

การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเคลือบบนพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต)
สำหรับการขจัดฟีนอลจากน้ำเสีย



นางสาวสุนิสตา เลื่อนลอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF PHOTOCATALYTIC TiO₂ COATED ON POLY(METHYL
METHACRYLATE) FOR PHENOL REMOVAL FROM WASTEWATER

Miss. Tanisata Luenloi

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเคลือบบน
พอลิ(เมทิลเมทาคริเลต)สำหรับการขจัดฟีนอลจากน้ำเสีย

โดย

นางสาวรุณิสตา เลื่อนลอย

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

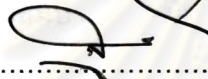
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา นิญชีระนันท์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์

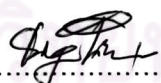
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา นิญชีระนันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ เพ็ชษาทร)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เทวรักษ์ ไรจนเพ็ชร์)

รฐนิสตา เลื่อนลอย : การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเคลือบบนพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต)สำหรับการขจัดฟีนอลจากน้ำเสีย (PREPARATION OF PHOTOCATALYTIC TiO_2 COATED ON POLY(METHYL METHACRYLATE) FOR PHENOL REMOVAL FROM WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณฐิระนันท์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ ศรีทะวงศ์, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการขจัดฟีนอลโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยเทคนิคการจุ่มเคลือบ ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบผิวต่อลักษณะและประสิทธิภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตในการขจัดฟีนอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะประกอบด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต (9 วัตต์/หลอด) จำนวน 15 หลอด และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม (500 มิลลิกรัม) ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ การสลายตัวของฟีนอลขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเป็นกรด-เบสของสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต อัตราการไหลของออกซิเจน และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3 เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต 3 รอบ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของระบบ คือ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 8 แผ่นในสารละลายฟีนอลด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด-เบสที่ 5 และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 0.62 โมลาร์ ภายใต้กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ 135 วัตต์และอัตราการไหลของออกซิเจนที่ 200 มิลลิกรัมต่อนาที ที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่ามีอัตราการสลายตัวของฟีนอลได้สูงสุดถึง 7.2×10^{-3} นาที⁻¹ (ขจัดฟีนอลได้ 91.4%)

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต นพิตา เลื่อนลอย.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... นพิตา.....
 ปีการศึกษา.....2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... ธรรมนุญ.....

5172570723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : TITANIUM DIOXIDE / PHOTOCATALYTIC / POLY(METHYL METHACRYLATE) / PHENOL

TANISATA LUENLOI : PREPARATION OF PHOTOCATALYTIC TiO₂ COATED ON POLY(METHYL METHACRYLATE) FOR PHENOL REMOVAL FROM WASTEWATER. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. THAMMANOON SREETHAWONG, Ph.D., 104 pp.

This research aims to study the phenol removal via photooxidation catalyzed by using titanium dioxide (TiO₂) coated on poly(methyl methacrylate) (PMMA) sheets prepared by dip-coated technique. The effects of mole ratio of acetylacetone (ACAC) to TiO₂ and the number of coating cycle on the characteristics and catalytic efficiency of thin film TiO₂ on PMMA sheets were also investigated. The reaction was carried out in a glass batch reactor equipped with 15 pieces of ultraviolet (UV) lamps (9 watts/lamps) for 5 h. The initial phenol concentration was kept constant at 50 ppm (500 mL). The influence of reaction parameters on the phenol removal efficiency were statistically evaluated by a two-level factorial design experimental. The degradation of phenol depended on several parameters such as the number of TiO₂-coated on PMMA sheets, pH of phenol solution, initial phenol concentration, H₂O₂ concentration, power of UV lamp, oxygen flow rate and temperature. The experimental data exhibited that the mole ratio of ACA to TiO₂ at 3 with 3 coating cycles. The optimum conditions were obtained from 8 sheets of TiO₂-coated on PMMA sheets in the phenol solution with initial concentration as 50 ppm, 5 of pH value, 0.62 M of H₂O₂ concentration. Under UV lamp power at 135 W and 200 ml/min of oxygen flow rate at 30°C to reach the degradation rate constant of 7.2×10⁻³ min⁻¹ (phenol removal of 91.4%).

Department :	Chemical Technology	Student's Signature	Tanisata Luenloi
Field of Study :	Chemical Technology	Advisor's Signature	Napida Hinchiranan
Academic Year :	2010	Co-Advisor's Signature	T. Sathay

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณฺฐิระนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธรรมนุญ ศรีทะวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัยตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการทุนวิจัยมหาวิทยาลัย สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG-WII525S017 และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิชและดร. เทวรักษ์ ไรจนพฤษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนถึงคำแนะนำ เสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 สมบัติของพินอล.....	7
2.2.1 ข้อมูลทั่วไป.....	7
2.2.2 การใช้งาน.....	8
2.2.3 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม.....	9
2.2.4 ความเป็นพิษ.....	9
2.2.4.1 ความเป็นพิษต่อสัตว์.....	9
2.2.4.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์.....	9
2.3 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า.....	10
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	12
2.4.1 คำจำกัดความ.....	12

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	2.4.2 โครงสร้างผลึกและสมบัติ.....	13
	2.4.3 ลักษณะของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและความว่องไวของตัวเร่ง ปฏิกิริยาเชิงแสง.....	16
2.5	กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	17
	2.5.1 ข้อมูลทั่วไป.....	17
	2.5.2 หลักการของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	18
	2.5.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของพีนอล.....	24
2.6	แสง.....	25
2.7	พอลิเมทิลเมทาคริลิต.....	26
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
	3.2 สารเคมีที่ใช้.....	30
	3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
	3.3.1 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง.....	32
	3.3.2 การเตรียมผิวแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิต.....	32
	3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	32
	3.3.4 การทดลองออกซิเดชันเชิงแสงของพีนอลเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเท เนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิต.....	33
	3.3.5 ทดสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียม ไดออกไซด์.....	35
	3.3.5.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	35
	3.3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
	3.3.5.3 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	36
3.4	การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล สองระดับ.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.4.1	ผลตกค้างและการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง..... 40
3.4.1.1	ความสัมพันธ์ของ Normal probability กับผลตกค้าง..... 41
3.4.1.2	ความสัมพันธ์ของผลตกค้างกับค่าทำนาย..... 41
3.4.2	สมการถดถอย..... 41
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 42
4.1	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ และจำนวนรอบในการเคลือบต่อลักษณะและประสิทธิภาพในการจัด ฟันอล..... 42
4.2	ผลของอุณหภูมิในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการ จัดฟันอล..... 46
4.3	จลนศาสตร์ของการกำจัดฟันอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยา ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... 47
4.3.1	ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเท เนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟันอล..... 48
4.3.2	ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่ออัตราการสลายตัวของฟันอล..... 50
4.3.3	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟันอลต่ออัตราการสลายตัว ของฟันอล..... 53
4.3.4	ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลาย ตัวของฟันอล..... 54
4.3.5	ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตรา การสลายตัวของฟันอล..... 56
4.3.6	ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออัตราการสลายตัว ของฟันอล..... 58
4.3.7	ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ออัตราการสลายตัว ของฟันอล..... 59

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล.....	61
4.4.1 สมการถดถอย.....	66
4.4.2 ผลตกค้างและการตรวจสอบความถูกต้อง.....	67
4.5 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อระดับการกำจัดของฟีนอล.....	70
4.6 การทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิต เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบของกระบวนการ ออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟีนอล.....	72
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	82
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	83
ภาคผนวก ค การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ.....	88
ภาคผนวก ง ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล.....	89
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของพีนอล.....	8
2.2	ตำแหน่งของแถบอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าบางชนิด.....	12
2.3	สมบัติของรูไทล์และอนาเทส.....	14
2.4	สารประกอบที่สามารถกำจัดด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้ไทเทเนียม ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการกำจัดพีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิล เมทาคริเลต.....	35
3.2	สภาวะของการออกแบบ 2^4 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล ด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	37
3.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบ 2^4	39
4.1	ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ และจำนวนรอบในการเคลือบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล.....	44
4.2	ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่จริงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	45
4.3	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐานแบบอนาเทสต่อรูไทล์ที่อุณหภูมิการเผา ไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน.....	47
4.4	ผลการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิ ภาพในการกำจัดพีนอล.....	62
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล แบบสองระดับจำนวน 4 ปัจจัย.....	64
4.6	การคำนวณค่าประมาณปัจจัย ค่าประมาณสัมประสิทธิ์และค่าคลาด เคลื่อนมาตรฐานของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล.....	65
4.7	ค่าจริง ค่าทำนายและผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดพีนอล.....	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของพีนอล.....	7
2.2 พีนอลในธรรมชาติ.....	7
2.3 โครงสร้างของพลังงานช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.4 โครงสร้างผลึกของอนาเทส รูไทล์ และบรูคไทล์.....	13
2.5 แถบของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าด้วยพลังงานศักย์ย้อนกลับ.....	17
2.6 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง.....	19
2.7 กลไกการเกิดออกซิเดชันเชิงแสงด้วยแสงของพีนอล.....	24
2.8 สเปกตรัมของแสง.....	25
2.9 สูตรโครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	26
3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	33
3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการกำจัดพีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	34
4.1 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์.....	42
4.2 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่จำนวนรอบในการเคลือบ.....	43
4.3 ผลของอุณหภูมิในการเผารูปแบบ XRD ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์.....	46
4.4 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดพีนอล.....	49
4.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดพีนอล.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	54
4.7 ผลของกำลังของหลอดยูวีต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	55
4.8 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	57
4.9 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	59
4.10 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	60
4.11 ผลการคำนวณตามสมการ Arrhenius Equation.....	60
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัยต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟินอล.....	63
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟินอล.....	69
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตกค้างกับค่าทำนายต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟินอล.....	69
4.15 ผลการคำนวณจากสมการถดถอยกับข้อมูลจากการทดลอง.....	71
4.16 จำนวนรอบในการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอล.....	72
4.17 จำนวนรอบของกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงในการลดปริมาณฟินอล.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟีนอลเป็นกลุ่มของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยวงเบนซีนและหมู่ไฮดรอกซิล ฟีนอลผลิตจากกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) ของเบนซีน หรือปฏิกิริยารีดักชันของกรดเบนโซอิกโดยกระบวนการควิเมน หรือโดยกระบวนการ Rasching Process นอกจากนี้ยังพบในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการออกซิเดชันของถ่านหิน (Chiou และคณะ, 2008) ฟีนอลนำไปใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมยา พลาสติก ปุ๋ย ระเบิด สี สิ่งทอ ยาง และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ฟีนอลยังเป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติกโดยใช้ในการผลิตบิสฟีนอล เอ (bisphenol A, BPA) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอีพ็อกซีเรซินและพอลิคาร์บอนเนตเรซิน อย่างไรก็ตามฟีนอลมีโทษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากฟีนอลสามารถซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ผิวหนังไหม้ได้ ฟีนอล 1 กรัมสามารถทำให้บุคคลที่ได้รับถึงแก่ชีวิต จากกฎหมายสิ่งแวดล้อมซึ่งออกโดย The Environmental Protection Agency ระบุว่าปริมาณฟีนอลในแหล่งน้ำต้องควบคุมให้น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Baker และคณะ, 1978) ดังนั้นอุตสาหกรรมใดที่ใช้ฟีนอลในกระบวนการผลิตมีความจำเป็นที่ต้องมีระบบบำบัดหรือขจัดสารประกอบฟีนอล โดยทั่วไปสามารถขจัดฟีนอลได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมดา ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถขจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Haggbloom และคณะ, 1998, Dorn และคณะ, 1988) กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเป็นกระบวนการที่ขจัดได้ช้า ต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังมีปัญหาในการขจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นอีกด้วย (Shibaeva และคณะ, 1969, Moza และคณะ, 1988) นอกจากนี้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ดูเหมือนจะใช้ได้ผลมากที่สุดก็จำเป็นต้องมีระบบภายหลังการดูดซับเพื่อขจัดฟีนอลและนำถ่านกัมมันต์หมุนเวียนกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง (Juan และคณะ, 1984) ดังนั้นเพื่อให้ฟีนอลถูกขจัดได้อย่างสมบูรณ์จึงจำเป็นต้องหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียที่มีฟีนอลปนเปื้อนเหล่านี้เข้าสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalytic) เป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียได้ โดยอาศัยสารที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor) เพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง สร้างส่วนที่เป็นแหล่งการเกิด

ออกซิเดชันเพื่อสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Baker และคณะ, 1978) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่นิยมนำมาใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้นั้นโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นผงขนาดนาโน จึงยากต่อการแยกไทเทเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำเสียภายหลังกระบวนการขจัดฟีนอลสิ้นสุดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องฝังไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับเพื่อให้ง่ายต่อการแยกภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ตัวรองรับต้องสามารถยอมให้แสงผ่านได้เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถรับแสงและทำงานต่อไปได้ เทคนิคการฝังไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับของแข็ง (impregnation technique) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาหลายวิธี ได้แก่ การจุ่มเคลือบ (dip coating) เทคนิคโซล-เจล (sol-gel) การเคลือบด้วยสเปรย์ (spray coating) และเทคนิคการพ่น (sputtering) (Hosseini และคณะ, 2007) โดยตัวรองรับโปร่งใสที่นำมาใช้งาน ได้แก่ เม็ดแก้ว (glass beads) (Karches และคณะ, 2002) หลอดแก้ว (glass tubes) (Lee และคณะ, 2002) และไฟเบอร์กลาส (fiber glass) (Horikoshi และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามการใช้แก้วอาจไม่เหมาะสมในการเป็นตัวรองรับไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับบางเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุเปราะ อาจเกิดความเสียหายได้เมื่อรับแรงกระแทกหากนำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนหรือฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed) นอกจากนี้แก้วยังมีความหนาแน่นมาก ทำให้มีน้ำหนักสูงจึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่เบดต้องมีการเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงสนใจที่จะนำพอลิเมอริโปร่งแสงมาใช้เป็นตัวรองรับสำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ตัวรองรับที่ใช้ คือ พอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งมีข้อดี เช่น ยอมให้แสงผ่านได้ถึง 92% มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อสิ่งแวดล้อมได้ดี (ปรีชา พหลเทพ, 2549)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำไทเทเนียมไดออกไซด์ไปเคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการขจัดสารประกอบฟีนอลออกจากน้ำเสีย ก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการสะสมหรือการอุดตันภายในเครื่องมือ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปในการแยกอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ออกภายหลังการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมทิลเมทาคริเลต
2. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมทิลเมทาคริเลตในการขจัดฟีนอลออกจากน้ำเสีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยเทคนิคการจุ่มเคลือบ (Yang และคณะ, 2006) โดยในงานวิจัยเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า Degussa P-25
2. ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตน (acetylacetone, ACA) ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ACA/TiO_2) จำนวนครั้งในการเคลือบ และอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยา (calcination temperature) ต่อลักษณะของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต
3. สร้างเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเพื่อสลายฟีนอลในน้ำเสียจำลอง
4. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง
5. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ในปฏิกิริยาเชิงแสงต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลในน้ำเสียจำลอง ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าความเป็นกรด-เบส ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เตรียมอุปกรณ์และสารเคมีต่าง ๆ ที่จำเป็นในการทดลอง
2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมทิลเมทาคริเลต
3. ทดสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมทิลเมทาคริเลต
4. สร้างเครื่องปฏิกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เตรียมได้ในการสลายสารละลายฟีนอล
5. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในการสลายฟีนอลโดยวัดปริมาณฟีนอลคงเหลือในน้ำเสียจำลองด้วยเครื่อง UV-visible spectrometer (UV-vis)

6. รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อขจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
2. ได้ภาวะการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟีนอลปนเปื้อน



ศูนย์วิทยพัทยาการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ในปัจจุบันประเทศต่าง ๆ ได้ตระหนักถึงปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น สารประกอบฟีนอลในน้ำก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก แหล่งที่มาที่สำคัญของฟีนอลคือ น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมยา พลาสติก ปุ๋ย ระเบิด สี สิ่งทอ ยาง และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เป็นต้น ฟีนอลยังเป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมพลาสติกโดยใช้ในการผลิตบิสฟีนอล เอ (bisphenol A, BPA) อาจรั่วไหลมากับน้ำเสีย ดังนั้นของเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต้องผ่านการบำบัดที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากฟีนอลเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรและละลายน้ำได้ดี จึงส่งผลให้ยากต่อการกำจัดฟีนอลในน้ำทิ้งเพื่อให้เป็นไปตามกฎหมายสิ่งแวดล้อมต้องควบคุมให้น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Baker และคณะ, 1978) โดยทั่วไปสามารถกำจัดฟีนอลได้หลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมดา ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Hagglblom และคณะ, 1998, Dorn และคณะ, 1988) กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนได้ช้า ต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังมีปัญหาในการขจัดกากตะกอนที่เกิดขึ้นอีกด้วย (Shibaeva และคณะ, 1969, Moza และคณะ, 1988) นอกจากนี้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ดูเหมือนจะใช้ได้ผลมากที่สุดก็จำเป็นต้องมีระบบภายหลังการดูดซับเพื่อขจัดฟีนอลและนำถ่านกัมมันต์หมุนเวียนกลับมาใช้อีกครั้งหนึ่ง (Juan และคณะ, 1984) การกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง (photooxidation) เป็นวิธีการที่มีราคาไม่สูงและได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมาก วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อม (Fujishima และคณะ, 2000) การใช้สารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมมากที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์ เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรทางกายภาพและเคมี เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง มีความสามารถในการออกซิไดซ์มาก ไม่มีพิษ และราคาถูก (Hu และคณะ, 2005)

นักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงในสารละลายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์แขวนลอยอยู่ภายใต้แสงสว่างที่ใกล้เคียงกับแสงอัลตราไวโอเล็ต และมีอากาศไหลผ่านได้ การอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามแบบจำลองของแลง

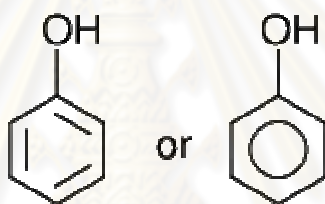
เมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood model) โดยอธิบายถึงลักษณะของปฏิกิริยาเกี่ยวกับอัตราเร็วในการกำจัดฟีนอลในรูปของการหายไปของฟีนอลหรือการเกิดขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ที่เป็นของเสีย ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นของแสงอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของประจุที่เป็นกับดักของอิเล็กตรอนและหลุมเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดฟีนอลด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (Chiou และคณะ, 2007) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายงานวิจัยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์แขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีสารอินทรีย์โดยตรง (Cheng และคณะ, 1995, Hermann, 1999) แต่เนื่องจากการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อเสีย คือ ต้องแยกผงไทเทเนียมไดออกไซด์หลังจากขบวนการบำบัดน้ำเสร็จสิ้นแล้ว เนื่องจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถติดอยู่ที่ผิวของภาชนะหรืออุปกรณ์ เช่น แก้ว ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งถ้าปล่อยให้สารแขวนลอยของไทเทเนียมไดออกไซด์นี้แห้งติดอยู่บนเครื่องแก้วจะขจัดออกได้ยาก คราบของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ติดอยู่ในภาชนะมีลักษณะเป็นฟิล์มเมื่อแห้งจะติดอยู่คล้ายขาว ไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำ นอกจากนี้ยังมีข้อเสียของการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยตรงอื่น ๆ อีก จึงมีการศึกษาเพื่อพัฒนาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงด้วยเทคนิคใหม่ ได้แก่ การยึดผงไทเทเนียมไดออกไซด์ไว้กับตัวรองรับ เช่น เม็ดแก้ว (Karches และคณะ, 2002) หลอดแก้ว (Lee และคณะ, 2002) และไฟเบอร์กลาส (Horikoshi และคณะ, 2002) แต่ยังคงมีข้อจำกัด คือ แก้วเป็นวัสดุเปราะ อาจเกิดความเสียหายได้เมื่อรับแรงกระแทกหากนำไปใช้ในถังกวน หรือฟลูอิดเบด นอกจากนี้แก้วยังมีน้ำหนักมาก ทำให้น้ำหนักสูงจึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเบดเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นการหาวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความใสในการทำเป็นตัวรองรับให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง และการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีความสามารถในการรับและยอมให้แสงผ่านทะลุเพื่อให้มีความส่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเชิงแสงได้ดี

จากงานวิจัยของ Hu และ Yuan (2006) พบว่าการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์ ได้แก่ แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยซิลิกอนออกไซด์ และยางซิลิโคนเคลือบด้วยซิลิกอนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ (dip-coating process) มีประสิทธิภาพดีในการสลาย Brilliant red dye X-3B ในน้ำภายใต้ภาวะที่มีการเป่าฟองอากาศ นอกจากนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อดี เช่น เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ

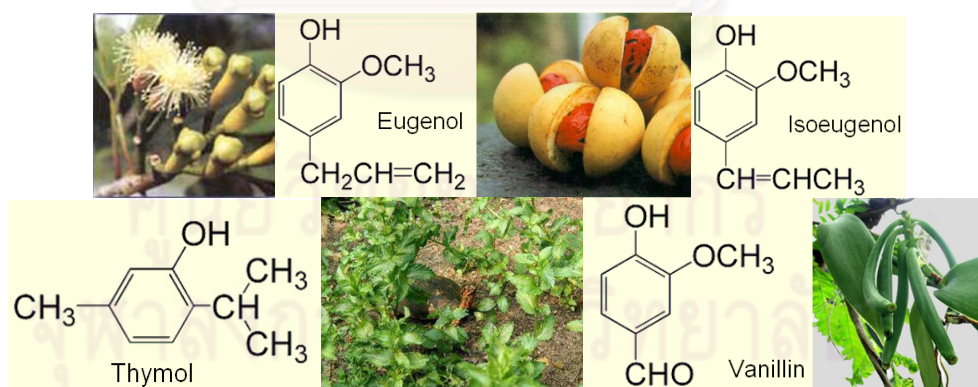
2.2 สมบัติของฟีนอล (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2542)

2.2.1 ข้อมูลทั่วไป

ฟีนอลเป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีและเป็นสารธรรมชาติ ฟีนอลเป็นผลึกไม่มีสีหรือสีขาว มีสูตรโมเลกุล คือ C_6H_5OH แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 จึงทำให้สมบัติส่วนใหญ่ของฟีนอลแตกต่างจากสารพวกแอลกอฮอล์ กรณีที่ฟีนอลไม่บริสุทธิ์จะมีสีชมพูอ่อน ๆ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ดูดความชื้น ละลายน้ำได้ดี สารละลายที่ได้มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน จึงมีชื่อเรียกที่รู้จักกันทั่วไปว่ากรดคาร์บอกลิก (carbolic acid) อนุพันธ์ของฟีนอลส่วนมากมีสี ขณะที่ตัวมันเองไม่มีสี สามารถพบฟีนอลในธรรมชาติได้ดังรูปที่ 2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟีนอลแสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของฟีนอล



รูปที่ 2.2 ฟีนอลในธรรมชาติ (Clark, 2004)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของฟีนอล (กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2542)

สมบัติ	ค่า
pH	6
น้ำหนักโมเลกุล	94.11
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	40.85
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	182
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	
ถ้วยเปิด (Open cup)	85
ถ้วยปิด (Closed cup)	79
อุณหภูมิติดไฟได้เอง (องศาเซลเซียส)	715
ช่วงความเข้มข้นติดไฟได้ (%)	3-10
ความดันไอ (มิลลิปรอท) ที่ 25 องศาเซลเซียส	0.3513
การละลายน้ำ (กรัม/ลิตร) ที่ 16 องศาเซลเซียส	93
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	3.24
ความถ่วงจำเพาะ	1.071
ดัชนีหักเหแสง (ที่ 41 องศาเซลเซียส)	1.5408

2.2.2 การใช้งาน

- ฟีนอลใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ (disinfectant) โดยใช้เป็นสารละลายเดี่ยวหรือผสมกับยาฆ่าเชื้อตัวอื่น ฟีนอลมีฤทธิ์เป็น bacteriostatic ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.2% มีฤทธิ์เป็น bactericide ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1% และมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อราได้ที่ความเข้มข้นมากกว่า 1.3% ฟีนอลยังใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อชนิดต่าง ๆ โดยวัดเป็นค่า phenol coefficient
- ใช้ในการผลิตสารเคมีอันตรายหลายชนิด เช่น ครีซอล (cresols) ไซเลนอล (xylenols) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) อะนิลีน (aniline) และฟีนอลิกเรซิน (phenolic resins)

- ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ สารตั้งต้นในการผลิตสารประกอบฟีนอลิกเรซิน ไนลอน และเส้นใยสังเคราะห์

2.2.3 การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

- อุตสาหกรรมจากกระบวนการผลิตและการใช้ฟีนอลเพื่อผลิตสารเคมีชนิดต่าง ๆ
- บ้านเรือนและห้องปฏิบัติการจากการใช้ฟีนอลเป็นสารฆ่าเชื้อ
- ไอเสียรถยนต์มีฟีนอลผสมอยู่เล็กน้อยที่ความเข้มข้น 1.2-7.7 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- การย่อยสลายของเบนซีนโดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ในอากาศ

