	1.32	98.68
3	0.038	0.047	0.036	0.040	1.43	98.57
4	0.037	0.066	0.073	0.059	2.07	97.93
5	0.068	0.041	0.055	0.055	1.93	98.07
6	0.066	0.038	0.067	0.057	2.01	97.99
8	0.025	0.043	0.059	0.042	1.50	98.50
10	0.025	0.051	0.076	0.051	1.79	98.21
12	0.089	0.054	0.09	0.078	2.74	97.26
24	0.032	0.021	0.05	0.034	1.21	98.79

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข29 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรที่มีปริมาณคลอไรด์ไอออนความเข้มข้น 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สัดส่วนความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟตต่อเหล็กวาเลนท์ศูนย์เท่ากับ 400 ต่อ 4

ชั่วโมง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
0.5	0.068	0.092	0.105	0.088	3.12	96.88
1	0.038	0.038	0.056	0.044	1.55	98.45
2	0.038	0.036	0.057	0.044	1.54	98.46
3	0.035	0.031	0.085	0.050	1.78	98.22
4	0.040	0.036	0.062	0.046	1.63	98.37
5	0.078	0.046	0.069	0.064	2.27	97.73
6	0.044	0.041	0.035	0.040	1.41	98.59
8	0.039	0.058	0.023	0.040	1.41	98.59
10	0.067	0.034	0.035	0.045	1.60	98.40
12	0.05	0.029	0.041	0.040	1.41	98.59
24	0.025	0.032	0.079	0.045	1.60	98.40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข30 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาตามแผนการทดลอง CCD โดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

ลำดับตัวอย่าง	รหัสปัจจัยของการทดลอง CCD			เปอร์ซัลเฟต	เฟอร์รัสไอออน	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	-1.000	-1.000	-1.000	300	2	3	0.801	0.803	0.921	0.842±0.069	29.741	70.259
2	-1.000	-1.000	1.000	300	2	9	0.854	0.831	0.935	0.873±0.055	30.860	69.140
3	-1.000	1.000	-1.000	300	8	3	0.551	0.649	0.569	0.590±0.052	20.836	79.164
4	-1.000	1.000	1.000	300	8	9	0.534	0.654	0.516	0.568±0.075	20.071	79.929
5	1.000	-1.000	-1.000	500	2	3	0.646	0.692	0.631	0.656±0.032	23.192	76.808
6	1.000	-1.000	1.000	500	2	9	1.614	1.581	1.644	1.613±0.032	56.996	43.004
7	1.000	1.000	-1.000	500	8	3	0.694	0.553	0.562	0.603±0.079	21.307	78.693
8	1.000	1.000	1.000	500	8	9	1.105	1.165	1.201	1.157±0.048	40.883	59.117
9	-1.686	0.000	0.000	232	4	5	1.129	1.243	1.133	1.168±0.065	41.284	58.716
10	0.000	-1.686	0.000	400	0	5	1.791	1.879	1.723	1.798±0.078	63.522	36.478
11	0.000	0.000	-1.686	400	4	1	0.245	0.271	0.348	0.288±0.054	10.177	89.823
12	1.686	0.000	0.000	568	4	5	0.365	0.415	0.357	0.379±0.031	13.392	86.608
13	0.000	1.686	0.000	400	10	5	0.019	0.031	0.024	0.025±0.006	0.872	99.128
14	0.000	0.000	1.686	400	4	11	0.1770	0.1720	0.1610	0.170±0.008	6.007	93.993

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข30 (ต่อ)

ลำดับตัวอย่าง	รหัสปัจจัยของการทดลอง CCD			เปอร์ซัลเฟต	เฟอร์รัสไอออน	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
15	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.101	0.011	0.004	0.039±0.054	1.366	98.634
16	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.015	0.101	0.034	0.050±0.045	1.767	98.233
17	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.018	0.104	0.031	0.051±0.046	1.802	98.198
18	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.063	0.039	0.052	0.051±0.012	1.814	98.186
19	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.041	0.057	0.027	0.042±0.015	1.472	98.528
20	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.048	0.014	0.007	0.023±0.022	0.813	99.187

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข31 ผลของการย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาตามแผนการทดลอง CCD โดยศึกษา 3 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารเปอร์ซัลเฟต ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนท์ศูนย์ และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

ลำดับตัวอย่าง	รหัสปัจจัยของการทดลอง CCD			เปอร์ซัลเฟต	เหล็กวาเลนท์ศูนย์	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
1	-1.000	-1.000	-1.000	300	2	5	0.464	0.456	0.334	0.418±0.073	14.770	85.230
2	-1.000	-1.000	1.000	300	2	9	0.546	0.574	0.511	0.544±0.032	19.211	80.789
3	-1.000	1.000	-1.000	300	8	5	0.302	0.281	0.283	0.289±0.012	10.200	89.800
4	-1.000	1.000	1.000	300	8	9	0.365	0.386	0.293	0.348±0.049	12.297	88.999
5	1.000	-1.000	-1.000	500	2	5	0.272	0.327	0.243	0.281±0.043	9.918	90.082
6	1.000	-1.000	1.000	500	2	9	0.276	0.273	0.272	0.274±0.002	9.670	90.330
7	1.000	1.000	-1.000	500	8	5	0.119	0.113	0.118	0.117±0.003	4.122	95.878
8	1.000	1.000	1.000	500	8	9	0.186	0.194	0.189	0.190±0.004	6.702	93.769
9	-1.686	0.000	0.000	232	4	6	0.906	0.956	0.968	0.943±0.033	33.333	71.378
10	0.000	-1.686	0.000	400	0	6	0.718	0.729	0.765	0.737±0.025	26.054	85.724
11	0.000	0.000	-1.686	400	4	3	0.091	0.094	0.092	0.092±0.002	3.263	96.620
12	1.686	0.000	0.000	568	4	6	0.101	0.101	0.107	0.103±0.003	3.640	97.680
13	0.000	1.686	0.000	400	10	6	0.011	0.015	0.014	0.013±0.002	0.471	99.647
14	0.000	0.000	1.686	400	4	10	0.1080	0.1080	0.092	0.103±0.009	3.628	96.761

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข31 (ต่อ)

ลำดับตัวอย่าง	รหัสปัจจัยของการทดลอง CCD			เปอร์ซัลเฟต	เหล็กวาเลนท์ศูนย์	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ความเข้มข้นที่เหลือ	เปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย
15	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.101	0.011	0.004	0.039±0.013	2.532	97.468
16	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.015	0.101	0.034	0.050±0.008	1.790	98.210
17	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.018	0.104	0.031	0.051±0.009	2.709	97.291
18	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.063	0.039	0.052	0.051±0.008	2.238	97.762
19	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.041	0.057	0.027	0.042±0.010	1.908	98.092
20	0.000	0.000	0.000	400	4	5	0.048	0.014	0.007	0.023±0.004	1.943	98.057

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวปิ่นนารี บ้งพรม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	17 มิถุนายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) คณะทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุนการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัยของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์