2.2.4 ความเป็นพิษ

2.2.4.1 ความเป็นพิษต่อสัตว์

ฟีนอลจัดเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษปานกลาง มีค่า LD_{50} ต่อกิโลกรัมเมื่อได้รับสารนี้ โดยการฉีดเข้าช่องท้องเท่ากับ 127-223 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันที่เกิดกับสัตว์ทดลองเมื่อมีการฉีดฟีนอลเข้าสู่ช่องท้อง จะแสดงอาการทางประสาทและกล้ามเนื้อไวต่อการกระตุ้นมากเกินไป (neuromuscular hyper-excitability) อัตราการเต้นของหัวใจเพิ่มขึ้นในระยะแรกและกลับช้าลงและไม่เป็นจังหวะสม่ำเสมอ ความดันโลหิตสูงเล็กน้อยในตอนแรกซึ่งต่อมาจะลดลงอย่างมาก น้ำลายไหล หายใจขัด และอุณหภูมิของร่างกายลดลง นอกจากนี้ฟีนอลยังมีผลกระทบต่อการทำงานของปอดและเส้นใยประสาท ทำลายเนื้อเยื่อของตับ ไต และต่อมไทมัส (thymus gland) และยับยั้งการตอบสนองของรุกรานตาต่อแสงและรุกรานตาตำหนักผิดปกติ

2.2.4.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

เมื่อฟีนอลเข้าสู่ร่างกายในปริมาณความเข้มข้นเล็กน้อย ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบการทำงานของร่างกายได้ การเสียชีวิตของมนุษย์ที่ได้รับฟีนอลโดยการกินในปริมาณเพียง 1 กรัม อาจเสียชีวิตได้ ส่วนการได้รับการสัมผัสทางผิวหนังจากการหกของสารละลายฟีนอลที่บริเวณแก้ม หน้าศีรษะ สะโพก ต้นขา และถุงอัณฑะอาจทำให้

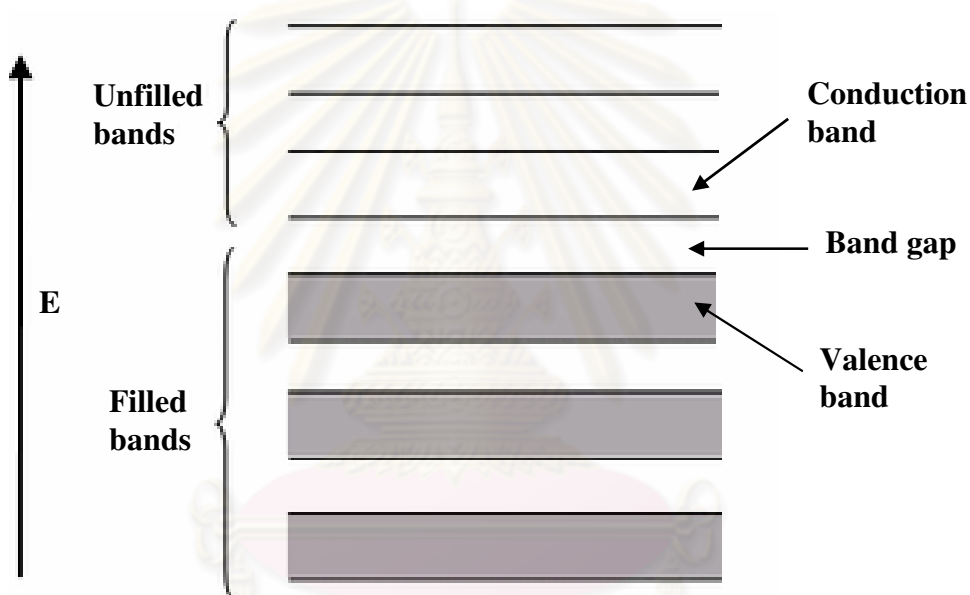
ผู้ป่วยถึงแก่ชีวิตได้เช่นกัน ในกรณีของความเป็นพิษเฉียบพลันที่เกิดจากการได้รับฟีนอล โดยการรับประทาน การสูดดมหรือ สัมผัสทางผิวหนัง เนื่องจากฟีนอลมีฤทธิ์กัดกร่อน เนื้อเยื่อทำให้เกิดแผลไหม้ในบริเวณที่ได้รับสัมผัสโดยตรง เช่น ช่องปาก หลอดอาหาร กระเพาะอาหาร ตา และผิวหนัง โดยหากเข้าตาอาจทำให้มีอาการตาสู้แสงไม่ได้ (photophobia) กระจกตาเป็นแผลหรืออาจถึงกับตาบอดได้ ฟีนอลสามารถถูกดูดซึมผ่านผิวหนังได้อย่างรวดเร็วและอาจทำให้เสียชีวิตภายในเวลา 10 นาที ในกรณีของความเป็นพิษเรื้อรังที่เกิดจากการได้รับฟีนอล เนื่องจากใช้ฟีนอลในการรักษาโรคและการผ่าตัด การได้รับฟีนอลเข้าสู่ร่างกายซ้ำหลายครั้งในปริมาณมากทำให้อาเจียน กลืนอาหารลำบาก น้ำลายไหล ท้องเสีย เบื่ออาหาร น้ำหนักตัวลด ปวดศีรษะ เป็นลม มึนงง อารมณ์แปรปรวน ตับและไตถูกทำลาย ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ อ่อนเพลีย ปัสสาวะมีสีคล้ำ ผิวหนังแตกเป็นแผล และอาจมีสีผิวผิดปกติ นอกจากนี้การใช้สเปรย์หรือยาอมที่มีส่วนผสมของฟีนอลอาจทำให้มีอาการเจ็บคอบ่อย ๆ

2.3 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Hoffmann และคณะ, 1995)

สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเป็นสารที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวกลางระหว่างฉนวนกับตัวนำไฟฟ้า สารกึ่งตัวนำไฟฟ้ามักเกิดจากผลึกของสาร สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงอยู่ในรูปโลหะออกไซด์หรือซัลไฟด์ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (cadmium sulfide, CdS) และซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) การกระจายตัวของพลังงานอิเล็กตรอนถูกอธิบายโดยใช้ระดับเฟอร์มี (Fermi level) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิเท่ากับศูนย์นั้นอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าระดับเฟอร์มีแต่ที่อุณหภูมิไม่เท่ากับศูนย์ ระดับพลังงานจะถูกสุมและอิเล็กตรอนจะมีพลังงานสูงกว่าระดับเฟอร์มี

ในระหว่างช่องว่างของแถบเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน แถบที่มีระดับพลังงานสูงสุดเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band, VB) และด้านบนของแถบอิเล็กตรอนเรียกว่า แถบการนำ (conduction band, CB) ความกว้างของแถบพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำคือ ช่องว่างของแถบอิเล็กตรอน (band gap) โครงสร้างโดยรวมของพลังงานช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนแสดงดังรูป 2.3 ช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนถูกพิจารณาจากผนังที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเพื่อให้เกิดความเป็นอิสระ ปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวา

เลนส์ไปยังแถบการนำเรียกว่า พลังงานช่องว่างของแถบอิเล็กตรอน (band gap energy, E_g) อิเล็กตรอนบางตัวถูกกระตุ้นไปยังผนังและเข้าไปในแถบการนำซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนแถบการนำ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่างของแถบอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำพร้อมกันทำให้เกิดหลุม (hole, h^+) ที่ไม่มีอิเล็กตรอนขึ้นในแถบวาเลนซ์ ตารางที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของแถบการนำ แถบวาเลนซ์ ช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนและค่าความยาวคลื่นของช่องว่างของแถบอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ (Carp และคณะ, 2004)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพลังงานช่องว่างอิเล็กตรอน (Hoffmann และคณะ, 1995)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งของแถบอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าบางชนิด (Robertson, 1996)

สารกึ่งตัวนำ ไฟฟ้า	แถบวาเลนซ์ (อิเล็กทรอนิกส์โวลต์)	แถบการนำ (อิเล็กทรอนิกส์โวลต์)	ช่องว่างของแถบ อิเล็กทรอนิกส์ (อิเล็กทรอนิกส์โวลต์)	ความยาวคลื่นของ แถบอิเล็กทรอนิกส์ (นาโนเมตร)
TiO ₂	+3.1	-0.1	3.2	387
SnO ₂	+4.1	+0.3	3.8	326
ZnO	+3.0	-0.2	3.2	387
ZnS	+1.4	-2.3	3.7	335
WO ₃	+3.0	+0.2	2.8	443
CdS	+2.1	-0.4	2.5	496
CdSe	+1.6	-0.1	1.7	729
GaAs	+1.0	-0.4	1.4	886
GaP	+1.3	-1.0	2.3	539

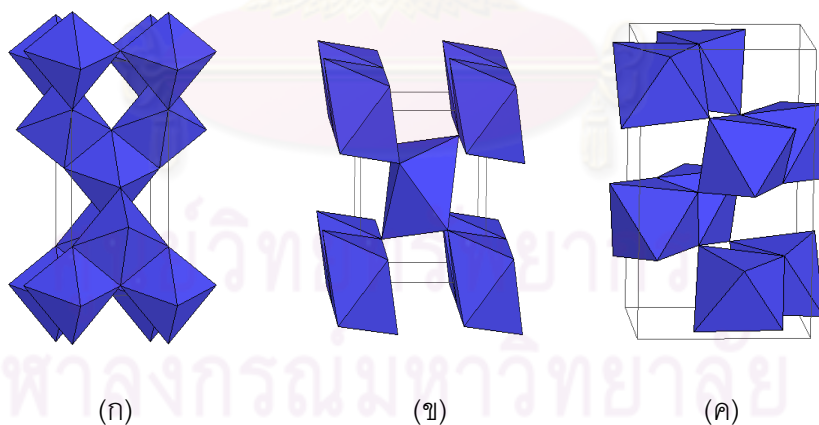
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂)

2.4.1 คำจำกัดความ (Carp และคณะ, 2004)

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในรูปออกไซด์ของโลหะทรานซิชันที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (photocatalyst) โดยสามารถใช้แสงเพื่อกระตุ้นให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นประจุได้และสามารถนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ทั้งในน้ำและอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพดีเนื่องจากมีสมบัติโปร่งแสงทำให้แสงผ่านได้ดี มีพื้นที่ผิวสูงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ รวดเร็ว มีความคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงและไม่ถูกทำลายเมื่อเกิดปฏิกิริยา อีกทั้งไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม และมีความสามารถในการละลายต่ำทำให้น้ำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4.2 โครงสร้างผลึกและสมบัติ

โดยทั่วไปไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ได้แก่ อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal) บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล และ TiO_2 (B) มีโครงสร้างแบบมอนอไซคลิก โครงสร้างแบบอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์สามารถอธิบายในรูปแบบของออกตะฮีดรอล (octahedral form, TiO_2) (Carp และคณะ, 2004) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล (รูปที่ 2.2ก) ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนของขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล (รูปที่ 2.2ข) และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนของขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล (รูปที่ 2.2ค) (Fujishima และคณะ, 1999) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอนาเทสมีความว่องไวและความเสถียรมากกว่าโครงสร้างรูไทล์และบรูคไคท์อาจเนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างแถบพลังงานมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงมากกว่า (Cheng และคณะ, 1995)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของ (ก) อนาเทส (ข) รูไทล์ และ (ค) บรูคไคท์ (Carp และคณะ, 2000)

พื้นฐานการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์จากข้อมูลทางความร้อน (ตารางที่ 2.3) พบว่ารูไทล์เป็นวัสดุที่มีความเสถียรมากสำหรับทุกอุณหภูมิและความดันที่มากกว่า 60 กิโลบาร์ พลังงานเสรีของกิบส์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์ในทางตรงกันข้ามกับความเสถียรของวัสดุ โดยถ้าขนาดอนุภาคเล็กลงจะมีค่าพลังงานบนพื้นผิวลดลง นอกจากนี้พลังงานเสรีกิบส์และความดันบนพื้นผิวขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาค ถ้าขนาดอนุภาคทั้ง 3 วัสดุเท่ากัน พบว่าอานาเทสมีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มากที่สุดเมื่อมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 11 นาโนเมตร ขณะที่รูคโคไคท์มีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อมีขนาดอนุภาคระหว่าง 11 ถึง 35 นาโนเมตร และรูไทล์มีความเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 35 นาโนเมตร (Carp และคณะ, 2004)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าการหักเหสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (silicon solar cell) และในอุปกรณ์ทางด้านการมองเห็นชนิดฟิล์มบาง (thin film optical device) หลายชนิด

ตารางที่ 2.3 สมบัติของรูไทล์และอานาเทส (Fujishima และคณะ, 1999)

สมบัติ	รูไทล์	อานาเทส
รูปแบบผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
พลังงานของแถบอิเล็กทรอนิกส์ (อิเล็กทรอนิกส์โวลต์)	3.030	3.200
ความแข็ง (โมฮ์, Mohs)	6.0-7.0	5.5-6.0
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	4.250	3.894
พลังงานอิสระกิบส์ (กิโลแคลอรีต่อโมล)	-212.6	-211.4
ค่าคงที่แลตทิซ, a (อังสตรอม)	4.593	3.784
ค่าคงที่แลตทิซ, c (อังสตรอม)	2.959	9.515
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1858	เปลี่ยนไปเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 800 องศาเซลเซียส

ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจจสอบแก๊ส (gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของแก๊สที่ภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจจสอบแก๊สออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระจกเทียม เป็นต้น และพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงทั้งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมและแบบไม่ใช้แสงร่วมได้ดีอีกด้วย โดยสามารถใช้เป็นทั้งตัวเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยา (promoter) และตัวรองรับ (support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซิน สารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift กระบวนการสังเคราะห์สาร Fischer-Tropsch การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (H_2S , SO_2) เป็นต้น (Fujishima และคณะ, 1999)

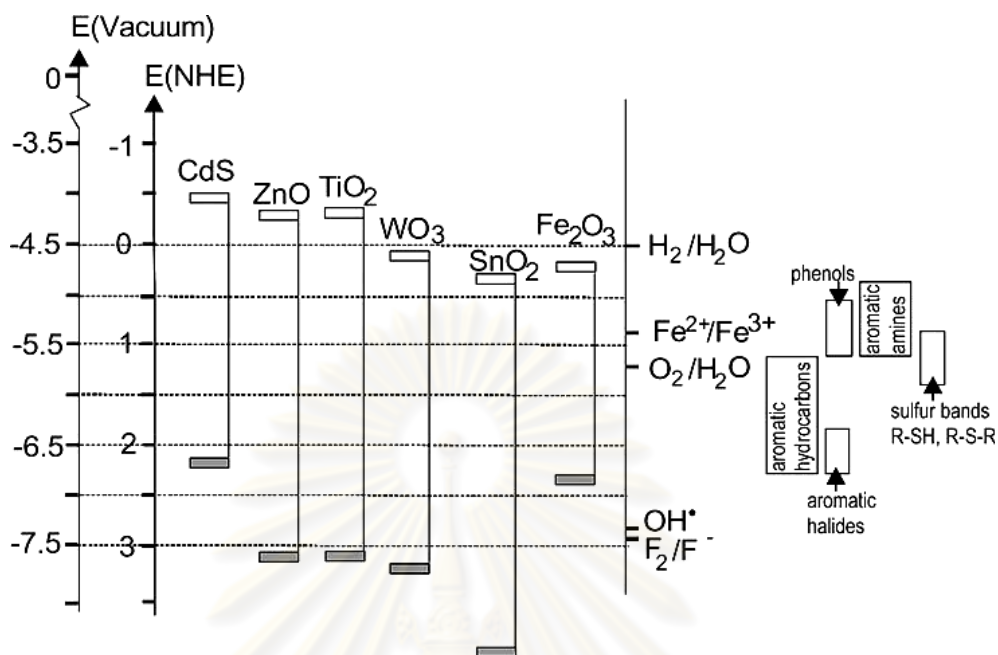
ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่โครงสร้างอนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกของอนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) หรือเซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (membrane) นอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว ได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก การประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โครงสร้างผลึกทั้งอนาเทสและรูไทล์จึงเป็นที่นิยมนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวางสำหรับปฏิกิริยาเชิงแสงโดยปกตินั้น โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูง คือ มีความว่องไวและเสถียรมากกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างอนาเทสมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยาพบว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) ถูกรายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้มีตัวแปรหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมาก คือ วิธีการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (Fujishima และ

คณะ, 1999) ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชื่อทางการค้า Degussa P-25 ประกอบด้วยโครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ในอัตราส่วน 80/20 ทำให้มีความว่องไวมากกว่าโครงสร้างแบบเดี่ยว การเพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอิเล็กตรอนกับหลุมของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4.3 ลักษณะของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ซึ่งนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงกันมาก สารกึ่งตัวนำแตกต่างจากโลหะ คือ มีความไม่ต่อเนื่องของระดับพลังงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างของระดับพลังงาน ส่งผลให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนและหลุมหลังจากที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและหลุมมีระยะเวลาเพียงพอในการเคลื่อนที่ผ่านไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและก่อให้เกิดปฏิกิริยาในที่สุด ความสามารถของสารกึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของค่าแถบพลังงาน (energy band gap) ของสารกึ่งตัวนำและตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (redox) ของสารที่ถูกดูดซับ (Fujishima และคณะ, 1999) ช่องว่างของระดับพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ประมาณ 380 นาโนเมตร) (Reutergardh และ langphasuk, 1997)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าสามารถดูดซับสารที่ทำปฏิกิริยา 2 ตัวพร้อมกันซึ่งสามารถจ่ายอิเล็กตรอนและรับอิเล็กตรอนจากการกระตุ้นโฟตอนผ่านการดูดซับ ($h\nu \geq E_g$) แถบช่องว่างของสารกึ่งตัวนำและพลังงานศักย์ย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.5 สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าสามารถเหนี่ยวนำแสงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนตัวไปดูดซับบนผิวของอนุภาคซึ่งถูกควบคุมจากตำแหน่งพลังงานช่องว่างของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าและพลังงานศักย์ย้อนกลับของตัวดูดซับระดับพลังงานด้านล่างของแถบการนำเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กตรอนเชิงแสง (photoelectrons) ระดับพลังงานด้านบนของแถบวาเลนซ์หาได้จากความสามารถในการออกซิไดซ์ของหลุมในแต่ละด้านสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการสนับสนุนปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน (Rajeshwar, 1995)



รูปที่ 2.5 แถบของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าด้วยพลังงานศักย์ย้อนกลับ (redox potentials) (Carp และคณะ, 2004)

2.5 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic process)

2.5.1 ข้อมูลทั่วไป

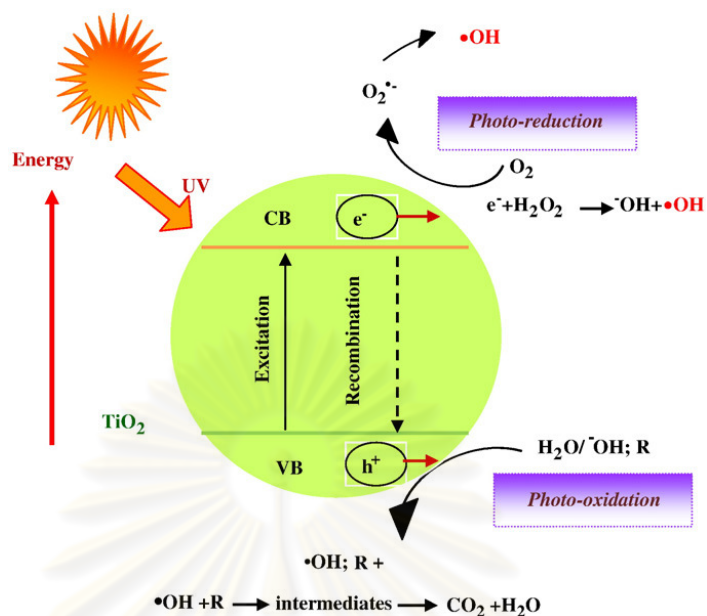
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีออกซิเดชันสมัยใหม่ (Advanced Oxidation Technologies, AOTs) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสารชีวภาพให้เป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูงและไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้กลายเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษเพียงเล็กน้อยหรือไม่มี ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ (Litter, 1999)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาในการดูดซับสารก่อมลพิษบนพื้นผิวและการดูดซับแสงโดยใช้ช่วงแสงที่เหมาะสม (Hermann, 1999) สารกึ่งตัวนำไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบอาศัยแสงนั้นควรจะอยู่ในรูปออกไซด์หรือซัลไฟด์

ของโลหะ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าแคดเมียมซัลไฟด์หรือซิงค์ออกไซด์ไม่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากความเป็นพิษของสารเหล่านี้ โดยพบว่าเมื่อฉายแสงให้แก่สารละลายที่มีซิงค์ออกไซด์ปนอยู่ ซิงค์ออกไซด์จะถูกกัดกร่อนด้วยแสงทำให้เกิดซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ที่มีสมบัติเป็นพิษขึ้น และพบว่าแคดเมียมซัลไฟด์นั้นมีปัญหาทางด้านความเป็นพิษ เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์สามารถถูกกัดกร่อนได้ด้วยแสงและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่มีความว่องไวน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ (Hermann, 1999) ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเสถียรภาพสูงและไม่ละลายในสารละลายเหมือนกับซิงค์ออกไซด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ส่วนข้อดีอื่น ๆ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูง ไม่เป็นพิษ และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาไม่แพง ยิ่งไปกว่านั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนและไม่สูญเสียความว่องไวไปเมื่อถูกนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (Barbeni และคณะ, 1985)

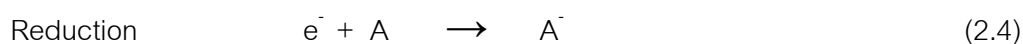
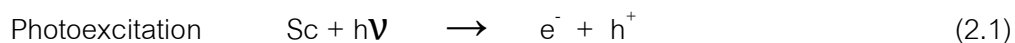
2.5.2 หลักการของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

คำว่า “photocatalytic” มาจาก photo และ catalyst ดังนั้นกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงจึงหมายถึงกระบวนการที่แสงและตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (chemical transformations) กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นกระบวนการที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษสูงและไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพให้กลายเป็นสารประกอบที่มีพิษเพียงเล็กน้อยหรือไม่มี ความแตกต่างระหว่างการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช้แสงร่วม) และการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง คือ วิธีการที่ใช้ในการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการกระตุ้นด้วยความร้อนจะถูกแทนที่โดยการกระตุ้นด้วยความเข้มแสง (Herrmann, 1999) โดยที่การให้พลังงานแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างของแถบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นค่าของความแตกต่างระหว่างพลังงานของแถบการนำกับแถบวาเลนซ์สำหรับแสงที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมักเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากพลังงานแสงที่ให้แก่ระบบมีค่ามากกว่าค่าพลังงานของแถบช่องว่างทำให้เกิดเป็นการกระตุ้นการเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ในแถบการนำและหลุม (h^+) ในแถบเวเลนซ์ (รูปที่ 2.6) โดยหลุมมีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) และอิเล็กตรอนมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (reducing agent) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (Yu และคณะ, 2000)



รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Ahmed, 2010)

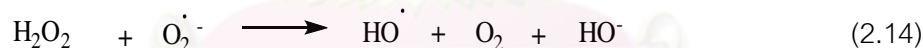
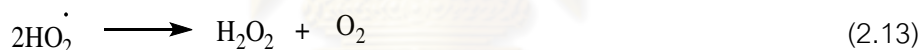
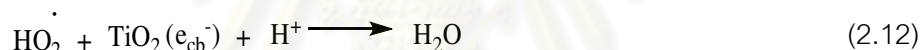
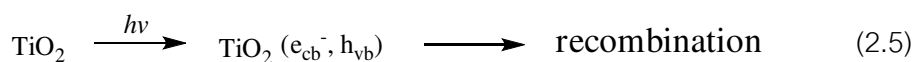
หลังจากที่สารละลายที่มีสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้รับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมเกิดเป็นอิเล็กตรอนกับหลุมแสดงดังสมการ 2.1 อิเล็กตรอนและหลุมที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงสามารถรวมตัวกันอีกได้อย่างรวดเร็วในเวลาเพียงหนึ่งส่วนล้านของหนึ่งวินาที ทำให้เกิดความร้อนขึ้นแสดงดังสมการ 2.2 หรือคู่อิเล็กตรอนและหลุมอาจจับอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งคู่อิเล็กตรอนและหลุมสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ที่ดูดซับหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น ถ้าสารที่มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor; D) ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา สารนี้จะทำปฏิกิริยากับหลุมและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นแสดงดังสมการ 2.3 ในทางตรงข้ามถ้าสารที่มีสมบัติเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor; A) ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา สารนี้จะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนและเกิดปฏิกิริยารีดักชันขึ้นแสดงดังสมการ 2.4 (Robertson, 1996)



สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีกลไกทางเคมีที่เป็นไปได้ 2 กลไก คือ 1) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับหลุม และ 2) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยประจุไฮดรอกซิล (OH⁻) (Ilsz และ Dombi, 1999) โดยประจุไฮดรอกซิลหรือโมเลกุลของน้ำที่อยู่ผิวเปรียบเสมือนกับดักของหลุมก่อให้เกิดอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ซึ่งโดยปกติการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยประจุไฮดรอกซิลมีแนวโน้มเป็นกลไกหลักในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ส่วนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับหลุมนั้น หลุมจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็วและไม่มีควมจำเพาะเจาะจง การยับยั้งการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและหลุมมีความจำเป็นต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทประจุของสารกึ่งตัวนำกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและหลุมจะเป็นการขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chiou และคณะ, 2007) การเติมออกซิเจนให้แก่ระบบจึงเปรียบเสมือนเป็นกับดักสำหรับอิเล็กตรอนนำไปสู่การเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ (O₂⁻) ซึ่งไม่เสถียร สารจำพวกอนุมูลอิสระที่มีความว่องไว (OH⁻, O₂⁻) จะจับกับโมเลกุลของฟีนอลในน้ำแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิลเดชันและออกซิเดชัน จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ โดยสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบซัลเฟอร์และหมู่ฮาโลเจนจะถูกออกซิไดซ์ได้ ผลิตภัณฑ์ คือ ฟอสเฟต (PO₄³⁻) ซัลเฟต (SO₄²⁻) และเฮไลด์ (X⁻) ตามลำดับ (Litter, 1999)

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังสมการ 2.5-2.16 (Litter, 1999) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนในแถบนำกับหลุมในแถบวาเลนซ์สามารถรวมตัวกันอีกได้อย่างรวดเร็วแสดงดังสมการ 2.5 หลุมในแถบวาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 2.6 หลุมในแถบวาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับประจุไฮดรอกซิลเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 2.7 หลุมทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนถูกดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังสมการ 2.8 อนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์แสดงดังสมการ 2.9 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีสมบัติรับอิเล็กตรอนถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังสมการ 2.10 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นเปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลสามารถเป็นไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่เสถียรแสดงดังสมการ 2.11 เปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบการนำเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำแสดงดังสมการ 2.12 เปอร์อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนแสดงดังสมการ 2.13 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับซูเปอร์ออกไซด์เกิดเป็น

อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 2.14 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 2.15 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบการนำเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 2.16



อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงส่วนใหญ่เป็นไปตามแบบจำลองของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood model) (Chiou และคณะ, 2007) ในการอธิบายถึงลักษณะของปฏิกิริยาเกี่ยวกับอัตราเร็วในการสลายสารอินทรีย์ในรูปของการหายไปของสารอินทรีย์หรือการเกิดขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พลังค์ของแสงมีความสำคัญมากในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากการให้แสงแก่ระบบมากเกินไปจะทำให้เกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและหลุมขึ้นอย่างรวดเร็ว คุณสมบัติที่สูงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสงที่สูงขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติที่สูงทำให้ความถี่ในการชนกันระหว่างสารอินทรีย์และสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า และ

พบว่าไอออนของโลหะหรือสารอินทรีย์ที่อยู่สารละลายนั้นมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง (Litter, 1999)

การกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำและอากาศด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้เงินลงทุนต่ำ และใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานได้ แต่ปัจจุบันยังมีการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา และลดระยะเวลาในการกำจัดสารอินทรีย์ อย่างไรก็ตามการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงนั้นจะต้องระมัดระวังในการควบคุมการเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่อาจเป็นอันตรายมากกว่าอันตรายจากสารอินทรีย์ตั้งต้น ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (Litter, 1999)

ปฏิกิริยาเชิงแสงสามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์หรือจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำและอากาศได้หลายชนิด เช่น สารประกอบคลอรีนของแอลเคนและแอลคีน ฟีนอล อะโรแมติก แอลดีไฮด์ กรดอินทรีย์ และเอมีน เป็นต้น (Robertson, 1996) ซึ่งสารประกอบที่สามารถขจัดด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 2.4

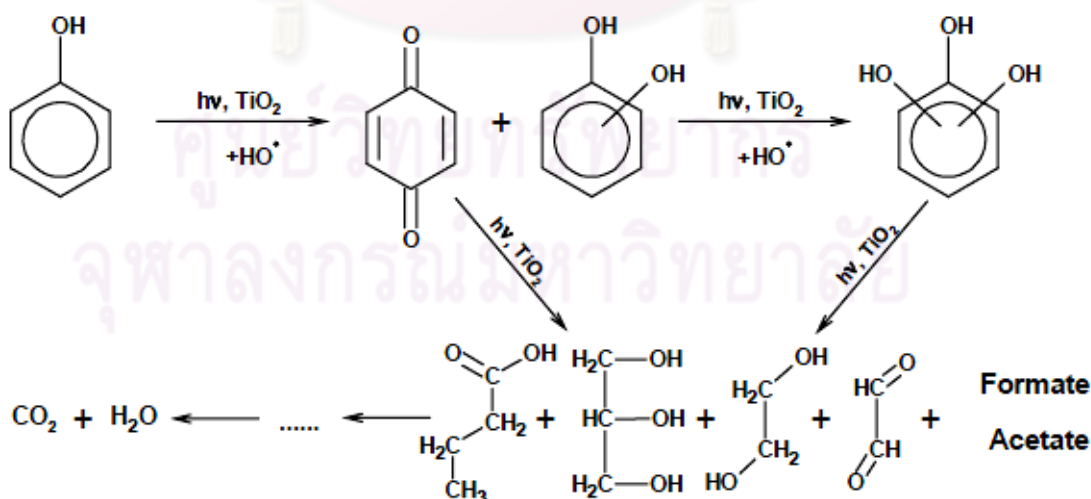
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สามารถกำจัดด้วยปฏิกิริยาเชิงแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Robertson, 1996)

ชนิดของสารประกอบ	ตัวอย่าง
Alkanes	methane; pentane; heptane; n-dodecane; cyclohexane; paraffin
Haloalkanes	mono-, di-, tri-, and tetrachloromethane; dichloroethane; pentachloroethane; di and tribromoethane; 1:2-dichloropropane
Aliphatic alcohols	methanol; ethanol; n- and iso-propanol; butanol; penta-1:4-diol
Aliphatic carboxylic acids	methanoic; ethanoic; trichloroacetic; butyric; oxalic
Alkenes	propene; cyclohexene
Haloalkenes	di-, tri- and tetra-chloroethene; hexafluoropropene
Aromatics	benzene; naphthalene
Haloaromatics	chloro and bromobenzene; chlorobenzenes; halophenols
Phenols	phenol; hydroquinone; catecol; resorcinol; cresol; nitrophenol
Aromatic carboxylic acids	benzoic; phthalic; salicylic
Polymers	polyethylene; PVC
Surfactants	polyethylene glycol; p-nonyl phenyl ether; sodium dodecyl; benzene sulphonate; paraxon; malathion
Herbicides	methyl viologen; atrazine; simazine; bentazon
Pesticides	DDT; parathion; lindane; monocrotophos
Dyes	methylene blue; rhodamine B; methyl orange; fluorescein
Explosives	trinitrotoluene
Bacteria	<i>E. Coli</i>

2.5.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอล

ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ในการขจัดฟีนอลโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตแสดงดังรูปที่ 2.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนกับหลุม เมื่อออกซิเจนจับตัวกับอิเล็กตรอนเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของน้ำจับตัวกับหลุมเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล อนุมูลไฮดรอกซิลจับตัวเป็นฟีนอลเกิดเป็นไฮโดรควิโนน (hydroquinone) เรซอร์ซินอล (resorcinol) แคทโฮล (catechol) นอกจากนี้รูปแบบของเบนโซควิโนน (benzoquinone) ได้จาก 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ 1) การตั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลของไฮโดรควิโนน 2) การทำปฏิกิริยาในหลุมของไทเทเนียมไดออกไซด์ 3) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของไฮโดรควิโนนจากออกซิเจนในน้ำ หลังจากนั้นแคทโฮลทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตเกิดเป็นไกลคอล (glycol) เรซอร์ซินอลทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตเกิดเป็นกรดบิวทาโนอิก (butanoic acid anhydride) ไฮโดรควิโนนทำปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตเกิดเป็นกลีเซอริน (glycerin) และอีเทนไดออล (ethanedial) เบนโซควิโนนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วประมาณ 40% เกิดเป็นสารประกอบอะลิฟาติกที่ประกอบด้วยออกซิเจนและภายใต้สภาวะเดียวกันจะเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรควิโนนประมาณ 60% นอกจากนี้สารตัวกลางที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะได้กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก สุดท้ายของปฏิกิริยาจะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Sobczyn'ski และคณะ, 2004)

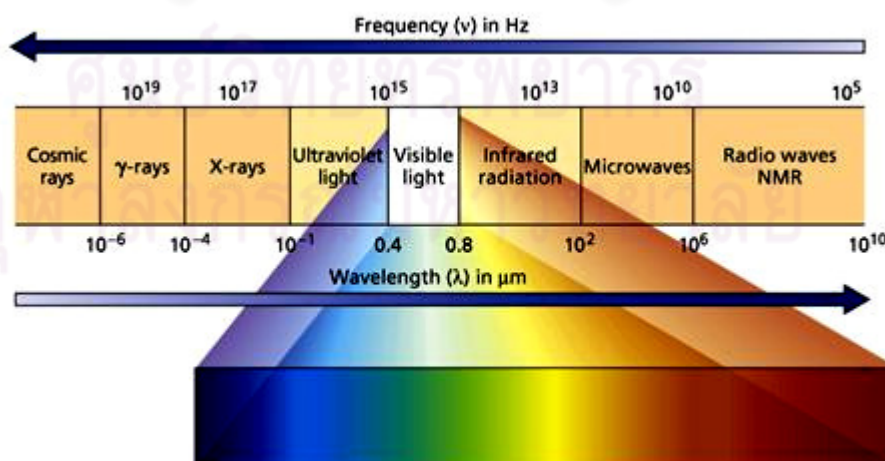


รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอล (Sobczyn'ski และคณะ, 2004)

2.6 แสง

แสงเป็นรูปแบบของคลื่นพลังงานซึ่งแสงแต่ละชนิดสามารถจำแนกออกได้ด้วยความยาวคลื่นที่ต่างกันดังรูปที่ 2.8 แสงขาวเป็นเพียงส่วนหนึ่งของแถบความยาวคลื่นแสงทั้งหมดซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร แต่โดยปกติแล้วแสงขาวไม่ถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงเนื่องจากทั่วไปแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการนี้คือไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีพลังงานของช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะตกอยู่ในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจึงถูกนำมาใช้สำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Fujishima และคณะ, 1999) ชนิดของแสงอัลตราไวโอเล็ตแบ่งออกตามความยาวคลื่นดังนี้

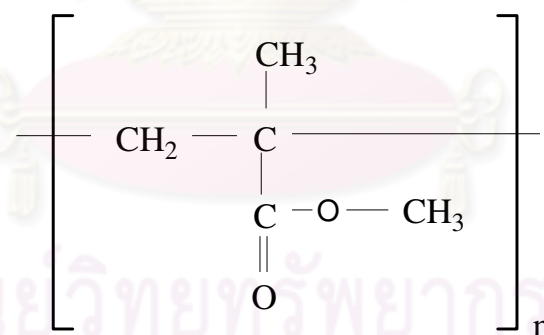
- UV-A มีความยาวคลื่น 315-380 นาโนเมตร เป็นรังสี UV ที่สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้หลายด้าน โดยเฉพาะทางด้านเคมีและฟิสิกส์
- UV-B มีความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร เป็นรังสี UV ที่มีประโยชน์ในการรักษาโรคผิวหนังบางชนิดได้ แต่หากสัมผัสผิวนานเกินไปอาจก่อให้เกิดการไหม้ของผิวหนัง (sunburn or erythema) และการอักเสบของตาได้
- UV-C มีความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร เป็นรังสี UV ที่มีประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคได้ แต่อาจทำอันตรายผิวหนังและตาได้อย่างรุนแรงหากได้รับรังสีเป็นปริมาณที่มากเกินไป



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของแสง (Fujishima และคณะ, 1999)

2.7 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate)

พอลิเมทิลเมทาคริเลตหรืออะคริลิกเป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นแบบอะแทกติก (atactic) ดังรูปที่ 2.9 โดยโมเลกุลมีกิ่งหรือแขนงที่ไม่แน่นอน พอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมโดยกระบวนการแบบบัลค์ แบบสารละลาย แบบแขวนลอย หรือแบบอิมัลชันก็ได้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ พอลิเมอไรเซชันเกิดแบบลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ ถ้าใช้เทคนิคแบบแขวนลอย ตัวแขวนลอยนิยมใช้คือ โซเดียมพอลิอะคริเลต โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 95-110 องศาเซลเซียส จะได้พอลิเมอร์ออกมาในขั้นสุดท้ายเป็นเม็ดเล็ก ๆ พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีความเหนียวกว่าพอลิสไตรีน มีความโปร่งใสมาก (ยอมให้แสงผ่านได้ถึง 92%) มีน้ำหนักเบา และมีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ดีและทนต่อสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ดี รวมทั้งกรดและด่างเจือจาง จึงนิยมนำมาทำเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น แผ่นป้ายโฆษณา เลนส์ ใยมไฟ ภาชนะและถ้วยบรรจุของเหลวชนิดใส อุตสาหกรรมที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตมากที่สุดคือ รถยนต์ เครื่องบิน และเรือ โดยใช้ทำไฟข้างหน้า ไฟข้างท้าย ไฟเลี้ยว พวงมาลัย ตลอดจนจนสารเคลือบผิว เป็นต้น (ปรีชา พหลเทพ, 2549)



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethacrylate)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Addamo และคณะ (2008) ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์จากไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (titanium tetraisopropoxide) บนตัวรองรับแก้วที่ผ่านการเตรียมผิวด้วยซิลิกอนออกไซด์ด้วยเทคนิคการจุ่มเคลือบแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 673 เคลวิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีความมีขั้วสูงและโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่อยู่ในรูปอนาเทส เมื่อนำไปทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีประสิทธิภาพในการสลายไอโซโพรพานอลภายในเวลา 7 ชั่วโมง กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ และเกิดโพรพาโนน (propanone) เป็นสารตัวกลางที่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนี้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมผิวก่อนทำการเคลือบและสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้

Barakat และคณะ (2005) ศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการสลายพีนอลและคลอโรพีนอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแสงอัลตราไวโอเล็ตช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยระบบที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และแสงอัลตราไวโอเล็ตมีประสิทธิภาพในการสลายพีนอลมากกว่าระบบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ตหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับแสงอัลตราไวโอเล็ต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการสลายพีนอลและคลอโรพีนอลเพิ่มขึ้น สารอินทรีย์ถูกดูดซับภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพในการสลายพีนอลสูงที่สุดถึง 97%

Hu และ Yuan (2006) ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยซิลิกอนออกไซด์ ยางซิลิโคนเคลือบด้วยซิลิกอนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ (dip-coating process) จากโซลไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส พบว่าโซลไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 5 นาโนเมตร ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับพอลิเมอร์มีความเป็นรูพรุนและขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 35~47 นาโนเมตร อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการรวมตัวกันระหว่างกระบวนการเคลือบบนตัวรองรับพอลิเมอร์โดยปรับปรุงการเคลือบผิวด้วยซิลิกอนออกไซด์ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อช่วยเพิ่ม

ความเข้มข้นของฟิล์มบางบนตัวรองรับ ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ ยางซิลิโคนเคลือบบนซิลิกอนไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการสลาย Brilliant red dye X-3B โดยความเข้มข้นของ Brilliant red dye X-3B ลดลงเหลือ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 105 นาที 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 60 นาที 1.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 120 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อดี เช่น เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง

Jain และ Shrivastava (2008) ศึกษากระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสีย้อมไซยาโนซีน (cyanosine dye) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แขวนลอยอยู่ภายใต้ภาวะต่าง ๆ โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้น ค่าความเป็นกรด-เบส และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และตัวรับอิเล็กตรอน พบว่าอัตราการสลายสีย้อมไซยาโนซีนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมเท่ากับ 0.04 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่าความเป็นกรด-เบสมีผลต่อการสลายสีย้อมเช่นกัน โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 8 นอกจากนี้ระบบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแสงอัลตราไวโอเล็ตมีประสิทธิภาพในการสลายสีย้อมสูงสุดถึง 82.45%

Kazuya และคณะ (2003) ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethylsiloxane) บนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อุณหภูมิห้องโดยวิธีโซล-เจลด้วยเทคนิคการปั่น (spin-coating) ซึ่งฟิล์มบางมีความโปร่งแสงสูงขึ้นไปถึง 90% และโครงสร้างผลึกอยู่ในรูปอนุภาค เมื่ออบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไดเมทิลซิลอกเซนให้ประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลู (methylene blue) และอะเซทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) มากกว่า 90% นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไดเมทิลซิลอกเซนทำให้ประสิทธิภาพในการสลายเมทิลีนบลูลดลงและเกิดการเสื่อมสภาพของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตประมาณ 23.7% โดยน้ำหนัก

Qamar และคณะ (2005) ศึกษาการกำจัดอนุพันธ์ของสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ โครโมโทรป 2 บี (chromotrope 2B) และอะมิโดแบล็ค 10 บี (amido black 10B) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการละลายที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์แขวนลอยอยู่ภายใต้ภาวะต่าง ๆ โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเป็นกรด-เบส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น ชนิดของตัวรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน ได้แก่

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โพแทสเซียมโบรเมต ($KBrO_3$) และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ($[NH_4]_2S_2O_8$) รวมถึงโมเลกุลของออกซิเจน พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิดพี-25 มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุพันธ์ของสีย้อมทั้ง 2 ชนิดมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด UV-100 และ PC500 เมื่อความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการสลายอนุพันธ์สีย้อมทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น และสูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 9 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลให้อัตราการสลายอนุพันธ์สีย้อมทั้ง 2 ชนิดลดลง และเมื่อใช้ชนิดของตัวรับอิเล็กตรอนเติมลงไปในสารละลาย พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมโบรเมต และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ช่วยเพิ่มอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม

Swarnalatha และ Anjaneyalu (2004) ศึกษาการออกซิไดซ์ 2,6 ไดไนโตรฟีนอล (2,6-dinitrophenol) โดยกระบวนการออกซิเดชันเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิดพี-25 (TiO_2 -P25) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์ออกไซด์ จากการทดลองบ่งชี้ว่าสารละลายที่แขวนลอยด้วย TiO_2 -P25 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการสลายเชิงเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปด้วยความยาวคลื่นแสง 254 นาโนเมตร นอกจากนี้ได้ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 2,6 ไดไนโตรฟีนอล ระยะเวลาของการฉายแสง ค่าความเป็นกรด-เบส รวมถึงผลของการให้ออกซิเจนและไนโตรเจนต่อประสิทธิภาพการสลาย 2,6 ไดไนโตรฟีนอล ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1 กรัมส่งผลให้ระดับการขจัด 2,6 ไดไนโตรฟีนอลสูงถึง 90% จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นไปเรื่อย ๆ ความสามารถในการขจัดจะลดลง ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 2,6 ไดไนโตรฟีนอลและค่าความเป็นกรด-เบสสูง ๆ จะส่งผลให้อัตราการกำจัดลดลงเช่นกัน โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 8 และเมื่อให้ระยะเวลาของการฉายแสงนานขึ้น พบว่าความเข้มข้นของ 2,6 ไดไนโตรฟีนอลลดลง โดยที่ระยะเวลาของการฉายแสงมากกว่า 3 ชั่วโมง 2,6 ไดไนโตรฟีนอลจะถูกสลายไปอย่างสมบูรณ์ และภายใต้ภาวะที่เหมาะสมการให้แก๊สออกซิเจนแก่สารละลายจะให้อัตราการขจัดเร็วกว่าแก๊สไนโตรเจน

Yang และคณะ (2006) ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมอริอะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) และสไตรีน (polystyrene) โดยเทคนิคการจุ่มเคลือบ มีการเติมแอซีทิลอะซิโตน (acetylacetone) ลงในโซลไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อช่วยลดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โปร่งใส กระจายตัวดีขึ้นและมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มและอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซิโตนต่อไทเทเนียมทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีรอย

แตกและรุกรานเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์มเนื่องจากการระเหยและการสลายตัวของสารละลายและแอซีทิลอะซีโตน ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีความต้านทานต่อตัวทำละลายและความมีขี้ผึ้งระหว่างผิวของฟิล์มบางกับตัวรองรับ เมื่อนำไปทดสอบความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการสลายเมทิลลีนบลูภายในเวลา 180 นาที

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมาใช้เป็นวิธีการบำบัดหรือขจัดสารประกอบฟีนอลออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียออกสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการสะสมหรือเกิดการอุดตันภายในเครื่องมือและประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปในการแยกอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ออกภายหลังการใช้งาน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องฝังไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงในการลดปริมาณฟีนอลในน้ำเสียจำลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ และศึกษาลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ รวมทั้งตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสลายพินอลด้วยปฏิกิริยาเชิงแสง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ HACH รุ่น sension 378
2. เครื่องชั่งละเอียด
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก
4. ตู้อบ (Oven)
5. เตาเผา (Furnace)
6. โถดูดความชื้น (desicator)
7. นาฬิกาจับเวลา
8. หลอดไฟ UV กำลังไฟฟ้า 9 วัตต์ Philip รุ่น PL-S
9. เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD) JEOL รุ่น JSM-5800 LV
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) Jeol รุ่น JSM 6400
11. เครื่อง UV-VIS spectrophotometer Jasco รุ่น V-530
12. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.2 สารเคมีที่ใช้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์เกรดทางการค้า Degussa P-25 (ประเทศสิงคโปร์)
2. แอซีทิลอะซีโตน (LR Grade, S D Fine-Chem Limited) (ประเทศอินเดีย)
3. ไอโซโพรพานอล (AR Grade, Lab supplies) (ประเทศนิวซีแลนด์)
4. กรดไนตริก (AR Grade, QRec, Qatar) (ประเทศนิวซีแลนด์) และมีความบริสุทธิ์ 65%

5. ฟีนอล (Analytical reagent Grade, Fisher Scientific) (ประเทศนิวซีแลนด์) และมีความบริสุทธิ์ 99.5%

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมน้ำเสียตัวอย่าง

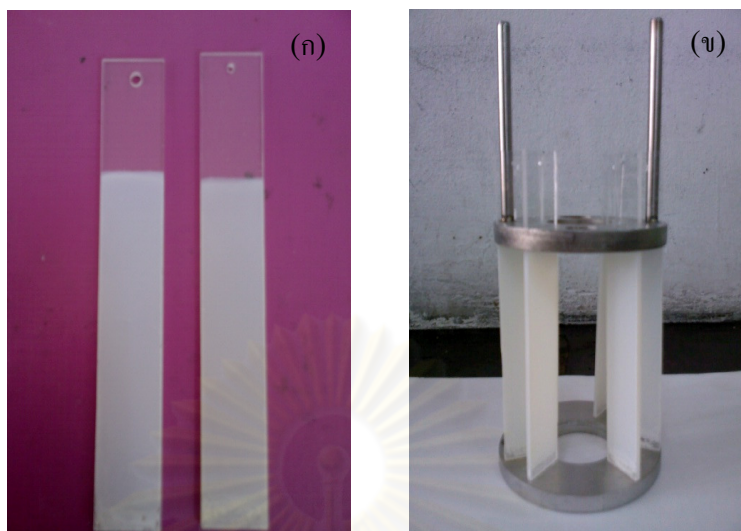
น้ำเสียตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม แล้วนำไปทำการทดลอง

3.3.2 การเตรียมผิวแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ก่อนทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ นำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาล้างผิวด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง โดยเตรียมสารละลายกรดไนตริกผสมน้ำในอัตราส่วนกรดไนตริก 6 ส่วนต่อน้ำ 1 ส่วน จุ่มแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตลงในสารละลายกรดไนตริกเจือจางเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นล้างออกด้วยเอทานอลและน้ำกลั่น ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาเคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยวิธีการจุ่มเคลือบ (dip-coating) แสดงดังรูป 3.1ก แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (20×130×2 มิลลิเมตร) ที่ผ่านการเตรียมผิวแล้วถูกนำมาเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมได้โดยการเติมสารละลายไอโซโพรพานอลผสมน้ำในอัตราส่วนไอโซโพรพานอล 7 ส่วนต่อน้ำ 3 ส่วน ลงในไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งที่ผ่านการเผา (calcination) และไม่ผ่านการเผา ทำการกวนเป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเติมแอสซีทิลอะซีโตนลงไปในสารละลายด้วยอัตราส่วนโดยโมลของแอสซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ในช่วง 1.0-4.0 ทำการกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจุ่มลงในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตจากนั้น



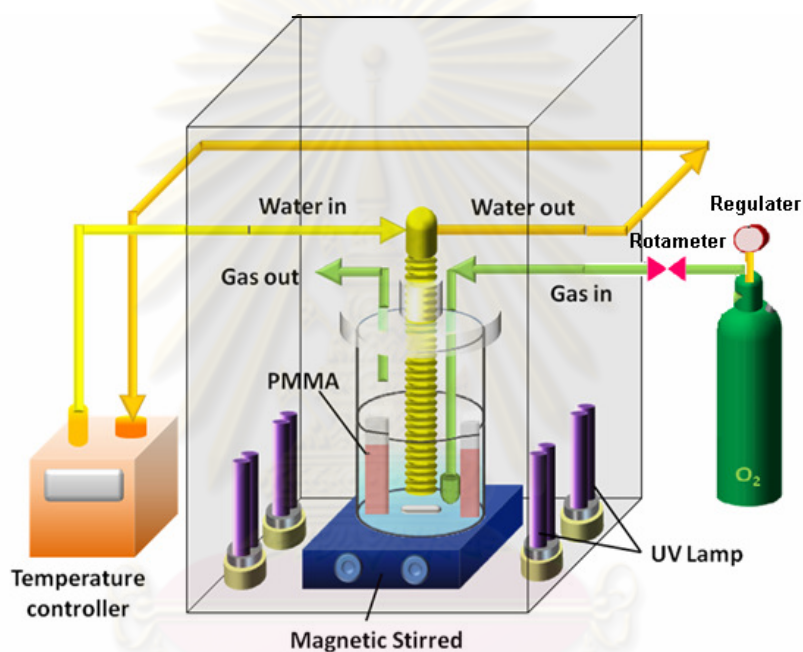
รูปที่ 3.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ก) แผ่นพอลิเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ข) การวางแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์

ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตภายหลังเคลือบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถวัดสัญญาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการเผาต่าง ๆ ได้จากเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาเคลือบแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตตามวิธีที่กล่าวไว้เบื้องต้น จากนั้นวางแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผ่านการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่วางแผ่นให้มีลักษณะคล้ายกับครีบบaffle) ในเครื่องปฏิกรณ์ (รูปที่ 3.1ข)

3.3.4 การทดลองออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอลเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทดลองออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอลเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยถังออกซิเจนกล่องฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตซึ่งควบคุมการไหลของแก๊สออกซิเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่ออนาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ถูกควบคุมโดยใช้การไหลของน้ำเข้า-ออก ภายในกล่องมีเครื่องปฏิกรณ์ทำจากแก้วปริมาตร 1 ลิตรล้อมรอบด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต

ขนาด 9 วัตต์ จำนวน 15 หลอด ในการทดลองนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์วางรอบตะแกรงวงกลมคล้ายกับครีปในเครื่องปฏิกรณ์แล้วนำไปแช่ในสารละลายฟินอลในน้ำปราศจากไอออนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 ส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม) เก็บสารละลายครั้งละ 10 มิลลิลิตร ทุกชั่วโมงเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟินอลคงเหลืออยู่ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการกำจัดฟินอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาการขจัดฟีนอลด้วยกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิต

ตัวแปร	ช่วงที่ใช้ในการศึกษา
จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์	2-8 แผ่น
ค่าความเป็นกรด-เบส	3-9
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล	10-100 พีพีเอ็ม
กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต	45-135 วัตต์
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0-1 โมลาร์
อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน	0-800 มิลลิลิตรต่อนาที
อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	30-70 องศาเซลเซียส

3.3.5 ทดสอบลักษณะสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.5.1 เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

เครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น D8 Discover ของ Bruker เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารตัวอย่างถูกบันทึกด้วยเครื่อง Rigaku RINT 2000 diffractometer โดยใช้ตัวกรองนิกเกิล แหล่งกำเนิดแสง $\text{CuK}\alpha$ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.542 อังสตรอม) ที่ 40 กิโลโวลต์และ 30 มิลลิโวลต์ สารตัวอย่างถูกดันเข้าไปอยู่ในหลอดแก้วแล้วพักไว้ที่กระจกแก้ว หลังจากนั้นจะวัดที่ 2θ เท่ากับ 15 ถึง 70 องศา โดยใช้วิธีการแบบต่อเนื่องในอัตรา 5 องศาต่อนาที ผลการวิเคราะห์แสดงพีคซึ่งบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง รวมทั้ง 2θ ค่า d และค่าเข้มแสง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้ โดยไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นผลึก 2 สัณฐานด้วยกัน คือ สัณฐานอนาเทสแสดงพีคที่ 101 ($2\theta \sim 25.3$ องศา) และสัณฐานรูไทล์ที่ 110 ($2\theta \sim 27.35$ องศา)

3.3.5.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) ตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าก่อนนำไปวัดที่อัตราการเร่งศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลต์

3.3.5.3 เครื่อง UV-VIS spectrophotometer

เครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น V-530 ยี่ห้อ Jasco ใช้ในระบุมความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร และใช้ในการวัดปริมาณของฟินอล โดยใช้หาค่าการดูดกลืนแสงเพื่อหาปริมาณฟินอลคงเหลือ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำสารตัวอย่างวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 190-800 นาโนเมตร เพื่อหาความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของฟินอล จะได้ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 269 นาโนเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก
- ทำ Calibration curve โดยวัดที่ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 269 นาโนเมตร จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของฟินอล แสดงในภาคผนวก ข
- นำสารตัวอย่างไปทำการวัดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 269 นาโนเมตร จะได้ค่าการดูดกลืนแสง
- คำนวณหาปริมาณฟินอลคงเหลือจากสมการความสัมพันธ์ แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

3.4 การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสองระดับ (Montgomery, 2001)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้กันมากในการทดลองที่เกี่ยวกับหลายปัจจัย โดยศึกษาถึงผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมต่อการตอบสนองซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^k) มีประโยชน์มากในการคัดเลือกปัจจัยสำคัญและความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา 4 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะแทนด้วยระดับ “ต่ำ (-1)” และ “สูง (+1)” ช่วงในการศึกษาปัจจัยแสดงดังตารางที่ 3.2 แบบจำลองการคำนวณการออกแบบ 2^4 ประกอบด้วย 4 ปัจจัยหลัก 6 อันตรกิริยาของสองปัจจัย 4 อันตรกิริยาของสามปัจจัย และ 1 อันตรกิริยาของสี่ปัจจัย ดังนั้นแบบจำลองการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^4 ที่สมบูรณ์ประกอบด้วย $2^4 - 1$ โดยทั่วไปการคำนวณการออกแบบ 2^4 หาได้จาก 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนประมาณผลของปัจจัยต่าง ๆ และคำนวณผลรวมของกำลังสองของแต่ละปัจจัย โดยคอนทราสต์ (contrast) ที่เกี่ยวข้องกับแต่ละปัจจัยในการคำนวณขั้นแรกนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเครื่องหมายบวกและลบ ดังแสดงในตารางภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.2 สภาวะของการออกแบบ 2^4 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลด้วยการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง

ปัจจัย	ชื่อ	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)
A	จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบ TiO_2	2 แผ่น	8 แผ่น
B	ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล	50 พีพีเอ็ม	100 พีพีเอ็ม
C	กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต	45 วัตต์	135 วัตต์
D	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0 โมลาร์	0.626 โมลาร์

โดยทั่วไปคอนแทรกต์ของปัจจัย “ABCD” หาได้จากการอธิบายทางด้านขวามือของสมการ 3.1

$$\text{คอนแทรกต์}_{ABCD} = (a \pm 1)(b \pm 1)(c \pm 1)(d \pm 1) \quad (3.1)$$

คอนแทรกต์ที่ใช้ในการประมาณผลและผลรวมของกำลังสอง คำนวณตามสมการ 3.2 และสมการ 3.3 ตามลำดับ โดย n คือจำนวนครั้งในการทำซ้ำ

$$\text{การประมาณผล}_{ABCD} = \frac{2 (\text{คอนแทรกต์}_{ABCD})}{n2^4} \quad (3.2)$$

$$\text{ผลรวมของกำลังสอง}_{ABCD} = \frac{2 (\text{คอนแทรกต์}_{ABCD})^2}{n2^4} \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่สองเป็นการทดลอง 16 ครั้งได้จากออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^4 ประกอบด้วยปัจจัยหลักและอันตรกิริยา

ขั้นตอนที่สามเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อประมาณค่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่สำคัญ ตารางที่ 3.3 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล 2^4 ด้วยการซ้ำจำนวน n ครั้ง และใช้ F_0 ในการประมาณค่าถ้าตัวแปรนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญ

ขั้นตอนที่สี่เป็นการปรับแต่งการออกแบบโดยการกำจัดปัจจัยที่ไม่สำคัญ เมื่อได้ปัจจัยสำคัญแล้วจะประมาณค่าสัมประสิทธิ์คำนวณตามสมการ 3.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) ของการทดลองหาได้จากรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ดังสมการ 3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error, se) สำหรับการประมาณค่าปัจจัยและประมาณค่าสัมประสิทธิ์คำนวณตามสมการ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการออกแบบ 2^4

แบบจำลอง	ผลรวม กำลังสอง	ร้อยละการกระจายตัว	ตัวแปร อิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F_0
ปัจจัยหลัก					
A	SS_A	$= (SS_A/SS_T) \times 100$	1	$MS_A = SS_A/1$	$= MS_A/MS_E$
B	SS_B	$= (SS_B/SS_T) \times 100$	1	$MS_B = SS_B/1$	$= MS_B/MS_E$
C	SS_C	$= (SS_C/SS_T) \times 100$	1	$MS_C = SS_C/1$	$= MS_C/MS_E$
D	SS_D	$= (SS_D/SS_T) \times 100$	1	$MS_D = SS_D/1$	$= MS_D/MS_E$
อันตรกิริยาของ สองปัจจัย					
AB	SS_{AB}	$= (SS_{AB}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{AB} = SS_{AB}/1$	$= MS_{AB}/MS_E$
AC	SS_{AC}	$= (SS_{AC}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{AC} = SS_{AC}/1$	$= MS_{AC}/MS_E$
AD	SS_{AD}	$= (SS_{AD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{AD} = SS_{AD}/1$	$= MS_{AD}/MS_E$
BC	SS_{BC}	$= (SS_{BC}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{BC} = SS_{BC}/1$	$= MS_{BC}/MS_E$
BD	SS_{BD}	$= (SS_{BD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{BD} = SS_{BD}/1$	$= MS_{BD}/MS_E$
CD	SS_{CD}	$= (SS_{CD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{CD} = SS_{CD}/1$	$= MS_{CD}/MS_E$
อันตรกิริยาของ สามปัจจัย					
ABC	SS_{ABC}	$= (SS_{ABC}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{ABC} = SS_{ABC}/1$	$= MS_{ABC}/MS_E$
ABD	SS_{ABD}	$= (SS_{ABD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{ABD} = SS_{ABD}/1$	$= MS_{ABD}/MS_E$
ACD	SS_{ACD}	$= (SS_{ACD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{ACD} = SS_{ACD}/1$	$= MS_{ACD}/MS_E$
BCD	SS_{BCD}	$= (SS_{BCD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{BCD} = SS_{BCD}/1$	$= MS_{BCD}/MS_E$
อันตรกิริยาของ สี่ปัจจัย					
ABCD	SS_{ABCD}	$= (SS_{ABCD}/SS_T) \times 100$	1	$MS_{ABCD} = SS_{ABCD}/1$	$= MS_{ABCD}/MS_E$
ค่าความคลาด เคลื่อน	SS_E	$= (SS_E/SS_T) \times 100$	$2^4(n-1)$	$MS_E = SS_E/2^4(n-1)$	
ผลรวม	SS_T		$n2^4-1$		
เมื่อ	SS_T คือ ผลรวมกำลังสองของแต่ละปัจจัย				
	SS_E คือ ผลรวมกำลังสองที่เกิดจากความคลาดเคลื่อน				
	$SS_E = SS_T - SS_{subtotals}$				
โดย	$SS_{subtotals} = SS_A + SS_B + \dots + SS_{ABCD}$				

$$\text{การประมาณค่าสัมประสิทธิ์}_{ABCD} = \frac{\text{การประมาณค่าปัจจัย}_{ABCD}}{2} \quad (3.4)$$

$$S = \sqrt{MS_E} \quad (3.5)$$

$$\text{se (การประมาณค่าปัจจัย)} = \frac{2S}{\sqrt{n2^4}} \quad (3.6)$$

$$\text{se (การประมาณค่าสัมประสิทธิ์)} = \frac{S}{\sqrt{n2^2}} \quad (3.7)$$

เมื่อ S คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

MS_E คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

se คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าปัจจัยเป็นสองเท่าของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในการจำลองการถดถอยของการออกแบบ 2^4 ขั้นตอนที่ทำเป็นกรณีวิเคราะห์ส่วนตักต่างเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

3.4.1 ผลตกค้าง (Residuals) และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) (Montgomery, 2001)

ก่อนสรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ความถูกต้องของแบบจำลองต้องทำการตรวจสอบ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้น คือ การวิเคราะห์ผลตกค้าง (residual analysis) ผลตกค้าง (residuals, e) ของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสี่ปัจจัย แสดงดังสมการ 3.8

$$e = Y - \hat{Y} \quad (3.8)$$

เมื่อ Y คือ ค่าจริง

\hat{Y} คือ ค่าทำนาย

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้ง่ายโดยการวิเคราะห์ผลตกค้างด้วยกราฟความสัมพันธ์ดังนี้

3.4.1.1 ความสัมพันธ์ของ Normal probability กับผลตกค้าง

ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability และผลตกค้างเป็นขั้นตอนที่เป็นประโยชน์อย่างมากเพราะในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมักมีผลกับผลตกค้าง ถ้าการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนเป็นปกติ จะได้ชุดข้อมูลเป็นเส้นตรง เส้นตรงที่ปรากฏจะให้ความสำคัญกับค่ากลางมากกว่าค่าสูงสุด

3.4.1.2 ความสัมพันธ์ของผลตกค้างกับค่าทำนาย

ถ้าแบบจำลองถูกต้อง ส่วนตกค้างไม่ควรมีความสัมพันธ์เป็นโครงสร้าง (Structureless) ซึ่งในส่วนสำคัญควรไม่สัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ รวมทั้งค่าตอบสนองที่ทำนายได้ การตรวจสอบอย่างง่ายโดยการสร้างกราฟระหว่างส่วนตกค้าง (e) เปรียบเทียบกับค่าทำนาย \hat{Y} โดยกราฟนี้จะไม่แสดงให้เห็นรูปแบบหรือโครงสร้างที่ชัดเจน

3.4.2 สมการถดถอย (Montgomery, 2001)

ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเป็นการออกแบบที่ง่ายให้ผลที่ชัดเจนในการทดลองในเทอมของสมการถดถอย (regression model) เพราะการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับเป็นเพียงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลของแต่ละปัจจัยหรือสามารถใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ย แต่สมการถดถอยมีความเป็นธรรมชาติมากและใช้งานง่ายสำหรับการทำนายค่าใด ๆ สมการถดถอยแสดงดังสมการ 3.9

$$\hat{Y}_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.9)$$

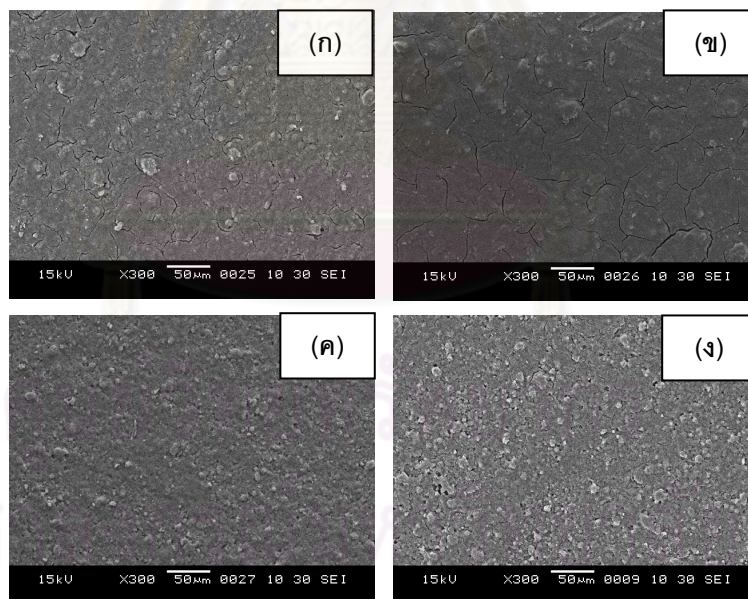
เมื่อ	\hat{Y}_i	คือ ค่าทำนายใด ๆ (i คือ จำนวนของค่าตอบสนองของตัวแปร)
	X_k	คือ สัญลักษณ์แทนปัจจัยใด ๆ (k คือ จำนวนปัจจัยหลัก)
	β_0	คือ ค่าตอบสนองเฉลี่ยของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (จุดตัดแกน y)
	β_k	คือ ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ (สัมประสิทธิ์ถดถอย)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบต่อลักษณะและประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนล

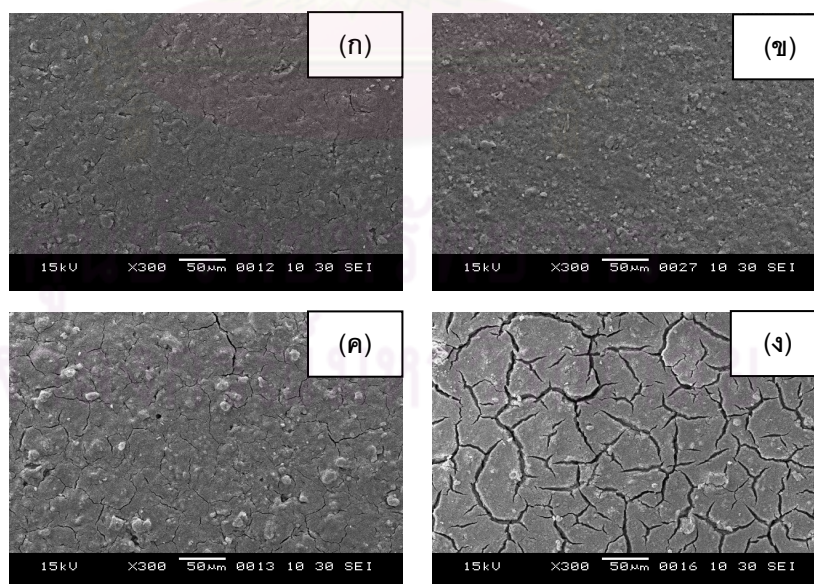
รูปที่ 4.1 แสดงภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าการยึดเกาะของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมทิลเมทาคริเลตขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตน (acetyl acetone, ACA) ต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ACA/TiO_2) โดยการเพิ่ม ACA/TiO_2 จาก 1.0 (รูปที่ 4.1ก) และ 2.0 (รูปที่ 4.1ข) ไปเป็น 3.0 (รูปที่ 4.1ค) และ 4.0 (รูปที่ 4.1ง) ทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเนื่องจากแอซีทิลอะซีโตนช่วยเพิ่มความมีขี้และการเกาะติดบนผิวของพอลิเมอร์ (Yang และ Han, 2008)



รูปที่ 4.1 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) $ACA/TiO_2 = 1.0$ (ข) $ACA/TiO_2 = 2.0$ (ค) $ACA/TiO_2 = 3.0$ และ (ง) $ACA/TiO_2 = 4.0$ (จำนวนรอบในการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ = 3 รอบ)

รูปที่ 4.2 แสดงผลของจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต เมื่อกำหนดให้ ACA/TiO_2 คงที่ที่ 3.0 พบว่าจำนวนรอบในการเคลือบ 1 (รูปที่ 4.2ก) และ 3 รอบ (รูปที่ 4.2ข) ส่งผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบเป็น 5 (รูปที่ 4.2ค) และ 10 รอบ (รูปที่ 4.2ง) ส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีรอยแตกเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์ม ทั้งนี้อาจเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายและแอสีทิลอะซีโตนซึ่งมีมากกว่าการจุ่มเคลือบ 1 และ 3 รอบ ขณะที่ทำการอบแผ่น (Jang และ Han, 2008)

ตารางที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าเมื่อกำหนดจำนวนรอบของการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3 รอบ การเพิ่มอัตราส่วนของแอสีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น อัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3.0 ให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล 62.5% ทั้งนี้เนื่องมาจากแอสีทิลอะซีโตนช่วยเพิ่มความชื้นของฟิล์ม



รูปที่ 4.2 ภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่จำนวนรอบในการเคลือบ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ (ค) 5 รอบ และ (ง) 10 รอบ ($ACA/TiO_2 = 3.0$)

ตารางที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอล

อัตราส่วนโดยโมล- ของแอซีทิลอะซีโตน ต่อไทเทเนียมได- ออกไซด์	จำนวนรอบใน การเคลือบ ไทเทเนียม ไดออกไซด์	ปริมาณไทเทเนียมได- ออกไซด์บนแผ่นพอลิ- เมทิลเมทาคริเลต* (กรัม)	การขจัด ฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง (%)
1.0	3	0.18	41.6
2.0	3	0.36	43.2
3.0	3	0.57	62.5
4.0	3	0.76	60.0
5.0	3	0.39	49.8
3.0	1	0.33	59.5
3.0	5	0.64	68.5
3.0	10	0.96	54.4

* ปริมาณรวมไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจำนวน 8 แผ่น ภาวะที่ใช้ในการทดลอง : ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรด-เบส = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส

บางไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยังผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะติดบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้น (Hu และ Yuan, 2006) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนของแอซีทิลอะซีโตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 5.0 กลับลดประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล เนื่องจากปริมาณตัวทำละลายแอซีทิลอะซีโตนมีมากเกินไป

สำหรับผลของจำนวนรอบในการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ ACA/TiO_2 เท่ากับ 3.0 พบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 5 รอบ มีประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลได้มากที่สุดถึง 68.5% อย่างไรก็ตามการเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบมากเกินไปส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลลดลง ซึ่งเกิดจากการบดบังแสงกันเอง

ของไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Fujishima และคณะ, 1999, Liu และคณะ, 2006)

เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่จริงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งใช้ Energy-Dispersive X-ray Spectrometer ดังตารางที่ 4.2 พบว่าผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่จริง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 3 5 และ 10 รอบเท่ากับ 47.7 54.8 54.0 และ 52.9% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบจาก 1 รอบ ไปเป็น 3 รอบ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบเป็น 5 และ 10 รอบ ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากความสามารที่จำกัดในการยิงอิเล็กตรอนลงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในช่วงความหนาค่าหนึ่ง จึงทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณลดลง

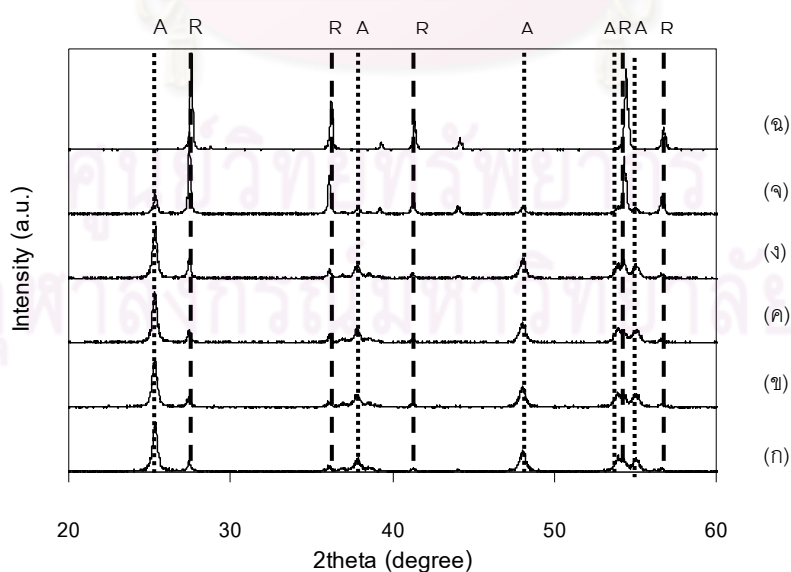
ตารางที่ 4.2 ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่จริงบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จำนวนรอบในการเคลือบ	Ti	
	wt%	at. %
1	47.7	22.9
3	54.8	28.6
5	54.0	27.8
10	52.9	27.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการจัดฟีนอล

ประสิทธิภาพในการจัดฟีนอลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับสัณฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยรูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิในช่วง 400-800 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบผลมระหว่างสัณฐานแบบอนาเทสและรูไทล์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบตำแหน่งพีกอนาเทส 2θ ที่ 25.2 37.9 47.8 53.8 และ 55.0 องศา และตำแหน่งพีกูไทล์ 2θ ที่ 27.4 36.1 41.2 และ 54.3 องศา (Smith, 1960) ตารางที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิการเผาต่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐานแบบอนาเทส/รูไทล์และระดับการสลายฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 ประกอบด้วยสัณฐานแบบอนาเทส/รูไทล์เท่ากับ 70/30 โดยน้ำหนัก จากงานวิจัยของ Magglie และคณะ (2001) รายงานว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีสัณฐานผลมระหว่างอนาเทส (70-75%) และรูไทล์ (30-25%) มีความไวสูงกว่าการมีสัณฐานเพียงอย่างเดียวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัย เมื่อเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงถึง 700 องศาเซลเซียสทำให้สัณฐานแบบอนาเทสเปลี่ยนไปเป็นรูไทล์ (Xie และ Yuan, 2003) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความไวต่ำกว่าแบบอนาเทส (Fujishima และคณะ, 1999) โดยระดับการสลายฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง 23.4% ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อรูปแบบ XRD ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์: (ก) ไม่เผา (ข) 400 องศาเซลเซียส (ค) 500 องศาเซลเซียส (ง) 600 องศาเซลเซียส (จ) 700 องศาเซลเซียส และ (ฉ) 800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐานแบบอนาเทสต่อรูโพล์ที่อุณหภูมิการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน

อุณหภูมิการเผา (องศาเซลเซียส)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสัณฐาน แบบอนาเทส/รูโพล์	การจัดฟันอลที่ 5 ชั่วโมง (%)
ไม่เผา	70/30	68.5
400	77/22	50.7
500	68/32	62.5
600	67/33	36.2
700	51/49	23.4

* ภาวะที่ใช้ในการทดลอง : จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟันอล = 50 พีพีเอ็ม ค่าความเป็นกรด-เบส = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส

4.3 จลนพลศาสตร์ของการจัดฟันอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการจัดฟันอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสงเร่งปฏิกิริยาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟันอลที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายในช่วง 5 ถึง 7 เก็บน้ำตัวอย่างออกมาวิเคราะห์ปริมาณฟันอลคงเหลือทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Naeem และ Ouyang (2009) พบว่าสมการจลนพลศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) เป็นสมการที่เหมาะสมในการอธิบายเกี่ยวกับปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงแสดงดังสมการ 4.1

$$r = - \frac{dC}{dt} = \frac{k_r KC_s}{(1 + KC_s)} \quad (4.1)$$

- เมื่อ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (พีพีเอ็มต่อนาที)
 C_s คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของฟันอล (พีพีเอ็ม)
 t คือ เวลาของปฏิกิริยา (นาที)

k_r คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (นาที่⁻¹)

K คือ ค่าคงที่ของการดูดซับของฟินอล

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่าน้อยมาก พจน์ของ KC_s สามารถตัดทิ้งได้ และกำหนดให้ $k_r K$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปรากฏ (k_{app}) ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo first order reaction) แสดงดังสมการ 4.2 เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและ $-\ln(C_t/C_0)$ ความชันของกราฟที่ได้ คือ ค่า k_{app}

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{app}t \quad (4.2)$$

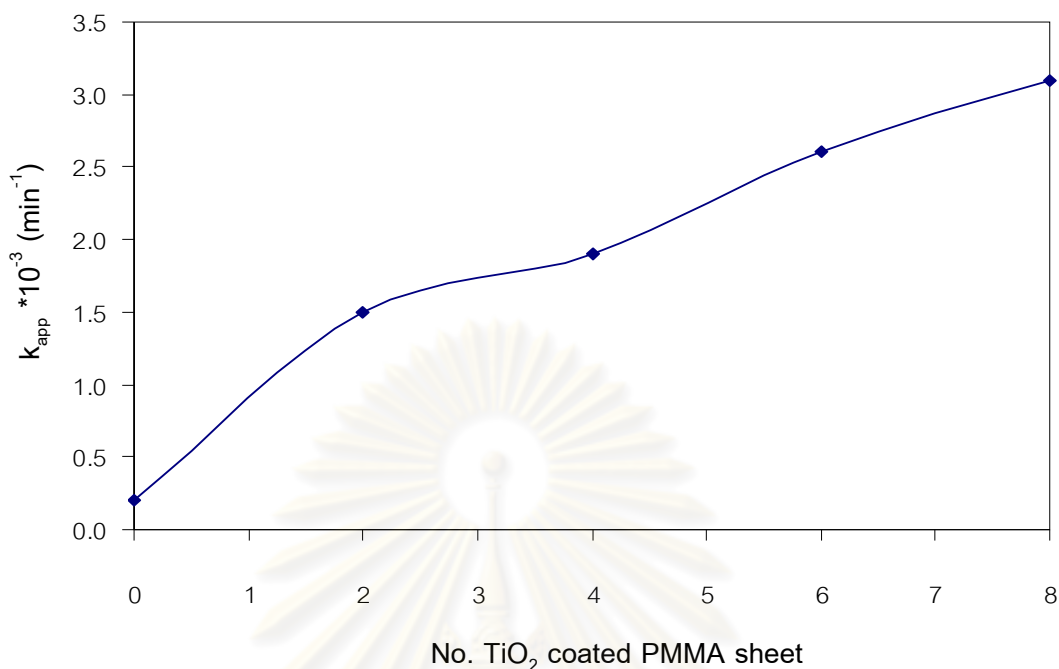
เมื่อ k_{app} คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปรากฏของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที่⁻¹)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล (พีพีเอ็ม)

C_t คือ ความเข้มข้นของฟินอล ณ เวลานั้น (พีพีเอ็ม)

4.3.1 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์สะท้อนถึงปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในระบบ โดยในส่วนนี้ศึกษาผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ รูปที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยา (k_{app}) เมื่อใช้จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน พบว่าอัตราการสลายฟินอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น จาก 2 แผ่น (ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.14 กรัม) เป็น 8 แผ่น (ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.57 กรัม) โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 8 แผ่นเท่ากับ 3.1×10^{-3} นาที่⁻¹ เนื่องจากการเพิ่มแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการ



รูปที่ 4.4 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5.5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

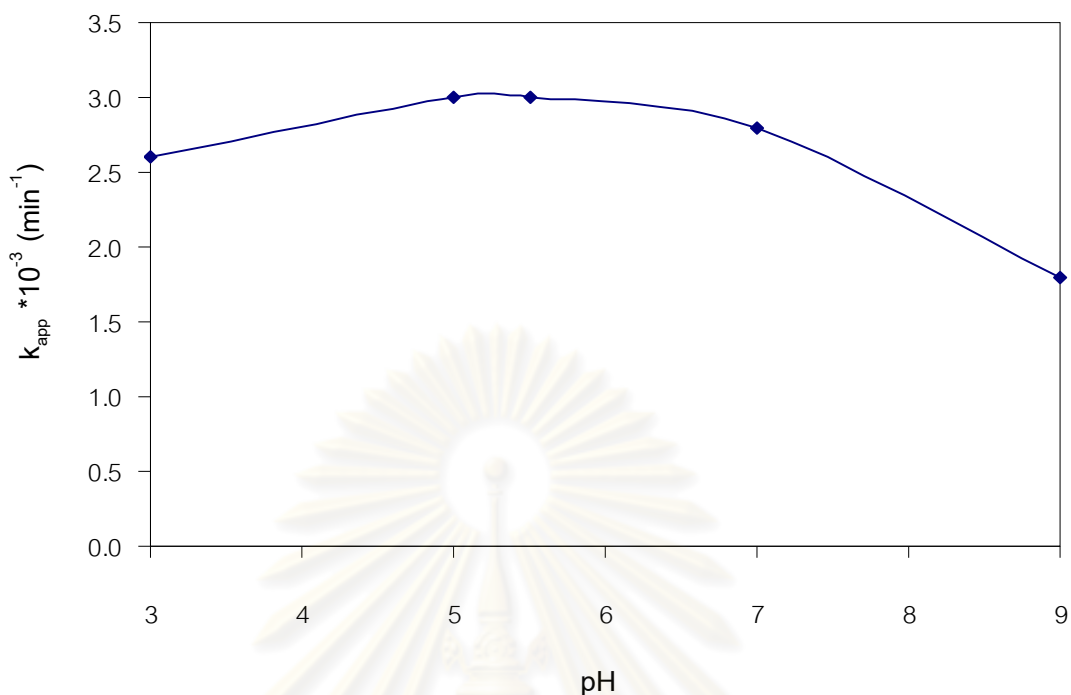
เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาดูดซับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Jung และคณะ, 2004)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟีนอลต่อไป

4.3.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่ออัตราการสลายตัวของพินอล

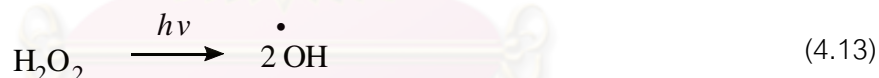
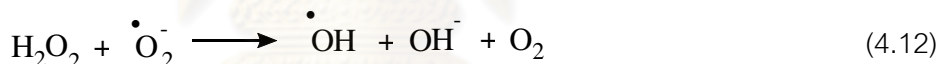
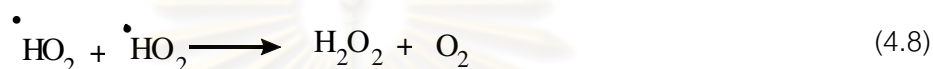
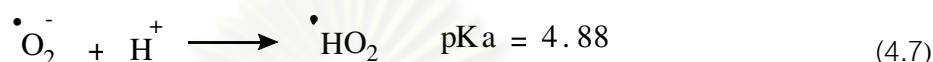
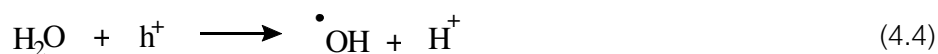
ผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ไม่เพียงแต่ปรับสมบัติของน้ำเสียแต่เป็นการเปลี่ยนแปลงประจุของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประจุของโมเลกุลพินอล การดูดซับพินอลไปยังผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยค่าความเป็นกรด-เบสที่ใช้ในการศึกษาในช่วง 3-9 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารที่ใช้ในการทำการปรับค่าความเป็นกรด-เบส ค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_{app}) ที่ความเป็นกรด-เบสต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการสลายพินอลสูงสุดในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ซึ่งมีค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 3×10^{-3} นาที⁻¹ ที่ความเป็นกรดถึงกลาง เนื่องจากที่ภาวะความเป็นกรด-เบสในช่วงนี้พินอลเริ่มต้นอยู่ในรูปที่ไม่มีไอออน มีความสามารถในการละลายน้ำน้อยที่สุดจึงถูกดูดซับไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากที่สุด ทำให้อัตราการสลายตัวของพินอลเพิ่มขึ้น (Chiou และคณะ, 2008) จากนั้นเมื่อสารละลายมีความเป็นเบสมาก ($pH = 9$) ทำให้อัตราการสลายตัวของพินอลลดลง เนื่องจากพบว่าในภาวะที่สารละลายเป็นเบสสามารถละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตไฮดรอกไซด์ไอออนจากเบสที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารละลายไม่ได้ถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดพินอลลดลง (Konstantinou และ Albanis, 2003)

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับของสารมลพิษบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบ ค่าความเป็นกรด-เบสไม่เพียงแต่ส่งผลต่อสมบัติของผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ยังมีผลต่อการเกิดขึ้นของอนุมูลไฮดรอกซิล ในกรณีที่ไม่มีสารละลายของไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมาอยู่ในสารละลาย การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดปฏิกิริยาภายใต้ภาวะเบสนั้นเกิดมาจากการมีไฮดรอกไซด์ไอออนมากในสารละลาย ส่งผลให้อนุมูลไฮดรอกซิลมากขึ้น ส่วนภายใต้ภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรดนั้น จะเกิดอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลขึ้น (perhydroxyl radical, HO_2^{\bullet}) การทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์กับโปรตอน สามารถรวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอนุมูลไฮดรอกซิลให้แก่ระบบ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์เพิ่มขึ้นแสดงดังสมการที่ 4.3-4.13 (Yang และคณะ, 1999) ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนในแถบการนำกับหลุมในแถบวาเลนซ์แสดงดังสมการ 4.3 หลุมในแถบ



รูปที่ 4.5 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอล (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

วาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.4 หลุมในแถบวาเลนซ์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.5 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์แสดงดังสมการ 4.6 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยาโปรตอนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.7 อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลจับตัวกันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนแสดงดังสมการ 4.8 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเกิดเป็นเปอร์ไฮดรอกไซด์ไอออนแสดงดังสมการ 4.9 เปอร์ไฮดรอกไซด์ไอออนทำปฏิกิริยากับโปรตอนเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงดังสมการ 4.10 อิเล็กตรอนในแถบการนำทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.11 อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.12 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสงแตกตัวเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.13



ค่า pH of zero point charge (pH_{zpc}) ของตัวเร่งปฏิกิริยาถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญที่สามารถบ่งชี้ลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ หาได้จากสมการ 4.14

$$\text{pH}_{\text{zpc}} = 1/2 (\text{pK}_{\text{a1}}^{\text{s}} + \text{pK}_{\text{a2}}^{\text{s}}) \quad (4.14)$$

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 มีค่าคงที่ความว่องไวของพื้นผิว $\text{pK}_{\text{a1}}^{\text{s}}$ (ค่าคงที่การแตกตัวของกรดครั้งที่หนึ่ง) เท่ากับ 4.5, $\text{pK}_{\text{a2}}^{\text{s}}$ (ค่าคงที่การแตกตัวของกรดครั้งที่สอง) เท่ากับ 8 และ pH_{zpc} เท่ากับ 6.25 (Komann และคณะ, 1991) ดังนั้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสมากกว่า pH_{zpc} จะมีประจุเป็นลบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูป TiO^- และ Ti-OH ในขณะที่ TiOH_2^+ จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสน้อยกว่าค่า pH_{zpc} (Doong และคณะ, 2001, Wang และคณะ, 1999) ดังนั้นที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5

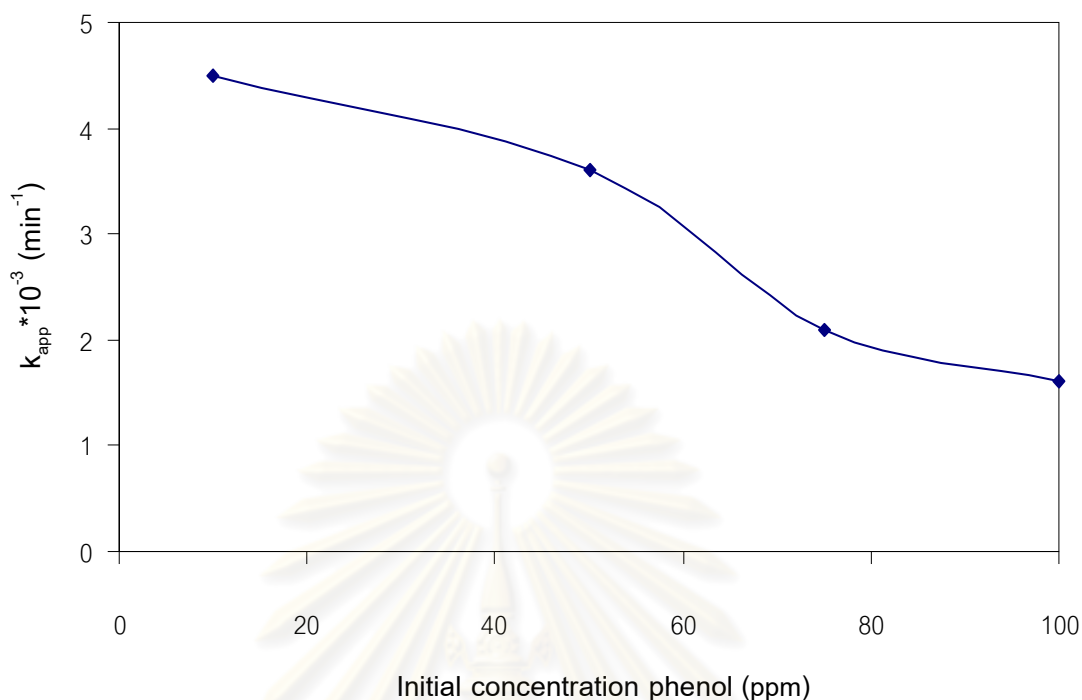
ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประจุเป็นบวก ขณะที่ฟินอลแตกตัวแล้วจะมีประจุเป็นลบ สามารถถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ประสิทธิภาพการกำจัดฟินอลจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลมากที่สุดส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงเกิดได้ดี (Chiou และคณะ, 2008)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น และค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟินอลต่อไป

4.3.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของฟินอลแสดงดังรูปที่ 4.6 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10-100 พีพีเอ็ม พบว่าอัตราการสลายฟินอลลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟินอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการสลายตัวขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟินอล ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของฟินอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟินอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเพราะฟินอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการอ้อมตัวที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Arana และคณะ, 2004)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟินอลต่อไป



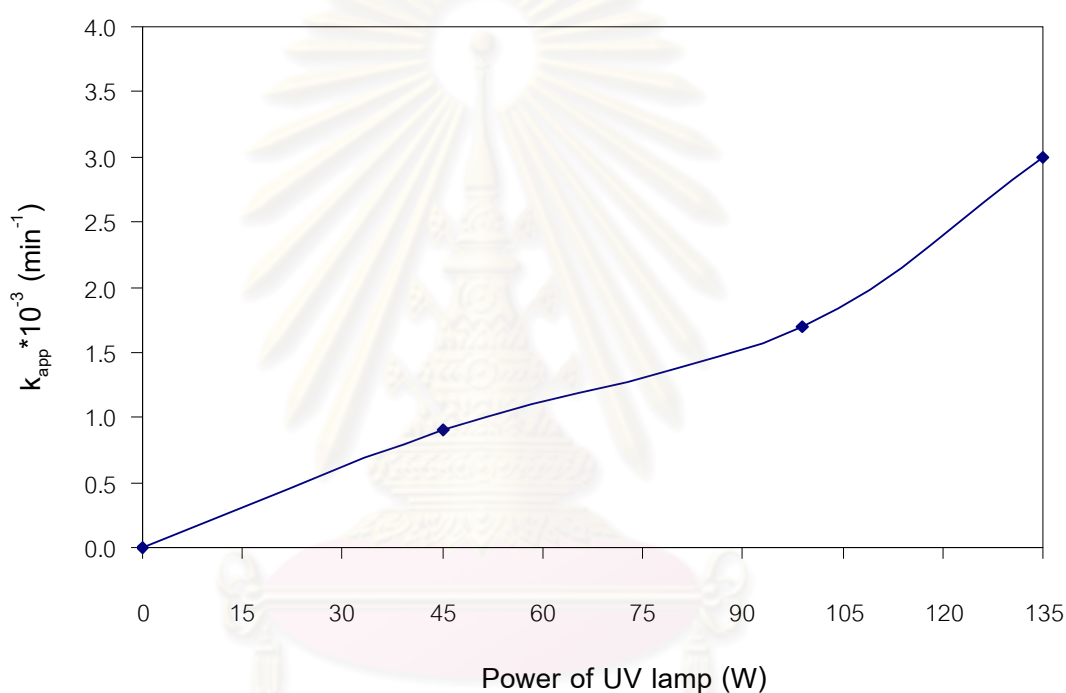
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.4 ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตสะท้อนถึงปริมาณความเข้มแสงอัลตราไวโอเล็ต รูปที่ 4.7 แสดงผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล 50 พีพีเอ็ม โดยกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 45-135 วัตต์ พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต โดยกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตที่ 45 99 และ 135 วัตต์มีค่าคงที่ปรากฏเท่ากับ 0.9×10^{-3} 1.7×10^{-3} และ 3×10^{-3} นาที⁻¹ ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตช่วยเพิ่มอนุมูลไฮดรอกซิลเหมือนกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้อัตราการสลายฟีนอลเพิ่มขึ้นกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008)

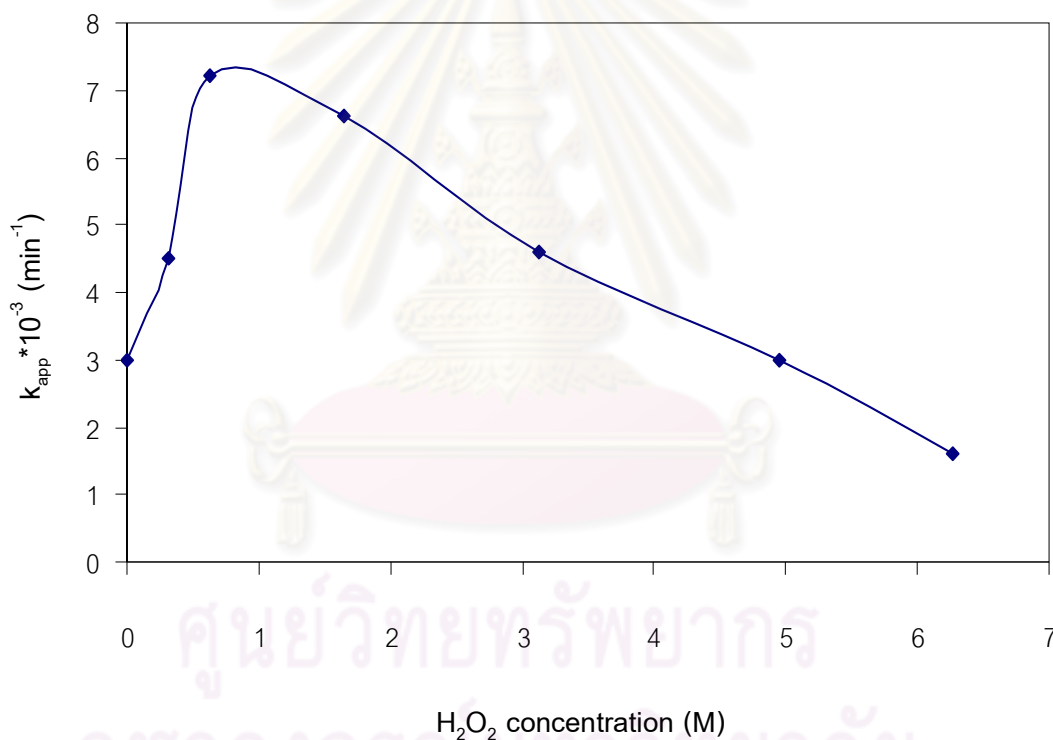
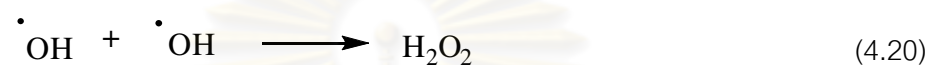
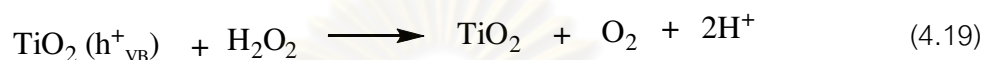
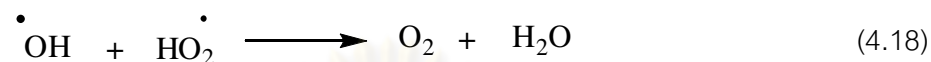
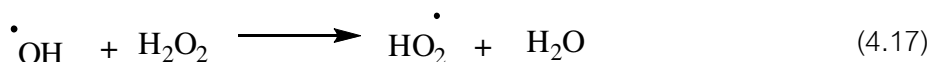
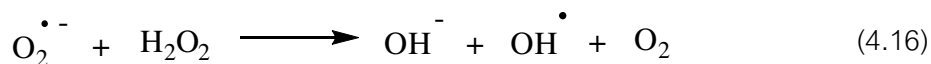
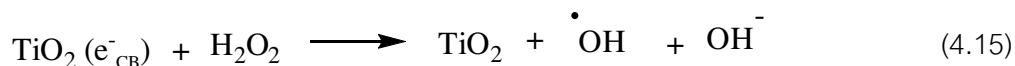
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม และกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟีนอลต่อไป



รูปที่ 4.7 ผลของกำลังของหลอดยูวีต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.5 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของพินอล

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการขจัดพินอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เติมลงไปในการสลายเพื่อช่วยเพิ่มการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยแสง (photoassisted reaction) ภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0-6.26 โมลาร์ ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของพินอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าค่าคงที่ปรากฏของปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายพินอลเพิ่มขึ้นจาก 3×10^{-3} ถึง 7.2×10^{-3} เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0 ถึง 0.62 โมลาร์ เนื่องจากการปรับปรุงความว่องไวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นถึง 0.62 โมลาร์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้อัตราการสลายพินอลเพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์รวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.15 ซึ่งเป็นการลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม อนุมูลเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.16 ทำให้ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มอัตราการสลายพินอลได้มากขึ้น (Reddy และ Kotaiyah, 2006, Sauer และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามการใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงเกินกว่า 0.62 โมลาร์ ทำให้ค่าคงที่ปรากฏมีค่าลดลงแสดงดังสมการ 4.17-4.20 เนื่องจากการอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลแสดงดังสมการ 4.17 อนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากับอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเกิดเป็นออกซิเจนกับโมเลกุลของน้ำแสดงดังสมการ 4.18 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับหลุมในแถบวาเลนซ์เกิดเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์กับออกซิเจนแสดงดังสมการ 4.19 อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดการจับตัวกันเองเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แสดงดังสมการ 4.20 ส่งผลให้อัตราการสลายพินอลลดลง (Sun และคณะ, 2007, Edwards และคณะ, 1982)



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

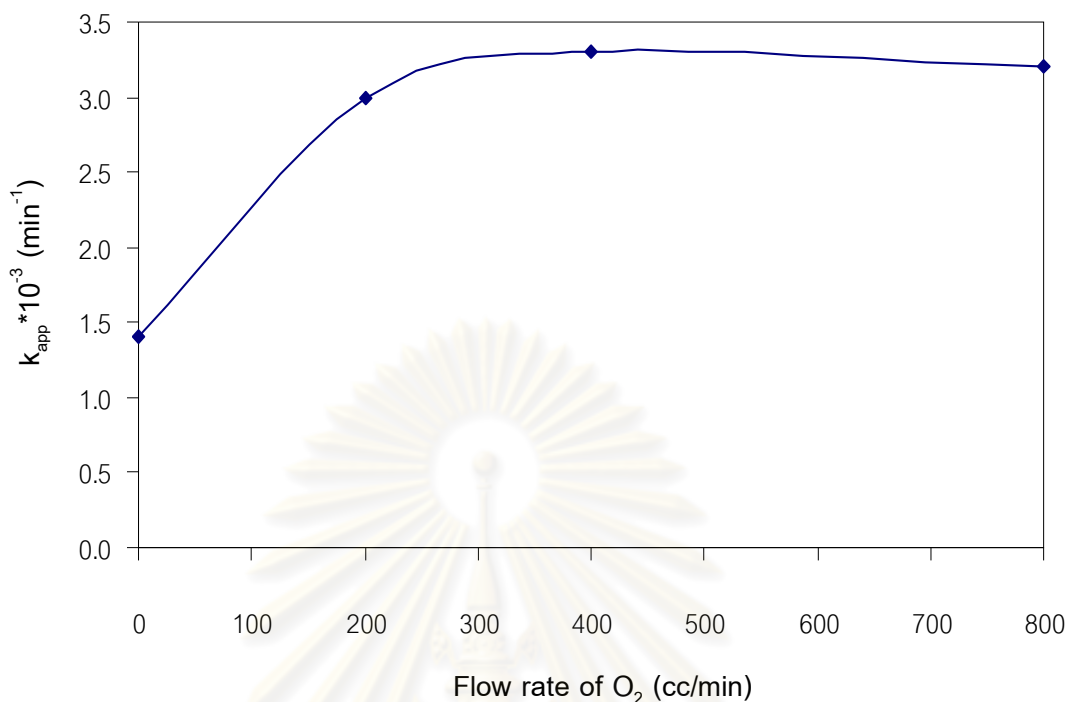
4.3.6 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม โดยออกซิเจนที่ใช้ในการศึกษา มีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0-800 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟีนอลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.4×10^{-3} ถึง 3.3×10^{-3} นาที⁻¹ เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปยัง 400 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากการบ่อนอกซิเจนเข้าไปในระบบเป็นการเพิ่มปริมาณโมเลกุลออกซิเจนซึ่งคาดว่าจะช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม โดยสามารถอธิบายได้จากสมการ 4.21 (Ollis และคณะ, 1991, Murov และคณะ, 1993)



ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจนทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบการนำแล้วเปลี่ยนรูปเป็นอนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อไปกับไฮดรอกซิลโดรเจนเกิดเป็นอนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิล ผลสุดท้ายจะเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้อัตราการสลายฟีนอลเพิ่มขึ้น (Reutergardh และคณะ, 1997) นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องการออกซิเจนในการกระตุ้นในการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลและนำไปสู่การจับตัวกับอิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลสูงขึ้น (Chun และคณะ, 2000) แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 800 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการสลายตัวของฟีนอลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากเกินไปจะไปยับยั้งการทำงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้อัตราการสลายตัวของฟีนอลลดลง (Wei และ Wan, 1991)

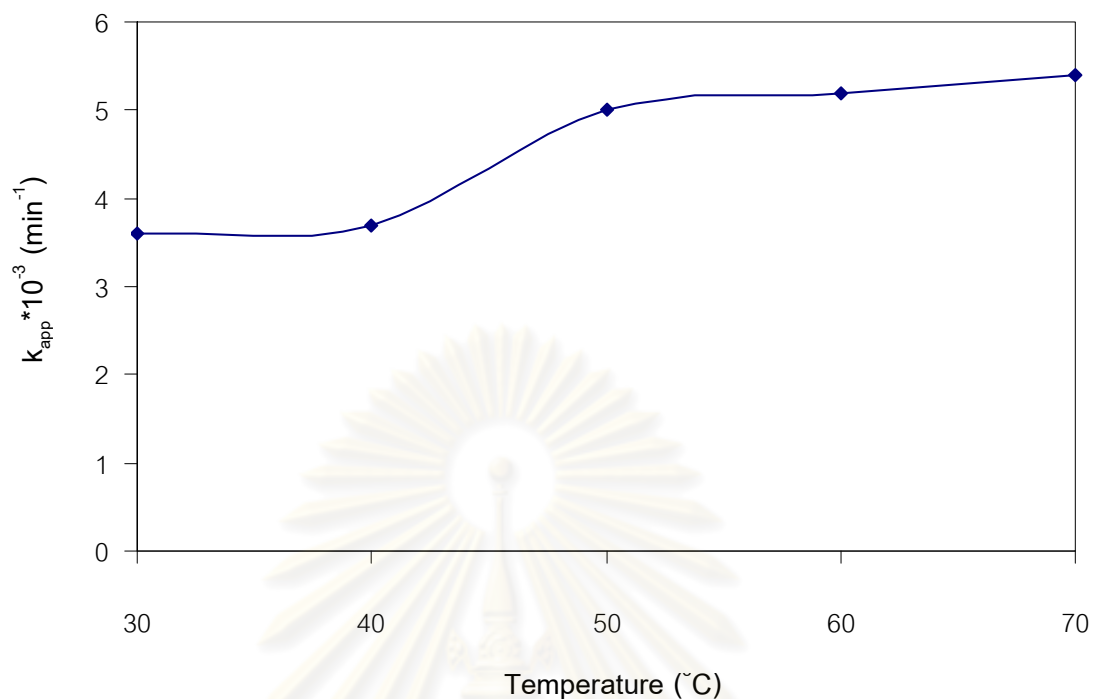
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ และอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที มาใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยอื่น ๆ ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงขจัดฟีนอลต่อไป



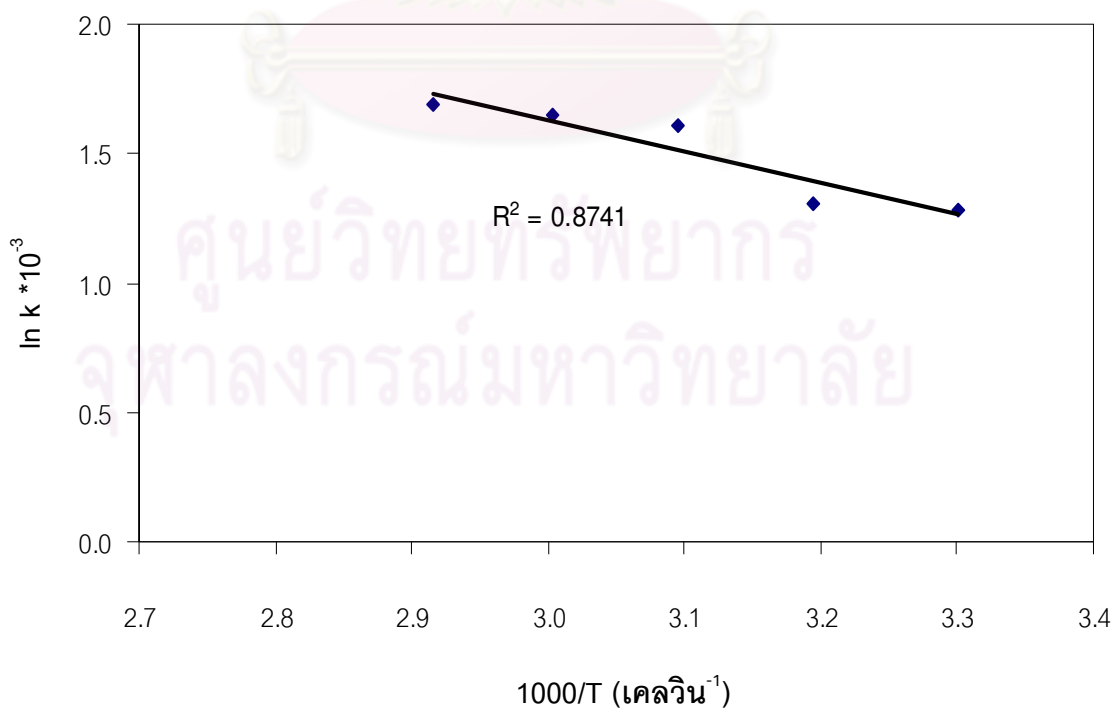
รูปที่ 4.9 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

4.3.6 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟีนอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการของ Arrhenius Equation (สมการ 4.22) แสดงดังรูป 4.11 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของระบบเท่ากับ 0.01 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในช่วง (20-80 องศาเซลเซียส) โดยทั่วไปปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิห้องและไม่ต้องการให้ความร้อนจากภายนอก (Hermann, 1999) ถึงแม้ว่าปฏิกิริยานี้จะมีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำซึ่งมีผลน้อยมากต่อการกระตุ้น



รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาตามสมการ Arrhenius Equation

อิเล็กตรอนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีแถบช่องว่างที่กว้าง แต่พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาเป็นตัวควบคุมการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง (Matthew, 1987) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงอาจเกิดมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจน (Hoffmann, 1995) หรือในอีกแง่หนึ่ง คือ เกิดจากการคายซับอย่างรวดเร็วระหว่างตัวรองรับ (substrate) และตัวกลาง (intermediate) จากไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีพื้นที่ว่างในการทำปฏิกิริยามากขึ้นเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงได้ดีขึ้น (Hermann, 1995)

$$\ln k = - \frac{E_a}{RT} \ln A \quad (4.22)$$

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการสลายตัวของพีนอล ได้ภาวะที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของพีนอลเท่ากับ $7.2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ ซึ่งสามารถขจัดพีนอลได้ 91.4%

4.4 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการขจัดพีนอล

ในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อระดับการสลายตัวของพีนอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะเลือกตัวแปรที่มีผลมากต่ออัตราการสลายตัวของพีนอล โดยอาศัยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับและนำตัวแปรมาผูกความสัมพันธ์ในเทอมของสมการถดถอย จากหัวข้อที่ 4.3 ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับนำมาใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดพีนอล ปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยประกอบด้วยจำนวนแผ่นพอลิ

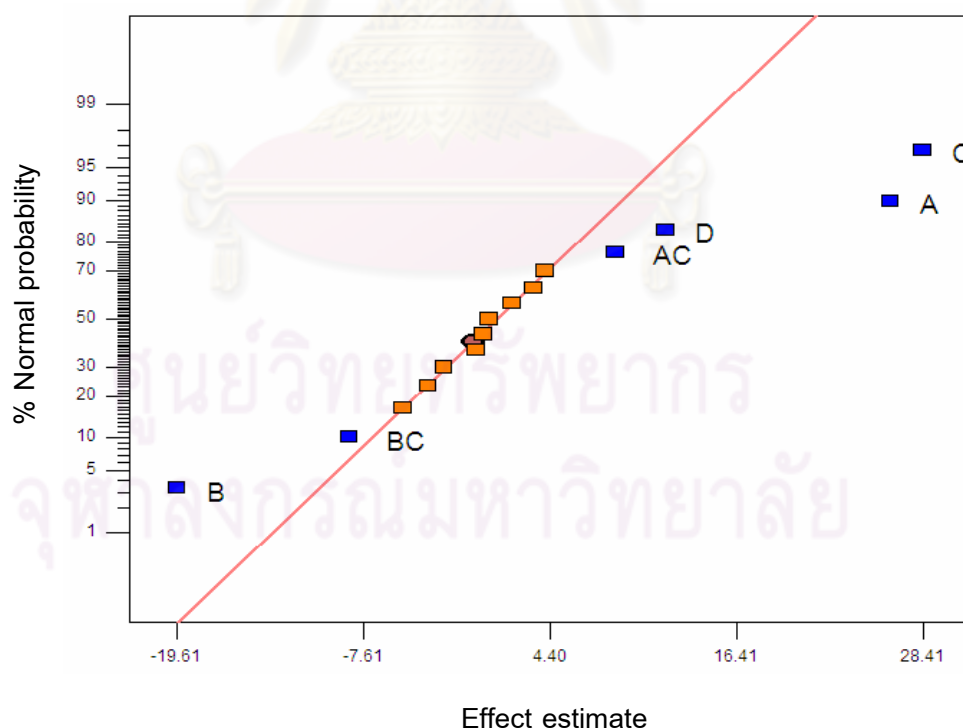
เมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) ผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟินอลที่ 5 ชั่วโมง ประกอบด้วย 2^4 แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟินอล

การทดลอง	การออกแบบปัจจัย				ประสิทธิภาพการขจัดฟินอล (%)
	จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบ TiO_2 (แผ่น)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล (พีพีเอ็ม)	กำลังของหลอดยูวี (วัตต์)	ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โมลาร์)	
1	2	50	45	0	9.71
2	8	50	45	0	24.15
3	2	100	45	0	4.21
4	8	100	45	0	16.2
5	2	50	135	0	35.85
6	8	50	135	0	69.03
7	2	100	135	0	10.2
8	8	100	135	0	39.38
9	2	50	45	0.62	14.2
10	8	50	45	0.62	45.42
11	2	100	45	0.62	7.86
12	8	100	45	0.62	20.81
13	2	50	135	0.62	44.87
14	8	50	135	0.62	91.44
15	2	100	135	0.62	24.17
16	8	100	135	0.62	54.94

การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มต้นด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัย ตารางแสดงการคำนวณคอนแทรกต์จากระดับสูงสุด (+) และระดับต่ำสุด (-) ของแต่ละปัจจัยในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับแสดงในภาคผนวก ค จากคอนแทรกต์ที่ได้นำไปหาค่าประมาณปัจจัยแฟกทอเรียลจำนวน 15 ปัจจัยและผลรวมกำลังสอง

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัย โดยจุดข้อมูลของปัจจัยใดที่อยู่บนเส้นตรงถือว่าไม่มีนัยสำคัญ แต่จุดข้อมูลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบจะอยู่นอกเส้นตรง จากผลการคำนวณพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลคือ ปัจจัยหลัก ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) และอันตรกิริยาของสองปัจจัย ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (AC) และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (BC)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับค่าประมาณปัจจัยต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล พบว่าคอลัมน์ที่แสดงร้อยละการกระจายตัว (Percent contribution) ทำนายความสำคัญของปัจจัยสำคัญที่ได้จากรูปที่ 4.5 ทหารด้วยผลรวมทั้งหมดกำลังสอง การทดสอบ F ใช้ประมาณค่าเมื่อปัจจัยนั้นมีผลเป็นนัยสำคัญ ($F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$ เมื่อ α คือ 95% หรือ 0.05 v_1 คือระดับการสุ่มแบบจำลอง และ v_2 คือระดับการสุ่มปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญหรือความคลาดเคลื่อน) ค่า F ของแต่ละแบบจำลองและปัจจัยได้จากตารางร้อยละการกระจายตัวของ F (Appendix Table IV in Montgomery, 2001) ยกตัวอย่างค่า F ของการกำจัดฟีนอล (%) ($F_{0.05, 6, 9}$) เท่ากับ 3.37 น้อยกว่า F_0 (43.02) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการกำจัดฟีนอล (%) มีนัยสำคัญ วิธีนี้ใช้ตรวจสอบความจริงแบบจำลองทั้งหมดและปัจจัยที่เลือกที่มีนัยสำคัญแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณการประมาณผลและการประมาณสัมประสิทธิ์กับความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริลิตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล เนื่องจากการเพิ่ม

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับจำนวน 4 ปัจจัย

แบบจำลอง	ผลรวมกำลังสอง	ร้อยละการกระจายตัว	ตัวแปรอิสระ	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง	F_0	F_{α, v_1, v_2} (จากตาราง)
ระดับการกำจัดฟีนอล (%)						$F_{0.05, 6, 9}$
แบบจำลอง	8684.48	96.63	6	1447.41	43.02	3.37
A	2764.13	30.75	1	2764.13	82.15	$F_{0.05, 1, 9}$ 5.12
B	1538.60	17.12	1	1538.60	45.73	5.12
C	3229.65	35.93	1	3229.65	95.98	5.12
D	563.83	6.27	1	563.83	16.76	5.12
AC	298.43	3.32	1	298.43	8.87	5.12
BC	289.85	3.22	1	289.85	8.61	5.12
ความคลาดเคลื่อน	302.84	3.36	9	33.65		
ผลรวม	8987.32		15			

ตารางที่ 4.6 การคำนวณค่าประมาณปัจจัย ค่าประมาณสัมประสิทธิ์และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอล

ชื่อปัจจัย	ค่าประมาณ \pm ความคลาด ปัจจัย เคลื่อน	ค่าประมาณ \pm ความคลาด สัมประสิทธิ์ เคลื่อน
ระดับการกำจัดฟีนอล (%)		32.03 \pm 1.45
ปัจจัยหลัก		
จำนวนแผ่น PMMA/TiO ₂ (A)	26.29 \pm 2.90	13.14 \pm 1.45
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (B)	-19.61 \pm 2.90	-9.81 \pm 1.45
กำลังของหลอดยูวี (C)	28.42 \pm 2.90	14.21 \pm 1.45
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D)	11.87 \pm 2.90	5.94 \pm 1.45
อันตรกิริยาของสองปัจจัย		
จำนวนแผ่น PMMA/TiO ₂ ร่วมกับกำลังของหลอดยูวี (AC)	8.64 \pm 2.90	4.32 \pm 1.45
ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลร่วมกับกำลังของหลอดยูวี (BC)	-8.51 \pm 2.90	-4.26 \pm 1.45

จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยา หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาดูดซับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Yung และคณะ, 2004)

การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลมีผลในแง่ลบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลเนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟีนอล เมื่อความเข้มข้นของฟีนอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเพราะฟีนอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการมีตัวที่

ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Arana และคณะ, 2004)

กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล เนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นที่กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008)

การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลในแง่บวกต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งเป็นการลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล (Edwards และคณะ, 1982)

4.4.1 สมการถดถอย (Regression model)

จากการวิเคราะห์ค่าประมาณสัมประสิทธิ์ของปัจจัยสำคัญ 4 ตัวต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลตามตารางที่ 4.6 สามารถนำมาใช้เป็นสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้ทำนายประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลดังแสดงในสมการ 4.23 และ 4.24

$$\hat{Y} = 32.03 + 13.14A - 9.81B + 14.21C + 5.94D + 4.32AC - 4.26BC \quad (4.23)$$

$$\hat{Y} = -5.95 + 1.50a - 0.05b + 0.44c + 118.73d + 0.03ac - (3.78 \times 10^{-3})bc \quad (4.24)$$

เมื่อ \hat{Y} แทนประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

A B C และ D แทนสัญลักษณ์ทางสถิติ ((-1) หรือ (+1)) ของตัวแปร ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

a b c และ d แทนค่าจริงที่ใช้ในการทดลองของตัวแปร ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามลำดับ

สมการถดถอยสามารถใช้ในการทำนายผลการทดลองในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับได้

4.4.2 ผลตกค้างและการตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบสมการถดถอยที่ใช้ทำนายระดับการจัดพีนอลที่ได้จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ดังสมการที่ 4.23 พบว่าเมื่อให้ปัจจัยทุกตัวอยู่ในระดับต่ำ (-1) ค่าทำนายต่อประสิทธิภาพในการจัดพีนอลคำนวณตามสมการ 4.25

$$\begin{aligned}\hat{Y} &= 32.03 + 13.14(-1) - 9.81(-1) + 14.21(-1) + 5.94(-1) + 4.32(-1 \times -1) - 4.26(-1 \times -1) \quad (4.25) \\ &= 8.61\end{aligned}$$

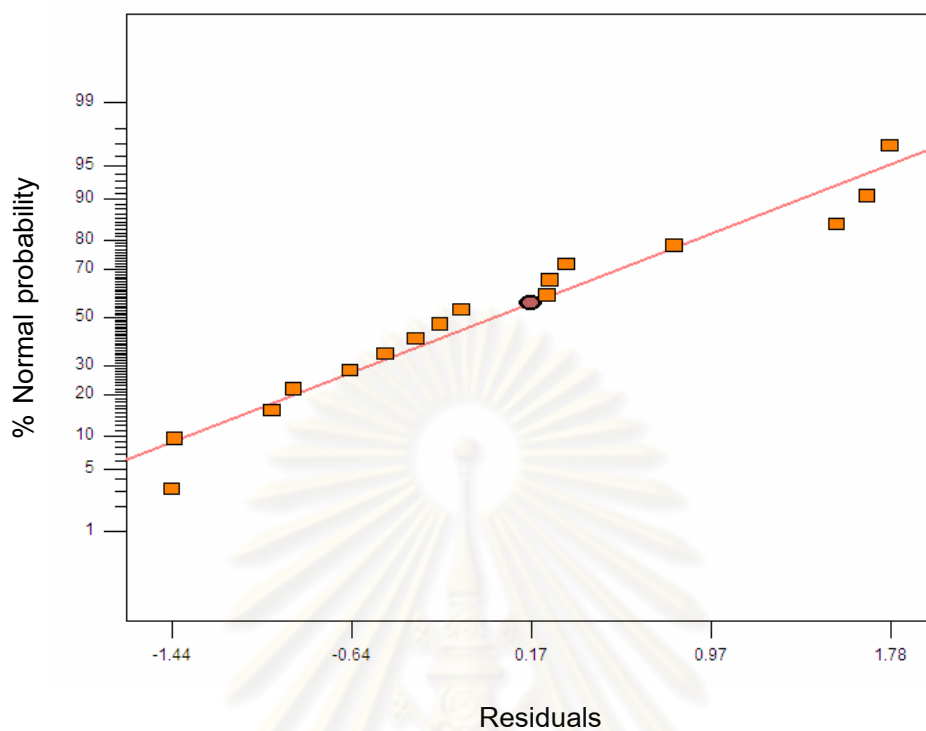
แต่ค่าจริง (Y) เท่ากับ 9.71 ดังนั้นผลตกค้าง (residual, e) เท่ากับ 1.10 นอกจากนี้ค่าจริงค่าทำนายและผลตกค้างทั้ง 16 การทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการจัดพีนอล จุดข้อมูลของแต่ละการทดลองที่ได้จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลจะอยู่ใกล้เส้นตรง ดังนั้นผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลัก คือ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (A) ความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอล (B) กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (C) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (D) อันตรกิริยาของสองปัจจัย คือ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (AC) และความเข้มข้นเริ่มต้นของพีนอลร่วมกับกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต (BC) มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการจัดพีนอลจากผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

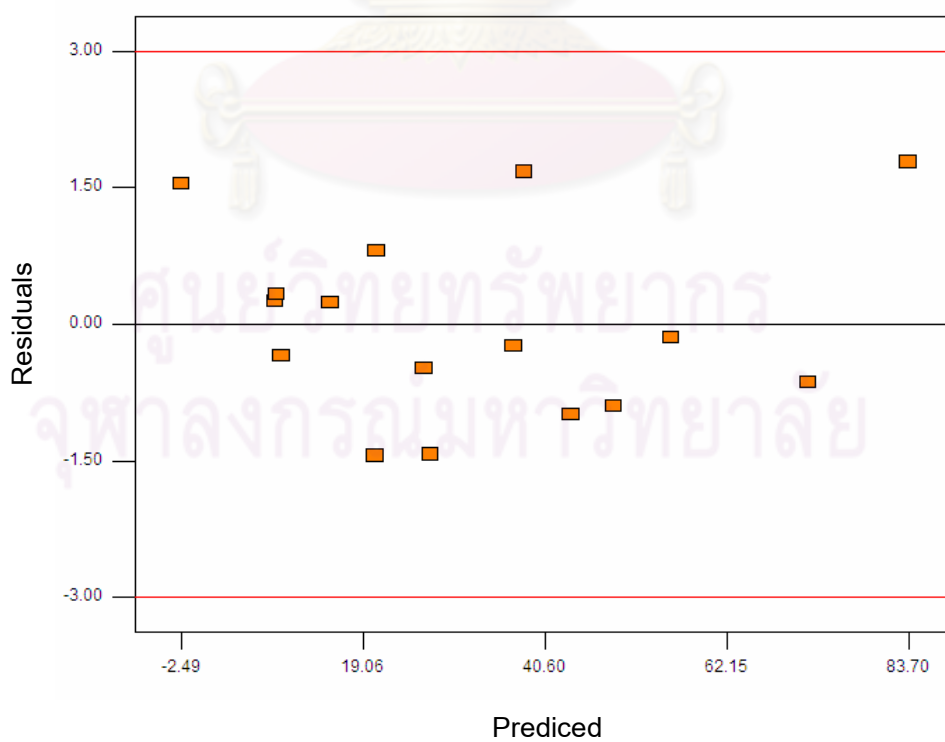
อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการจัดพีนอลสามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการพล็อตผลตกค้างกับค่าทำนายพีนอลที่ถูกจัด (%) ความสัมพันธ์ระหว่างผลตกค้างกับพีนอลที่ถูกจัด (%) แสดงในรูป 4.14 ซึ่งกราฟที่ได้มีการกระจายข้อมูลที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่มีโครงสร้าง

ตารางที่ 4.7 ค่าจริง ค่าทำนายและผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

ครั้งที่	เครื่องหมาย	ระดับการขจัดฟีนอล (%)		
		ค่าจริง	ค่าทำนาย	ผลตกค้าง
1	(1)	9.71	8.61	1.10
2	a	24.15	26.26	-2.11
3	b	4.21	-2.49	6.70
4	ab	16.20	15.16	1.04
5	c	35.85	36.90	-1.05
6	ac	69.03	71.82	-2.79
7	bc	10.20	8.77	1.43
8	abc	39.38	43.70	-4.38
9	d	14.20	20.48	-6.28
10	ad	45.42	38.13	7.29
11	bd	7.86	9.38	-1.52
12	abd	20.81	27.03	-6.22
13	cd	44.87	48.77	-3.90
14	acd	91.44	83.70	7.74
15	bcd	24.17	20.65	3.52
16	abcd	54.94	55.57	-0.63



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability กับผลตกค้างต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอล



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลตกค้างกับค่าทำนายต่อประสิทธิภาพในการจัดฟันอล

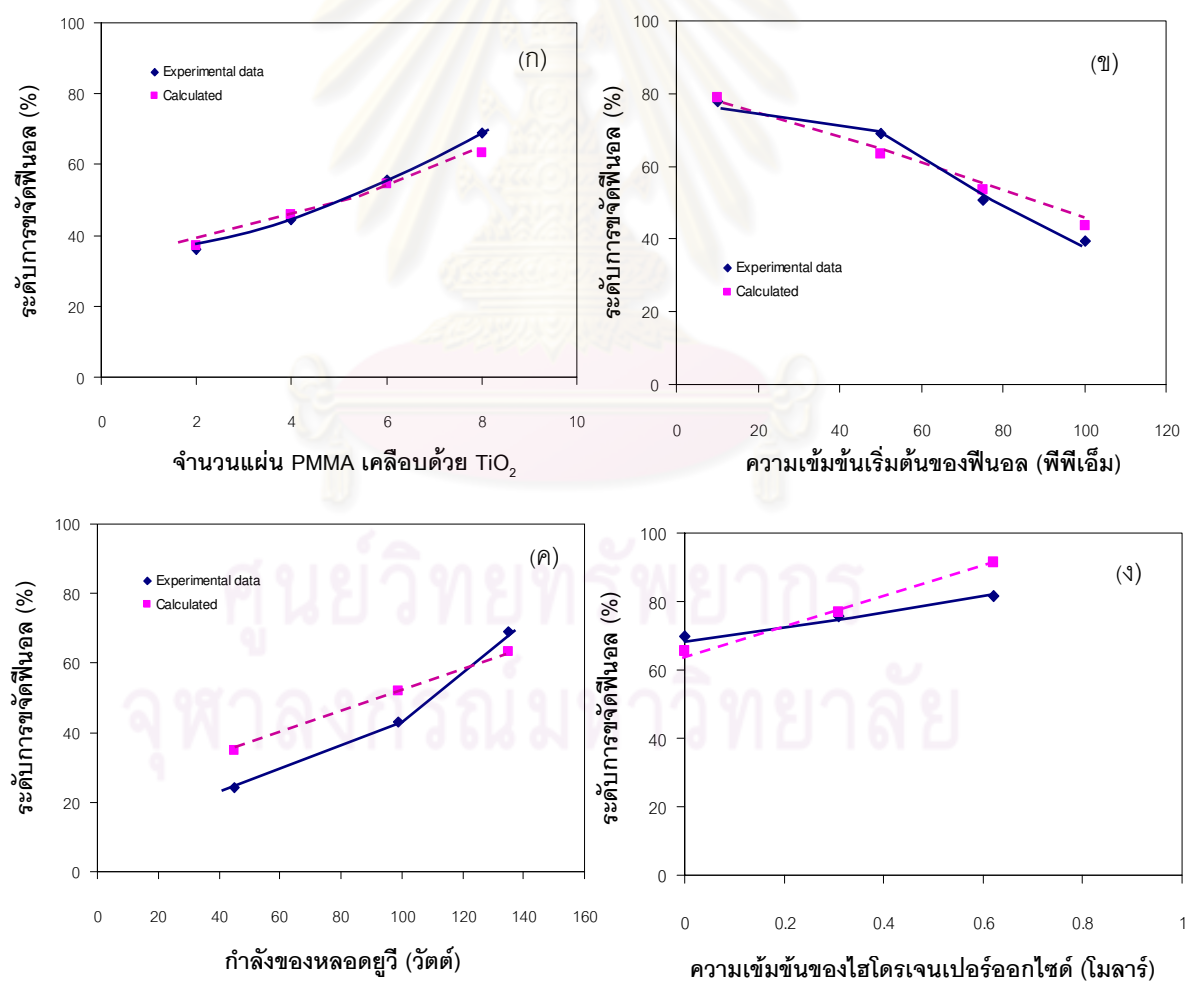
4.5 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อระดับการขจัดของฟिनอล

รูปที่ 4.15ก แสดงผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อระดับการขจัดฟिनอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยา หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟिनอลสูงขึ้น (Noorgahan และคณะ, 2003) นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ยังเป็นการลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุมเพื่อทำปฏิกิริยาดูดซับตัวรองรับบนพื้นผิวได้เร็วขึ้น (Jung และคณะ, 1999, Lathasree และคณะ, 2004, Yung และคณะ, 2004) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.15ข แสดงผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟिनอลต่อระดับการขจัดฟिनอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟिनอลเนื่องจากประสิทธิภาพในการขจัดฟिनอลขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟिनอล เมื่อความเข้มข้นของฟिनอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟिनอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง เพราะฟिनอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งการอ้อมตัวที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา (Arana และคณะ, 2004) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟिनอลซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.15ค แสดงผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่อระดับการขจัดฟिनอล (%) ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้อัตราการสลายฟिनอลเพิ่มขึ้นที่กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น (Chiou และคณะ, 2008) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟिनอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

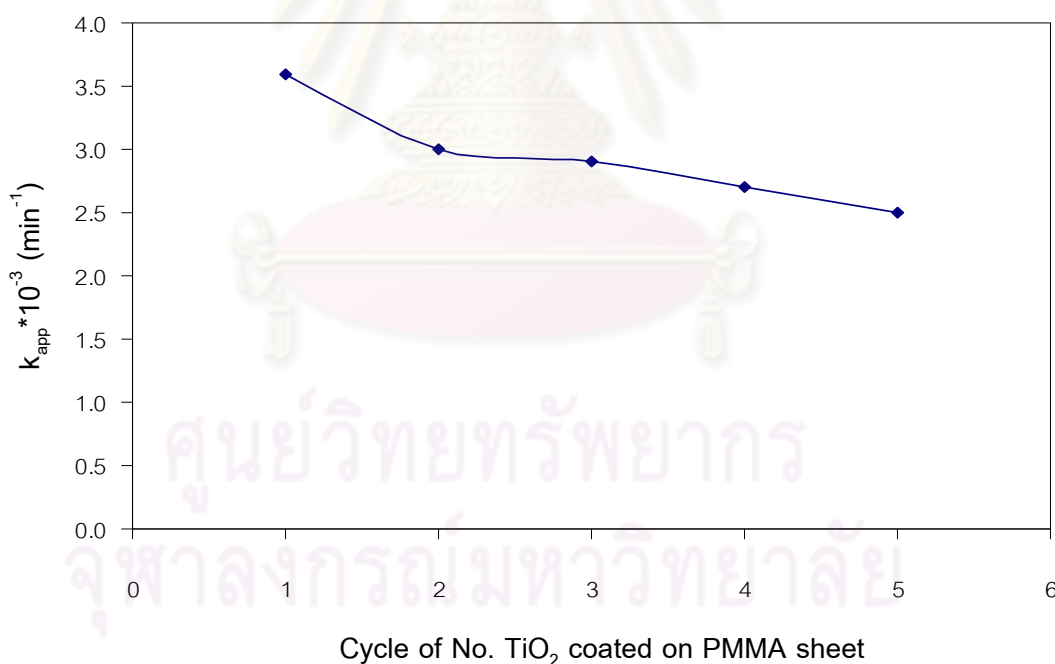
รูปที่ 4.15 แสดงผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อระดับการขจัดฟีนอล (%) ที่ได้จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0 ถึง 0.62 โมลาร์ เนื่องจากการปรับปรุงความว่องไวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นถึง 0.62 โมลาร์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคไฮดรอกซิลที่ใช้ในการออกซิไดซ์และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งเป็นลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม ทำให้ปริมาณอนุภาคไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลได้มากขึ้น (Edwards และคณะ, 1982) ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการถดถอย จะเห็นได้ว่าระดับการขจัดฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.15 ผลจากการคำนวณจากสมการถดถอยกับข้อมูลจากการทดลอง

4.6 การทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบของกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงในการลดปริมาณฟีนอล

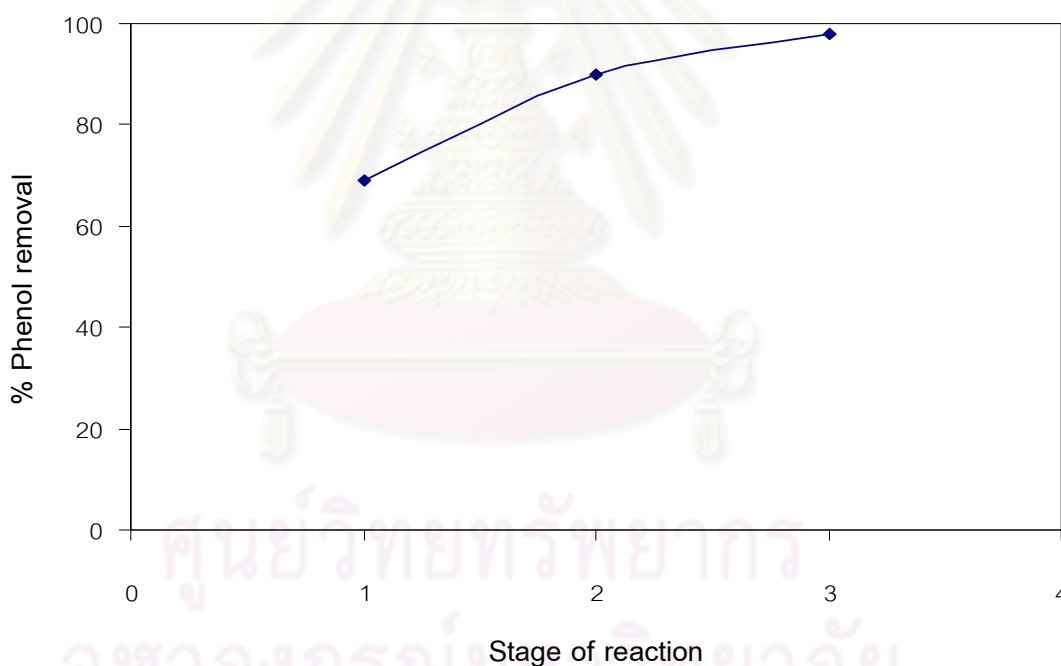
การทดสอบจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการยืนยันความสามารถในการนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ โดยภาวะที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ที่ $30 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตในการขจัดฟีนอลลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้งานหลายครั้งโดยเมื่อผ่านไป 5 รอบ ค่าคงที่ปรากฏลดลงเพียง 1.1×10^{-3} นาที⁻¹ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.16 จำนวนรอบในการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

มีสมบัติทางกายภาพดังนี้ คือ มีความเสถียรสูง มีความสามารถในการละลายต่ำ ทนต่อการกัดกร่อน และเมื่อผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ในปฏิกิริยาใหม่ได้อีก (Hu และคณะ, 2005)

เมื่อนำสารละลายฟีนอลที่ผ่านการออกซิเดชันเชิงแสงในรอบแรกมาเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาอีกครั้ง โดยควบคุมให้ภาวะที่ใช้ในการทดลองเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ทึบรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าในการนำสารละลายฟีนอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในรอบแรกมาทำปฏิกิริยาซ้ำหลายครั้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใหม่ สามารถขจัดฟีนอลได้สูงสุด 98% เมื่อใช้จำนวนรอบในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 3 รอบ แสดงว่าสารละลายที่มีฟีนอลน้อยลงจะมีประสิทธิภาพในการถูกออกซิเดชันได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.17 จำนวนรอบของกระบวนการออกซิเดชันเชิงแสงในการลดปริมาณฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการเคลือบต่อลักษณะและประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนล

การยึดเกาะของไทเทเนียมไดออกไซด์บนพอลิเมทิลเมทาคริเลตขึ้นกับอัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ (ACA/TiO₂) โดยการเพิ่ม ACA/TiO₂ ทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเนื่องจากแอสีทิลอะซีไตนช่วยเพิ่มความมีขี้วและการเกาะติดบนผิวของพอลิเมอร์ ส่วนจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าจำนวนรอบในการเคลือบ 1 และ 3 รอบ ส่งผลให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีความเรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการเคลือบเป็น 5 และ 10 รอบ ส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีรอยแตกและรูพรุนเกิดขึ้นบนผิวของฟิล์ม ทั้งนี้อาจเกิดจากการระเหยของตัวทำละลายและแอสีทิลอะซีไตน

ผลของอัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์และจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนล พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนลเพิ่มขึ้น อัตราส่วนโดยโมลของแอสีทิลอะซีไตนต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 3.0 ให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนล 62.5% ทั้งนี้เนื่องมาจากแอสีทิลอะซีไตนช่วยเพิ่มความมีขี้วของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ไปยังผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้ไทเทเนียมเกาะติดบนผิวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากขึ้น สำหรับผลของจำนวนรอบในการเคลือบสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ ACA/TiO₂ เท่ากับ 3.0 พบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนลเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์บนตัวรองรับมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเคลือบเท่ากับ 5 รอบ มีประสิทธิภาพในการขจัดฟิโนลได้มากที่สุดถึง 68.5%

5.1.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิในช่วง 400-800 องศาเซลเซียส พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนการเผาและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกแบบผลสมระหว่างสัณฐานแบบอนาเทสและรูไทล์ในอัตราส่วนที่แตกต่าง ส่วนระดับการสลายฟีนอลที่ 5 ชั่วโมง พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P-25 ประกอบด้วยสัณฐานแบบอนาเทส/รูไทล์เท่ากับ 70/30 โดยน้ำหนัก เมื่อเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงถึง 700 องศาเซลเซียสทำให้สัณฐานแบบอนาเทสเปลี่ยนไปเป็นรูไทล์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความว่องไวต่ำกว่าแบบอนาเทส โดยระดับการสลายฟีนอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง 23.4% ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

5.1.3 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง พบว่าอัตราการสลายฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นเมทิลเมทาคริเลตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นการเพิ่มจำนวน active sites ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพื้นที่การฉายแสงมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลสูงขึ้น

5.1.4 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่ออัตราการสลายตัวของฟีนอล

ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของฟีนอล พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการสลายฟีนอลสูงสุดในช่วงค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 เนื่องจากค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเท่ากับ 5 ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประจุเป็นบวก ขณะที่ฟีนอลแตกตัวแล้วจะมีประจุเป็นลบ สามารถถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บริเวณใกล้ผิวของ

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของอนุมูลไฮดรอกซิลมากที่สุดส่งผลให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงเกิดได้ดี

5.1.5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอลต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงของฟินอล พบว่าอัตราการสลายฟินอลลดลงเมื่อความเข้มข้นของฟินอลเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการสลายตัวขึ้นอยู่กับอนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและความเป็นไปได้ของอนุมูลไฮดรอกซิลในการทำปฏิกิริยากับฟินอล ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของฟินอลในสารละลายมีค่าสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดฟินอลของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงเพราะฟินอลจะเข้ามาดูดซับที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณมาก ทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลงและแสงไม่สามารถเข้าถึงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.6 ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่ออัตราการสลายตัวของฟินอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการกำจัดฟินอลมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากการเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตช่วยเพิ่มอนุมูลไฮดรอกซิลเหมือนกับการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม จึงทำให้อัตราการสลายฟินอลเพิ่มขึ้นที่กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตมากขึ้น

5.1.7 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟินอลด้วยออกซิเดชันเชิงแสง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จาก 0 ถึง 0.62 โมลาร์ เนื่องจากการปรับปรุงความว่องไวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นถึง 0.62 โมลาร์ ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุมูลไฮดรอกซิลที่

ใช้ในการออกซิไดซ์และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งเป็นลดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม ทำให้ปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลในระบบสูงขึ้น

5.1.8 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟินอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟินอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการป้อนออกซิเจนเข้าไปในระบบเป็นการเพิ่มปริมาณโมเลกุลออกซิเจนซึ่งคาดว่าจะช่วยลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับหลุม ผลสุดท้ายจะเกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ทำให้อัตราการสลายฟินอลเพิ่มขึ้น

5.1.9 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ออัตราการสลายตัวของฟินอล

ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อค่าคงที่ปรากฏของอัตราการสลายตัวของฟินอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง พบว่าค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการสลายฟินอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นของระบบเท่ากับ 0.01 กิโลจูลต่อโมล แสดงว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในช่วง (20-80 องศาเซลเซียส) ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงอาจเกิดมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจนหรือในอีกแง่หนึ่ง คือ เกิดจากการคายซับอย่างรวดเร็วระหว่างตัวรองรับ (substrate) และตัวกลาง (intermediate) จากไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ทำให้มีพื้นที่ว่างในการทำปฏิกิริยามากขึ้นเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงได้ดีขึ้น

5.1.10 การคำนวณทางสถิติโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

ลำดับของปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟินอลโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับมีดังนี้ กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ต > จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ > ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ > ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟินอล ประสิทธิภาพในการขจัดฟินอลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังของหลอดอัลตราไว

โอเล็ด ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แต่เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้นกลับทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอลลดลง

5.1.11 ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.62 โมลาร์ กำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตเท่ากับ 135 วัตต์ อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนเท่ากับ 200 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายฟีนอลได้สูงสุดถึง 7.2×10^{-3} นาที⁻¹ ซึ่งสามารถขจัดฟีนอลได้ 91.4%

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในการกำจัดอนุพันธ์ของฟีนอลิกตัวอื่นที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนมากขึ้น
- 5.2.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการขจัดฟีนอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยมีการขยายส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปรีชา พหลเทพ. (2549). โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. กองจัดการสาร
อันตรายและกากของเสีย. (2542). ฟีนอล (phenol). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ศรีเมือง.

ภาษาอังกฤษ

Addamo, M., et. al. (2008). Photocatalytic thin films of TiO₂ formed by a sol-gel process using titanium tetraisopropoxide as the precursor. Thin Solid Film 516: 3802-3807.

Ahmed, S., Rasul, M.G., Martens, W.N., Brown, R., and Hashib, M.A. (2010). Heterogeneous photocatalytic degradation of phenol in wastewater: A review on current status and developments. Desalination 261: 3-18.

Arana, J., et. al. (2004). Photocatalytic degradation of formaldehyde containing wastewater from veterinarian laboratories. Chemosphere 55: 893-904.

Baker, E.L., et. al. (1978). Phenol poisoning due to contaminated drinking water. Arch Environ Health 33: 89-94.

Barbeni, M. Pramauro, E. Pelizzetti, E., Borgarello, E., and Serpone, N. (1985). Photodegradation of pentachlorophenol catalyzed by semiconductor particles. Chemosphere 14: 195-208.

Carp, O., Huisman, C.L., and Reller, A. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. Progress in Solid State Chemistry 32: 33-177.

Cheng, S., Tsai, S.J., and Lee, Y.F. (1995). Photocatalytic decomposition of phenol over titanium dioxide of various structures. Catalysis Today 26: 87-96.

Chiou, C.-H., Wu, C.-Y., and Juang, R.-S. (2008). Influence of operating parameters on photocatalytic degradation of phenol in UV/TiO₂ process. Journal of Chemical Engineering 139: 322-329.

Chiou, C., and Juang, R. (2007). Photocatalytic degradation of phenol in aqueous solutions by Pr-doped TiO₂ nanoparticles. Journal of Hazardous 149: 1-7.

- Chun, H., Yizhong, W., and Aongxiao, T. (2000). Destruction of phenol aqueous solution by photocatalysis or direct photolysis. Chemosphere 41: 1205-1209.
- Clark, J. (2004). Assorted reactions of phenol [Online]. Available from: <http://www.chemguide.co.uk/organicprops/phenol/other.html>. [2010, February 5]
- Doong, R.A., Chen, C.H., Maithreepala, R.A., and Chang, S.M. (2001). The influence of pH and cadmium sulfide on photocatalytic degradation of 2-chlorophenol in titanium dioxide suspension. Water Research 35: 2873-2880.
- Edwards, J., and Curoi, R. (1982). (R. in : Strukul (Ed.), Catalytic oxidation with H₂O₂ as oxidation. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., and Watanabe, T. (1999). TiO₂ Photocatalysis: Fundamental and Applications. Tokyo, Japan: BKC Inc.
- Fujishima, A., Rao, T.N., and Tryk, D.A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 1: 1-21.
- Fumihide, S., Shotaro, I., and Naoya, K. (2009). Photocatalytic decompositions of gaseous HCHO over thin films of anatase titanium oxide converted from amorphous in a heated air and in an aqueous solution of hydrogen peroxide. Journal of Chemical Engineering 148: 234-241.
- Hermann, J.-M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. Catalysis Today 53: 115-129.
- Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Dhoi, W., and Bahnemann, D.W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. Chemical Reviews 95: 69-96.
- Horikoshi, S., Watanabe, N., Onishi, H., Hidaka, H., and Serpone, N. (2002). Photodecomposition of a nonylphenol polyethoxylate surfactant in a cylindrical photoreactor with TiO₂ immobilized fiberglass cloth. Applied Catalysis B: Environmental 37: 117.
- Hosseini, S.N., Borghei, S.M., Vossoughi, M., and Taghavinia, N. (2007). Immobilization of TiO₂ on perlite granules for photocatalytic degradation of phenol. Applied Catalyst B 74: 53.

- Hu, Y., and Yuan, C. (2005). Low-temperature preparation of photocatalytic TiO₂ thin films from anatase sols. Journal of Crystal Growth 274: 563-568.
- Hu, Y., and Yuan, C. (2006). Low-temperature preparation of photocatalytic TiO₂ thin film on polymer substrates by direct deposition from anatase sol. Journal of Materials Science and Technology 22: 239.
- Ilisz, I., and Dombi, A. (1999). Investigation of the photodecomposition of phenol in near UV irradiated aqueous TiO₂ suspension II: Effect of charge trapping species on product distribution. Applied Catalysis: General 180: 35-45.
- Juan, K.D. (1984). The fundamental and practice for the removal of phenolic compounds in wastewater. Industrial Pollutant Prevention Control 3(3): 88.
- Jung, K.Y., and Park, S.B. (1999). Anatase-phase titania: preparation by embedding silica and photocatalytic activity for the decomposition of trichloroethylene. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 127: 117-122.
- Karches, M., et. al. (2002). Plasma-CVD-coated glass beads as photocatalyst for water decontamination. Catalyst Today 72: 267.
- Kazuya, I., Ren-De, S., Motoyuki, T., Ken, H., and Osamu, Y. (2003). Sol-gel-derived TiO₂/poly(dimethylsiloxane) hybrid films and their photocatalytic activities. Journal of Physics and Chemistry of Solids 64: 507-513.
- Konstantinou, I.K., and Albanis, T.A. (2003). TiO₂-assisted photocatalytic degradation of azo dyes in aqueous solution: kinetic and mechanistic investigations A review. Applied Catalysis B: Environmental 49: 1-14.
- Komann, C., Bahnemann, D.W., and Hoffmann, M.R. (1991). Algicidal and chemical effect of u.v. radiation of water containing humic substances. Environmental Science Technology 25: 494.
- Lathasree, S., Rao, A.N., Sivasankar, B., Sadasivam, V., and Rengaraj, K. (2004). Heterogeneous photocatalytic mineralization of phenols in aqueous solutions. Journal of Molecular Catalysis A: Chemistry 223: 101-105.

- Lee, J.C., Kim, M.S., and Kim, B.W. (2002). Removal of paracetamol dissolved in a photoreactor with TiO₂ immobilized on the glass-tubes of UV lamps. Water Research 36: 1776.
- Litter, M.I. (1999). Heterogeneous photocatalysis transition metal ions in photocatalytic systems. Applied Catalysis B: Environmental 23: 89-114.
- Liu, S.Y., Yang, M.J., and Dan, Y. (2006). Study of performance of photocatalytic degradation organic pollutants of PMMA/TiO₂ composite particles. Gaofenzi Cailiao Kexue Yu Gongcheng/Polymeric Materials Science and Engineering 22: 93.
- Liu, S.X., Qu, Z.P., Han, X.W., and Sun, C.L. (2004). A mechanism for enhanced photocatalytic activity of silver-loaded titanium dioxide. Catalysis Today 95: 877-884.
- Mugglie, D.S., and Ding, L. (2001). Photocatalytic performance of sulfated TiO₂ and Degussa P-25 TiO₂ during oxidation of organics. Applied Catalysis B: Environmental, 32, 181-188.
- Matthew, R.W. (1987). Photooxidation of organic impurities in water using thin films of titanium dioxide. Journal of Physical Chemistry 91: 3328-3333.
- Montgomery, D.C. (2001). Design and Analysis of Experiments. 5th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Moza, D.N., Fytianos, K., Samanidou, V., and Korte, F. (1988). Photodecomposition of chlorophenols in aqueous medium in presence of hydrogen peroxide. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 41: 678.
- Murov, S.L., Carmichael, I., and Huy, G.L. (1993). Handbook of photochemistry. New York: Marcel Dekker.
- Naeem, K., and Ouyang, F. (2009). Preparation of Fe³⁺-doped TiO₂ nanoparticles and its photocatalytic activity under UV light. Physical B: Condensed Matter 405: 221-226.
- Noorjahan, M., Naeem, K., and Ouyang, F. (2009). Preparation of Fe³⁺-doped TiO₂ nanoparticles and its photocatalytic activity under UV light. Physical B: Condensed Matter 405: 221-226.

- Ollis, D.F., Pelizzetti, E., and Serpone, N. (1991). Destruction of water contaminants. Environmental Science Technology 25: 1522.
- Pratap, M., Durga Kumari, V., Lavedrine, B., Boule, D., and Subrahman yam, M. (2003). Photocatalytic degradation of H-acid over a noval TiO₂ thin film fixed bed reactor and in aqueous suspension. Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry 156:179-187.
- Qamar, M., Saquib, M., and Muneer, M. (2005). Photocatalytic degradation of two selected dye derivation chromotrope 2B and amida 10 B in aqueous suspension of titanium dioxide. Dyes and pigments 65: 1-9.
- Rajeshwar, K. (1995). Photoelectrochemistry and the environment. Journal of Applied Electrochemistry 25: 1067-1082.
- Rengaraj, S., and Li, X.Z. (2006). Enhanced photocatalytic activity of TiO₂ by doping with Ag for degradation of 2,4,6-trichlorophenol in aqueous suspension. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 243: 60-67.
- Reutergardh, L.B., and langphasuk, M. (1997). Semiconductor photocatalysis : An environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process. Chemosphere 35(3): 585-596.
- Reddy, S.S., and Kotaiah, B. (2006). The removal of composite reactive dye from dyeing unit effluent using sewage sludge derived activated carbon. Journal of Energy Environmental Science 30: 367-373.
- Robertson, P.K.J. (1996). Semiconductor photocatalysis: an environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process. Journal of Cleaner Production 4(3-4): 203-212.
- Smith, J.V. (1960). X-ray Powder Data File. American Society for Testing Materials.
- Sauer, T., Cesconetoneto, G., Jose, H.J., and Moreira, R.F.P.M. (2002). Kinetic of photocatalytic degradation of reaction dyes in a TiO₂ slurry reactor. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 149:147-154.

- Shibaeva, I.V., Metelitsa, D.I., and Denison, E.T. (1969). The oxidation of phenol with molecular oxygen in aqueous solution II. The role of hydrogen in the oxidation of phenol with oxygen. Kinetic Catalyst 10: 1022.
- Sobczyn`shi, A., Duczmal, L., and Zmudzim`ski, W. (2002). Phenol destruction by photoctalysis on TiO₂: an attempt to solve the reaction mechanism. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 13: 225-230.
- Sun, J., Qiao, L., Sun, S., and Wang, G. (2007). Photocatalytic degradation of Orange G on nitrogen-doped TiO₂ catalysts under visible light and sunlight irradiation. Journal of Hazardous Materials, In Press.
- Swarnalatha, B, and Anjaneyulu, Y. (2004). Studied on the heterogeneous photocatalytic oxidation of 2,6-dinitrophenol in aqueous TiO₂ suspension. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 223: 161-165.
- Wang, C.C., and Ying J. (1999). Sol-gel synthesis and hydrothermal processing of anatase and rutile titania nanocrystals. Chemistry of Materials 11: 3113-3120.
- Wei, T.Y. and Wan, C.C. (1991). Heterogeneous photocatalytic oxidation of phenol with titanium dioxide powders. Industrial Chemistry Research 30(6): 1294-1300.
- Xie, Y., Yuan, C. (2003). Photocatalytic activity and recycle application of titanium dioxide sol for X-3B photodegradation. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 206: 419-428.
- Yang, J.-H., Han, Y.-S., and Choy, J.-H. (2006). TiO₂ thin-films on polymer substrates and their photocatalytic activity. Thin Solid Films 495: 266-271.
- Yang, Y., Guo, Y., Hua, C., Wang, Y., and Wang, E. (2004). Preparation of surface modifications of mesoporous titania with monosubstituted Keggin units and their catalytic performance for organochlorine pesticide and dyes under UV irradiation. Applied Catalysis A: General 273: 201-210.
- Yu, J., and Zhao, X. (2000). Effect of substrates on the photocatalytic activity of nanometer TiO₂ thin films. Materials Research Bulletin 35: 1293-1301.



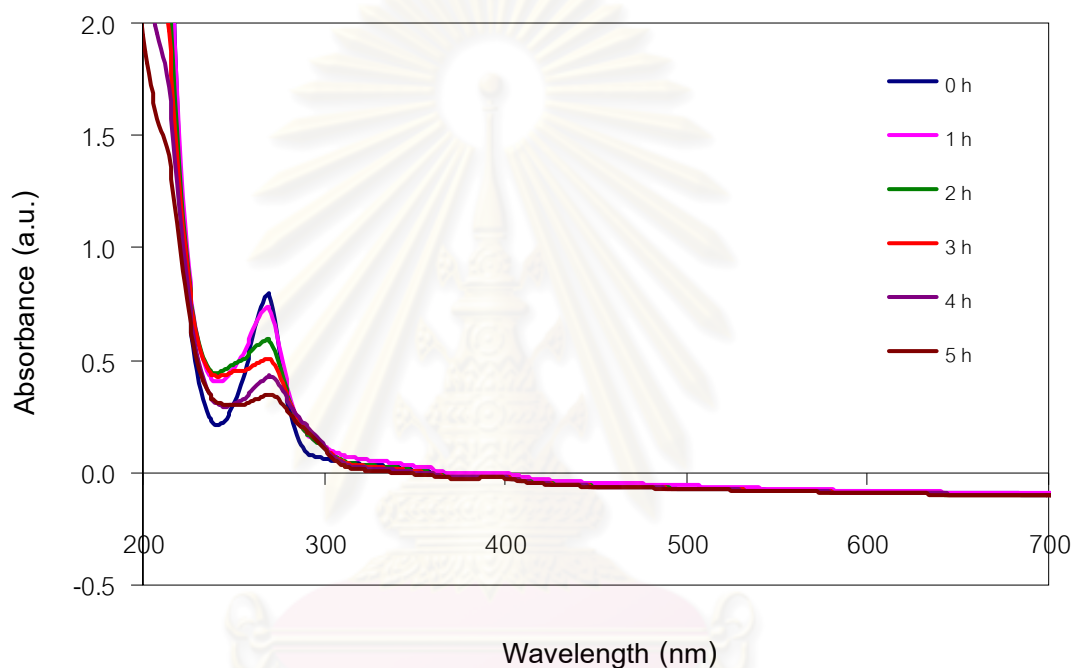
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต

ตัวอย่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ได้จากเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ของสารละลายฟีนอล ณ เวลาใด ๆ



รูปที่ ก1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตของสารละลายฟีนอล ณ เวลาใด ๆ (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม และปริมาตรสารละลายฟีนอล = 500 มิลลิลิตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

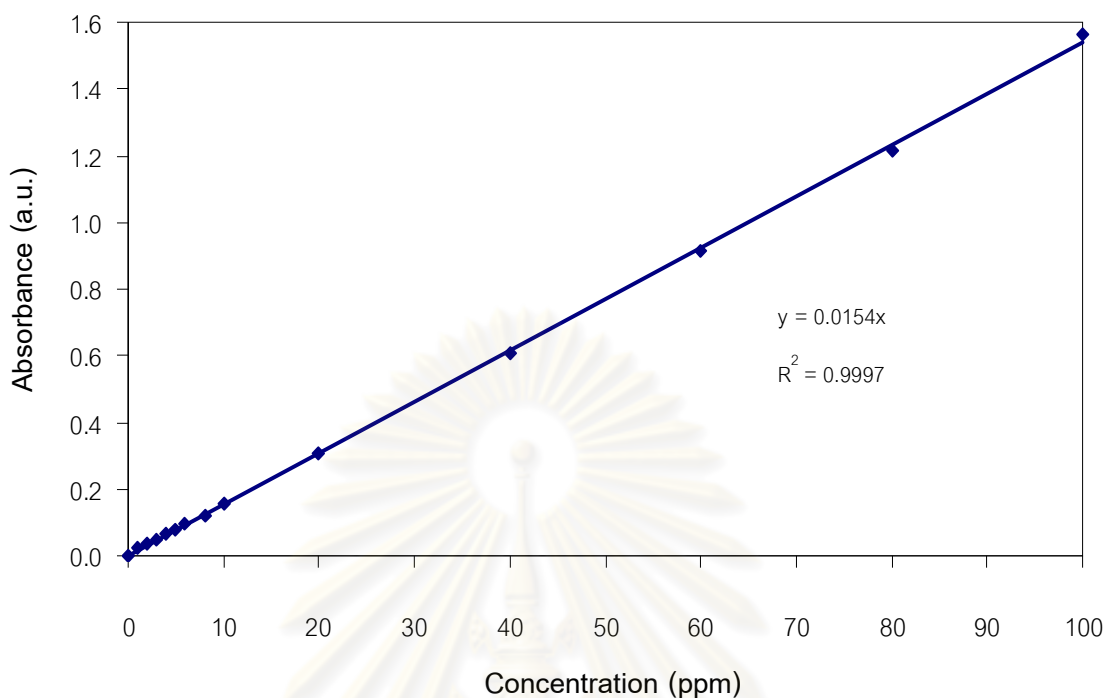
การคำนวณ

ข1. Calibration curve ของสารละลายฟีนอล

Calibration curve ของสารละลายฟีนอล โดยทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นคงที่ที่ 269 นาโนเมตร

ตารางที่ ข1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.0006
1	0.0227
2	0.0335
3	0.0481
4	0.0632
5	0.0798
6	0.0961
8	0.1213
10	0.1552
20	0.3061
40	0.6083
60	0.9152
80	1.2158
100	1.5656



รูปที่ ข1 Calibration curve ของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข2. ปริมาณฟีนอลที่ถูกขจัด

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพอลิเมทิลเมทาคริเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการขจัดฟีนอล

ภาวะการทดลอง		
อุณหภูมิในการทดลองคงที่	30	องศาเซลเซียส
ปริมาณของสารละลายฟีนอล	500	มิลลิลิตร
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้	8	แผ่น
ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.62	โมลาร์

จากการทำ Calibration curve ของสารละลายฟีนอล โดยทดสอบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอลที่ความเข้มข้น 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นคงที่ที่ 269 นาโนเมตร

จะได้สมการดังนี้

$$Y = 0.0154X \quad (ข1)$$

เมื่อ Y แทนค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายฟีนอล
X แทนค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล

จากตารางที่ ๓ ในภาคผนวก ง

ตารางที่ ๓ ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (โมลาร์)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
0.62	0	0.9308	60.44	0
	1	0.6997	45.43	24.82
	2	0.4621	30.00	50.35
	3	0.2903	18.85	68.81
	4	0.1854	12.03	80.08
	5	0.0801	5.20	91.39

1.1 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเริ่มต้น

จากการแทนค่าการดูดกลืนแสงในสมการ (ข1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล} &= \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสง}}{0.0154} \\ &= \frac{0.9308}{0.0154} \\ &= 60.44 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

1.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลหลังจากทำการทดลองขจัดเชิงแสง 5 ชั่วโมง
จากการแทนค่าการดูดกลืนแสงในสมการ (ข1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของฟีนอล} &= \frac{0.0801}{0.0154} \\ &= 5.20 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

1.3 ปริมาณสารละลายฟีนอลที่ถูกขจัดภายหลังจากทำการทดลองขจัดเชิงแสง 5 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ฟีนอลที่ถูกขจัด} &= \frac{\text{ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นฟีนอลที่เหลือ}}{\text{ความเข้มข้นฟีนอลเริ่มต้น}} \times 100 \\ \text{ฟีนอลที่ถูกขจัด} &= \frac{60.44 - 5.20}{60.44} \times 100 \\ &= 91.38\% \end{aligned}$$

ข3. ค่าคงที่ปรากฏของอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล

จากสมการจลนพลศาสตร์ของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood) แสดงดัง
สมการ ข2

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{app}t \quad (\text{ข2})$$

เมื่อ k_{app} คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาปรากฏของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม
(นาที่⁻¹)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)

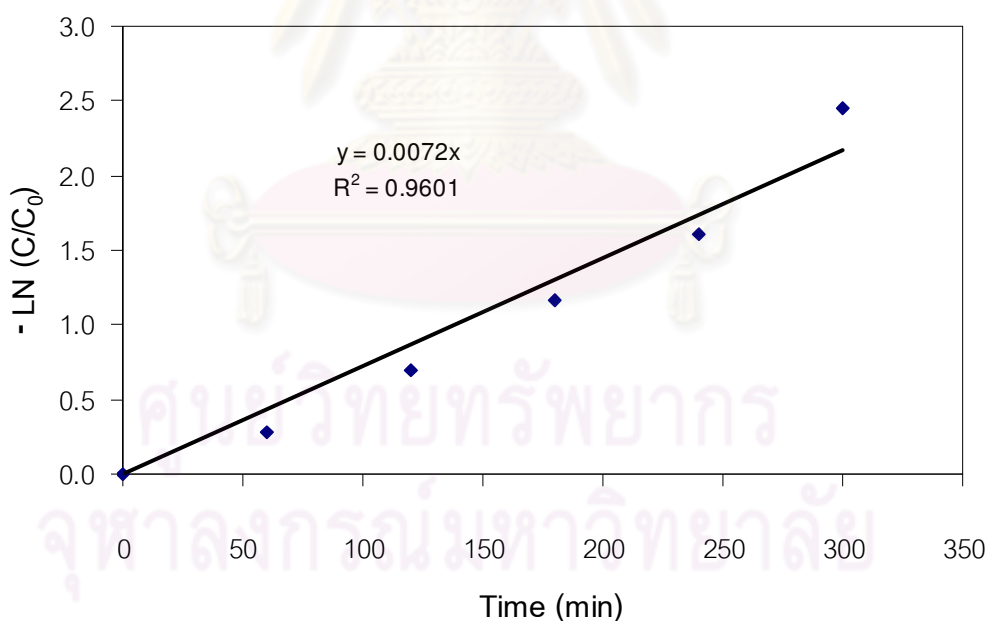
C_t คือ ความเข้มข้นของฟีนอล ณ เวลานั้น (พีพีเอ็ม)

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและ $-\ln(C_t/C_0)$ ความชันของ
กราฟที่ได้ คือ ค่า k_{app} แสดงดังรูปที่ ข2 พบว่าค่าคงที่ปรากฏเท่ากับ 7.2×10^{-3} นาที่⁻¹

จากตารางที่ ๖5 ในภาคผนวก ๖

ตารางที่ ๖5 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	C/C_0	$-\ln(C/C_0)$
0	0.9308	60.44	1	0
1	0.6997	45.43	0.75	0.28
2	0.4621	30.00	0.49	0.70
3	0.2903	18.85	0.31	1.16
4	0.1854	12.03	0.20	1.61
5	0.0801	5.20	0.08	2.45



รูปที่ ๖2 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสงในการขจัดฟีนอล (จำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ = 8 แผ่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล = 50 พีพีเอ็ม ค่า pH เริ่มต้น = 5 กำลังของหลอดยูวี = 135 วัตต์ที่ 30 ± 1 องศาเซลเซียส)

ภาคผนวก ค

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

ตารางที่ ค1 ค่าคงที่คอนแทรสต์ ค่าประมาณปัจจัยและผลรวมกำลังสองของการจัดพินอล (%) จากการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับจำนวน 4 ปัจจัย

การทดลอง	เครื่องหมาย	ปัจจัยแฟกทอเรียล															การจัดพินอล (%) ที่ 5 ชม.
		A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	
1	(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	9.71
2	a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	24.15
3	b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	4.21
4	ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	16.2
5	c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	35.85
6	ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	69.03
7	bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	10.2
8	abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	39.38
9	d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	14.2
10	ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	45.42
11	bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	7.86
12	abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	20.81
13	cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	44.87
14	acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	91.44
15	bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	24.17
16	abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	54.94
คอนแทรสต์		210.30	-156.90	-40.52	227.32	69.10	-68.10	0.92	94.98	32.72	-19.40	-27.62	26.94	-2.76	15.60	4.02	$\bar{X} = 32.03$
ค่าประมาณปัจจัย		26.29	-19.61	-5.07	28.42	8.64	-8.51	0.12	11.87	4.09	-2.43	-3.45	3.37	-0.35	1.95	0.50	
ผลรวมกำลังสอง		2764.13	1538.60	102.62	3229.65	298.43	289.85	0.05	563.83	66.91	23.52	47.68	45.36	0.48	15.21	1.01	

Σ ผลรวมกำลังสอง = 8987.32

ภาคผนวก ง

ประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล

ตารางที่ ง1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา TiO ₂ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การกำจัดฟีนอล (%)
ไม่เผา	0	0.8547	55.50	0
	1	0.7089	46.03	17.05
	2	0.6061	39.35	29.08
	3	0.4832	31.37	43.46
	4	0.4071	26.08	53.60
	5	0.2690	17.46	68.52
400	0	0.8217	53.35	0
	1	0.7145	46.39	13.04
	2	0.6076	39.45	26.05
	3	0.5349	34.73	34.90
	4	0.4582	29.75	44.23
	5	0.4052	26.31	50.68
500	0	0.9468	53.29	0
	1	0.8152	45.72	14.21
	2	0.7145	38.33	28.07
	3	0.6020	31.86	40.21
	4	0.4870	25.70	51.77
	5	0.3947	19.99	62.48

ตารางที่ ง1 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา TiO ₂ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัดฟีนอล (%)
600	0	0.9340	60.64	0
	1	0.8532	55.40	8.65
	2	0.8126	52.76	12.99
	3	0.7946	51.59	14.92
	4	0.6852	44.49	26.63
	5	0.5960	38.70	36.18
700	0	0.8625	56.00	0
	1	0.8005	51.98	7.18
	2	0.7819	50.77	9.34
	3	0.7446	48.35	13.66
	4	0.7029	45.64	18.50
	5	0.6611	42.92	23.35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

จำนวนแผ่น PMMA เคลือบ TiO ₂ (แผ่น)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัดฟีนอล (%)
ยู่ตัวอย่างเดียว	0	0.8083	52.48	0
	1	0.8036	52.18	0.58
	2	0.7948	51.61	1.67
	3	0.7919	51.42	2.02
	4	0.7783	50.53	3.71
	5	0.7658	49.72	5.25
2	0	0.8386	54.45	0
	1	0.7842	50.92	6.48
	2	0.7125	46.26	15.03
	3	0.6542	42.48	21.98
	4	0.5864	38.07	30.07
	5	0.5379	34.92	35.85
4	0	0.8453	54.88	0
	1	0.7621	49.48	9.84
	2	0.6829	44.34	19.21
	3	0.6001	38.96	29.00
	4	0.5449	35.38	35.53
	5	0.4689	30.44	44.52

ตารางที่ ง2 (ต่อ) ผลของจำนวนแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

จำนวนแผ่น PMMA เคลือบ TiO ₂ (แผ่น)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
6	0	0.8491	55.13	0
	1	0.7221	46.88	14.95
	2	0.6294	40.87	25.87
	3	0.5351	34.74	36.98
	4	0.4627	30.04	45.50
	5	0.3765	24.44	55.65
8	0	0.8208	53.29	0
	1	0.7041	45.72	19.99
	2	0.5904	38.33	28.07
	3	0.4907	31.86	40.21
	4	0.3958	25.70	51.77
	5	0.3079	19.99	62.48

ตารางที่ 3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัดฟีนอล (%)
10	0	0.1552	10.07	0
	1	0.1027	6.66	33.82
	2	0.0949	6.16	38.85
	3	0.0790	5.12	49.09
	4	0.0589	3.82	62.04
	5	0.0347	2.25	77.64
50	0	0.8970	58.24	0
	1	0.7430	48.24	19.16
	2	0.6046	39.25	32.59
	3	0.5163	33.52	42.44
	4	0.3911	25.39	56.39
	5	0.2778	18.03	69.03
75	0	1.2319	79.99	0
	1	1.1189	72.65	9.17
	2	0.9542	61.96	22.54
	3	0.8826	57.31	28.35
	4	0.7612	49.42	38.20
	5	0.6083	39.50	50.62

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
 ปรุฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้น เริ่มต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
100	0	1.5363	99.75	0
	1	1.4340	93.11	6.65
	2	1.3107	85.11	14.68
	3	1.1759	76.35	23.45
	4	1.0524	68.33	31.49
	5	0.9312	60.46	39.38

ตารางที่ 4 ผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
 ปรุฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ค่าความเป็น กรด-เบส	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
3	0	0.9053	58.78	0
	1	0.8228	53.42	9.11
	2	0.7108	46.15	21.48
	3	0.5690	36.94	37.14
	4	0.4715	30.61	47.91
	5	0.4135	26.85	54.32

ตารางที่ 4(ต่อ) ผลของค่าความเป็นกรด-เบสต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยา
ออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้น เริ่มต้นของฟีนอล (พีพีเอ็ม)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
5	0	0.8208	53.29	0
	1	0.7041	45.72	18.34
	2	0.5904	38.33	28.07
	3	0.4907	31.86	40.21
	4	0.3958	25.70	51.77
	5	0.2825	18.34	65.58
7	0	0.8988	58.36	0
	1	0.7814	50.74	13.06
	2	0.6574	42.68	26.85
	3	0.5503	35.73	38.77
	4	0.4543	29.50	49.45
	5	0.3710	24.09	58.72
9	0	0.8887	57.70	0
	1	0.8280	53.76	6.83
	2	0.7236	46.98	18.57
	3	0.6498	42.19	26.88
	4	0.5746	37.31	35.34
	5	0.4975	32.30	44.02

ตารางที่ 5 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล
ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้น ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (โมลาร์)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การกำจัด ฟีนอล (%)
0.31	0	0.9323	60.53	0
	1	0.7636	49.58	18.09
	2	0.5598	36.35	39.95
	3	0.4715	30.61	49.42
	4	0.3185	20.68	65.83
	5	0.2162	14.03	76.81
0.62	0	0.9308	60.44	0
	1	0.6997	45.43	24.82
	2	0.4621	30.00	50.35
	3	0.2903	18.85	68.81
	4	0.1854	12.03	80.08
	5	0.0801	5.20	91.39
1.65	0	1.0430	67.72	0
	1	0.8072	52.41	22.60
	2	0.6364	41.32	38.98
	3	0.4150	26.94	60.21
	4	0.2389	15.51	77.09
	5	0.0963	6.25	90.76

ตารางที่ 5 (ต่อ) ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอล ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โมลาร์)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัดฟีนอล (%)
3.13	0	1.2878	83.62	0
	1	1.0868	70.57	15.60
	2	0.8487	55.11	34.09
	3	0.6389	41.48	50.38
	4	0.4870	31.62	62.18
	5	0.2560	16.62	80.12
4.95	0	1.4750	95.77	0
	1	1.3116	85.16	11.07
	2	1.0771	69.94	26.97
	3	0.8235	53.47	44.16
	4	0.5854	38.10	60.31
	5	0.4462	28.97	69.74
6.26	0	1.6184	105.09	0
	1	1.4459	93.88	10.65
	2	1.2410	80.58	23.31
	3	0.9561	62.08	40.92
	4	0.7878	51.15	51.32
	5	0.6104	39.63	62.28

ตารางที่ ๖ ผลของกำลังของหลอดอัลตราไวโอเล็ตต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

กำลังของหลอดยูวี (วัตต์)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
45	0	0.8517	55.30	0
	1	0.8149	52.91	4.32
	2	0.7674	49.83	9.89
	3	0.7353	47.74	13.66
	4	0.6859	44.53	19.46
	5	0.6460	41.94	24.15
99	0	0.7009	45.51	0
	1	0.6106	40.03	12.02
	2	0.5954	38.51	15.36
	3	0.5354	34.76	23.61
	4	0.4873	31.64	30.47
	5	0.4001	25.98	42.91
135	0	0.8208	53.29	0
	1	0.7041	45.72	14.21
	2	0.5904	38.33	28.07
	3	0.4907	31.86	40.21
	4	0.3958	25.70	51.77
	5	0.2825	18.34	65.58

ตารางที่ 7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ออกซิเจน (มล./นาที)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
0	0	0.8768	56.93	0
	1	0.7991	51.88	8.86
	2	0.7145	46.39	18.51
	3	0.6716	43.61	23.40
	4	0.6358	41.28	27.48
	5	0.5778	37.51	34.10
200	0	0.8208	53.29	0
	1	0.7041	45.72	14.21
	2	0.5904	38.33	28.07
	3	0.4907	31.86	40.21
	4	0.3958	25.70	51.77
	5	0.2825	18.34	65.58
400	0	0.9534	61.90	0
	1	0.8049	52.26	15.57
	2	0.6741	43.77	29.29
	3	0.5462	35.46	42.71
	4	0.4584	29.76	51.91
	5	0.3160	20.51	66.85

ตารางที่ ๗ (ต่อ) ผลของอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจนต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

ออกซิเจน (มล./นาที)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
800	0	0.8533	55.40	0
	1	0.7210	46.81	15.50
	2	0.6263	40.66	26.60
	3	0.5184	33.66	39.24
	4	0.4154	26.97	51.31
	5	0.2949	19.14	65.44

ตารางที่ ๘ ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยา
ออกซิเดชันเชิงแสง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
30	0	0.8970	58.24	0
	1	0.7430	48.24	17.16
	2	0.6046	39.25	32.59
	3	0.5163	33.52	42.44
	4	0.3911	25.39	56.39
	5	0.2778	18.03	69.03
40	0	0.8768	56.93	0
	1	0.7091	46.04	19.12
	2	0.6145	39.90	29.91
	3	0.4716	30.62	46.21
	4	0.3358	21.80	61.70
	5	0.2778	18.03	68.31

ตารางที่ ๖8 (ต่อ) ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วย
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
50	0	0.8517	55.30	0
	1	0.6408	41.61	24.76
	2	0.4826	31.33	43.33
	3	0.3763	24.43	55.81
	4	0.2953	19.17	65.32
	5	0.1578	10.24	81.47
60	0	0.9174	59.57	0
	1	0.6687	43.42	27.10
	2	0.5047	32.77	44.98
	3	0.3763	24.43	58.98
	4	0.3074	19.96	61.49
	5	0.1649	10.70	82.02
70	0	0.9174	59.57	0
	1	0.6408	41.61	30.15
	2	0.4826	31.33	47.39
	3	0.3763	24.43	58.98
	4	0.2953	19.17	67.81
	5	0.1498	9.72	83.67

ตารางที่ ๙ ผลของจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

จำนวนรอบ	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
1	0	0.8970	58.24	0
	1	0.7430	48.24	17.16
	2	0.6046	39.25	32.59
	3	0.5663	33.52	42.44
	4	0.3911	25.39	56.39
	5	0.2778	18.03	69.03
2	0	0.8118	52.17	0
	1	0.7016	45.55	13.57
	2	0.6019	39.08	25.85
	3	0.5019	32.76	38.17
	4	0.3968	25.76	51.12
	5	0.2979	19.34	63.30
3	0	0.8176	53.09	0
	1	0.7082	45.98	13.38
	2	0.5997	38.94	26.65
	3	0.5287	34.33	35.33
	4	0.4111	26.69	49.71
	5	0.3134	20.35	63.66

ตารางที่ 9(ต่อ) ผลของจำนวนรอบการใช้งานของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการขจัดฟีนอลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเชิงแสง

จำนวนรอบ	เวลา (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ความเข้มข้นของฟีนอล (มิลลิกรัม/ลิตร)	การขจัด ฟีนอล (%)
4	0	0.9063	58.85	0
	1	0.8203	53.26	9.48
	2	0.6458	41.93	28.74
	3	0.5869	38.11	35.24
	4	0.4759	30.90	47.48
	5	0.3879	25.18	57.19
5	0	0.9041	58.70	0
	1	0.8105	52.62	10.35
	2	0.6659	43.24	26.34
	3	0.6063	39.37	32.93
	4	0.4854	31.51	46.31
	5	0.4079	26.48	54.88

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐนิษฐา เลื่อนลอย เกิดวันที่ 7 เมษายน 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย