



วิทยานิพนธ์

การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

REMOVAL OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS BY
PHOTOOXIDATION

นายธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุพห์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

Removal of Volatile Organic Compounds by Photooxidation

นามผู้วิจัย นายธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์มงคล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์นันทิยา หาญสุกัลลักษณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr. Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉกหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

Removal of Volatile Organic Compounds by Photooxidation

โดย

นายธรรมศักดิ์ ไรจน์วิรุฬห์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2349-6

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ 2549: การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ, Ph.D. 115 หน้า
ISBN 974-16-2349-6

ไอของสารอินทรีย์ระเหยเป็นสาเหตุหลักของมลภาวะภายในอาคาร ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพของผู้ที่สัมผัสในระยะยาว งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 2 ชนิด ได้แก่ โทลูอินและอะซิโตนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ระเหยที่พบได้ทั่วไป โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาทำในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นระบบปิดขนาด 0.61 ลิตร เพื่อศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับและปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการออกซิเดชัน ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงบนแผ่นกระจกขนาด 25 ตารางเซนติเมตร (5x5) ใน 3 ลักษณะ คือ การจุ่มกระจกในสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ 3.3 เปอร์เซ็นต์ 1 และ 2 ด้าน และการเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก 2 ด้าน มีการทดลองใช้ค่าความเข้มแสงแตกต่างกัน 3 ค่า คือ 165.7, 193.3 และ 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิ มีค่าเท่ากับ 46 และ 56 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองในสภาวะที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นคงที่เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดไอของโทลูอิน คือ ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส

ในการศึกษานี้ใช้สมการในรูปแบบของ Langmuir-Hinshelwood ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซับและปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน พบว่าโทลูอินจะมีอัตราการดูดซับและอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันน้อยกว่าอะซิโตน โดยมีอัตราเกิดปฏิกิริยาดูดซับสูงสุด($r_{m,D}$) ของโทลูอินและอะซิโตนมีค่าเท่ากับ 8.897×10^{-5} และ 2.521×10^{-3} โมล / ลูกบาศก์เมตร-นาที่ ตามลำดับ และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันสูงสุด ($r_{m,L}$) ของโทลูอินและอะซิโตนมีค่าเท่ากับ 1.166×10^{-4} และ 3.328×10^{-3} โมล / ลูกบาศก์เมตร-นาที่ ตามลำดับ

Thammasak Rojviroon 2006: Removal of Volatile Organic Compounds by Photooxidation. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Mr. Sanya Siriwithayapakorn, Ph.D. 115 pages. ISBN 974-16-2349-6

Vapor of volatile organic compounds (VOC) is a major cause of indoor air pollution. Adverse health effects could result from long-term exposure to VOC vapor. This work presents kinetics of vapor removal of toluene and acetone, the commonly found VOC, by photooxidation on TiO_2 catalysts.

Photooxidation on TiO_2 catalysts is a two-step reaction sequence of adsorption and oxidation. To study the reaction kinetics of both adsorption and photooxidation, the experiments were carried out in a 0.61-liter air-tight batch reactor. The TiO_2 powder was fixed on to a 25-square centimeter (5x5) glass plate in 3 different ways, i.e. dip-coat in a 3.3% TiO_2 solution onto either single or both side and powder-coat with TiO_2 powder onto both side. Conditions in each experiment were selected combinations of three different intensities of light, i.e. 165.7, 193.3 and 1230.0 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$, and two different temperatures, i.e 46 and 56 °C. All experiments were controlled at initial relative humidity of 45%. The results indicated that the optimum condition for toluene vapor removal was the combination of 193.3 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ light intensity at 46 °C along with

The kinetics of both adsorption and photooxidation was described by Langmuir-Hinshelwood type of reaction. The results indicated that the adsorption and photooxidation rates of toluene were lower than those of acetone. The highest adsorption rates ($r_{m,D}$) of toluene and acetone were 8.897×10^{-5} and $2.521 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$ respectively. Likewise, the highest photooxidation rates ($r_{m,L}$) of toluene and acetone were 1.166×10^{-4} and $3.328 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{min}^{-1}$ respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. สัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
อ. ดร. มณฑล ฐานุตตมวงศ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก อ. ดร. นันทิยา หาญศุภลักษณ์ กรรมการ
ที่ปรึกษาวิชาการ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการตรวจข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนการให้กำลังใจใน
การทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอกราบขอบพระคุณ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณหน่วยสร้างเสริมศักยภาพทางนาโนศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ค่าใช้จ่าย
ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณกมล สิริชัน และบริษัท เบสเทรค พรินซ์ชั่น จำกัด ที่ให้ความ
อนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและพี่น้อง รวมถึงอาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำ
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมทั้งเพื่อนและน้องทุกๆ คน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ
ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์

เมษายน 2548

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)	(15)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตการศึกษา	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	18
อุปกรณ์	18
สารเคมี	22
วิธีการ	23
สถานที่ทำการวิจัยและระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย	29
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	29
แหล่งทุนสนับสนุน	29
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	70
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหย	4
2	คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย	5
3	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์	6
4	แผนการทดลอง	28
5	ค่าตัวแปรที่ทำการทดลองและช่วงค่าแปรผัน	28
6	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาคูคิตตีฟของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ	39
7	ค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของสารละลายโทลูอิน	45
8	ค่าคงที่ปฏิกิริยาคูคิตตีฟในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน	54
9	ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิตตีฟของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (σ) ที่ทำการศึกษา ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน	58
10	เปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในการศึกษาวิจัย	60
ตารางผนวกที่		
ก1	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มีดโคยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก2	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	72
ก3	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	73
ก4	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	73
ก5	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	74
ก6	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	74
ก7	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	75
ก8	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก9 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	76
ก10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	76
ก11 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	77
ก12 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	77
ก13 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	78
ก14 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	78
ก15 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก16	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	79
ก17	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	80
ก18	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	80
ก19	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	81
ก20	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.710 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	81
ก21	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	82
ก22	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก23 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	83
ก24 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	83
ก25 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	84
ก26 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	84
ก27 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	85
ก28 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	85
ก29 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก30 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	86
ก31 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	87
ก32 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	87
ก33 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	88
ก34 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	88
ก35 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก36	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	89
ก37	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.000 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	90
ก38	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.000 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	90
ก39	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.000 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	91
ก40	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.000 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส	91
ก41	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 500 ppmv ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก42 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,000 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	92
ก43 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,500 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	93
ก44 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,800 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	93
ก45 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 500 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	94
ก46 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,000 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	94
ก47 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,500 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	95
ก48 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,800 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.313 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	95
ก49 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน ในที่มีด โดยใช้กระจกเปล่า	96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก50	ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน ในที่มีด โดยใช้กระจกเปล่า	96
ค1	ปริมาณโทลูอินกับปริมาตรสารประกอบอินทรีย์ระเหยในสถานะก๊าซที่ดึงมา	103
ค2	ปริมาณโทลูอินกับความเข้มข้นและปริมาตรที่ดึงมาของสารประกอบอินทรีย์ ระเหยในสถานะก๊าซในหลอดทดลอง	104
ค3	ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน ต่างๆ	107

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การแผ่สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	9
3 ถึงปฏิบัติการแบบเบทซ์สำหรับการทดลอง	18
4 ถึงปฏิบัติการแบบเบทซ์สำหรับการทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด Incandescent Blacklights	19
5 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV Incandescent Blacklight	20
6 ถึงปฏิบัติการแบบเบทซ์สำหรับการทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UV High Pressure Mercury Vapour	21
7 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV High Pressure Mercury Vapour	21
8 แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาค เดี่ยวๆ	32
9 แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม	33
10 แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์	33
11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ด้าน กรณีทำการ ทดลองในที่มืด	34
12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโทลูอิน กับเวลาโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบ ไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีทำการทดลองในที่มืด	36
13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบ อินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวบนตัวเร่ง ปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) กรณีทำการทดลองในที่มืด	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูตติคิวนบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r) จากการทดลองจริงและการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H กรณีทำการทดลองในที่มืด	40
15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง	43
16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง	44
17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูตติคิวนบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r) จากการทดลองจริงและการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง	47
18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซีโตน (ppmv) กับเวลา(นาท) ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์โดยใช้แผ่นกระจกไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด	48
19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซีโตน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน และอุณหภูมิ 46 °C	50
20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซีโตน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1})	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์อะซิโตน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (x) จากการทดลองจริงและจากการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H	52
22 มุมสัมผัสของหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์	55
ภาพผนวกที่	
ข1 กราฟมาตรฐานไทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	98
ข2 กราฟมาตรฐานไทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน	98
ข3 กราฟมาตรฐานไทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	99
ข4 กราฟมาตรฐานอะซิโตนในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน	99
ค1 กราฟมาตรฐานไทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน	108
ค2 กราฟของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยไทลูอินที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatograph ที่เวลา 0.282 นาที	108
ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยไทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (x^{-1}) ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบแบบ 1 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- ก4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) ที่เตรียมโดยวิธีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ 1 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

P	=	ความดันย่อยของสาร (บรรยากาศ)
H	=	Henry 's law Constant (บรรยากาศ × ลูกบาศก์เมตร/โมล)
X	=	ความเข้มข้นของสารในน้ำ (โมล/ลูกบาศก์เมตร)
h	=	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck' s constant) มีค่า 4.136×10^{-15} อิเล็กตรอนโวลต์.วินาที
V	=	ความถี่ของคลื่น (วินาที ⁻¹)
E	=	พลังงานรวมของโฟตอนที่ตกกระทบ (อิเล็กตรอนโวลต์)
h_{vb}^+	=	โวลที่แถบวาเลนซ์
e_{cb}^-	=	อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
•OH	=	ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radicals)
O_2^-	=	ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radicals)
R	=	โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic Molecule)
E_T	=	พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ
C	=	ความเข้มข้นของสาร (โมล/ลิตร)
K	=	ค่าคงที่สมดุลของสารที่ดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
VB	=	แถบเวเลนซ์ (Valance Band)
CB	=	แถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band)
Eg	=	แถบพลังงาน (Energy Gap)
E-R	=	Eiey-Rideal
L-H	=	Langmuir Hinshelwood
r_L	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน, (โมล/ลิตร-นาที่)
r_D	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับผิวในที่มืด, (โมล/ลิตร-นาที่)
K_L	=	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่ใสแสง, (ลิตร/โมล)
K_D	=	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในที่มืด, (ลิตร/โมล)
$r_{m,L}$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสูงสุด, (โมล/ลิตร-นาที่)
$r_{m,D}$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสูงสุด, (โมล/ลิตร-นาที่)
σ	=	อัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับผิว

การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

Removal of Volatile Organic Compounds by Photooxidation

คำนำ

สารประกอบอินทรีย์ระเหยเป็นสารกลุ่มใหญ่ที่รวมถึงสารที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ และสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดเป็นสารสังเคราะห์ขึ้นเพื่อประโยชน์ในการใช้งานด้านต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น สารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มฮาโลเจน(Halogenated Hydrocarbons), คีโตน(Ketone), แอลกอฮอล์(Alcohol) และสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มอะโรมาติก(Aromatic Hydrocarbons) ซึ่งมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ (เกรียงศักดิ์, 2546) ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพของผู้ที่สัมผัสในระยะยาว สารกลุ่มดังกล่าวมีผลกระทบในระดับตั้งแต่ก่อให้เกิดความรำคาญ จนถึงเป็นสารก่อมะเร็ง ในด้านสภาวะแวดล้อมสารกลุ่มนี้ก่อให้เกิดมลภาวะด้านต่างๆในปัจจุบัน เช่น มลภาวะทางน้ำ อากาศ รวมทั้งมลภาวะอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Pollution)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันเป็นเทคโนโลยีหนึ่งในการกำจัดสารอินทรีย์, สารอนินทรีย์ และเชื้อโรค ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำดื่ม, น้ำเสีย, ดินและอากาศ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการใช้แสงอัลตราไวโอเลตในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการนำมาใช้ ได้แก่ TiO_2 , ZnO , และ Fe_2O_3 (Bessekhouad *et al.*, 2005; Evgenidou *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2004) เป็นต้น สำหรับการศึกษาค้นคว้าของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตจากหลอด Incandescent Blacklights ซึ่งหลอดดังกล่าว เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีราคาไม่สูง จัดหาได้ง่าย รวมทั้งมีศักยภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย โดยสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้ทำการศึกษา ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbon) คือ โทลูอิน (Toluene) ซึ่งเป็นตัวแทนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่พบในกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และสารประกอบในกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) คือ อะซิโตน ซึ่งใช้เป็นสารพวกตัวทำละลาย รวมทั้งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะภายในอาคาร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคลอติดิฟิวนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย
2. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 300-400 นาโนเมตร

ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการศึกษาในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch Reactor) ที่เป็นระบบปิด
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันที่ใช้ในการทดลอง คือไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมมีลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน 3 ลักษณะ
3. ไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ใช้ในการศึกษา คือ โทลูอินและอะซีโตน
4. เปรียบเทียบจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยมีแหล่งกำเนิดแสงจาก หลอดอัลตราไวโอเลตที่ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 3 ค่า

การตรวจเอกสาร

สารประกอบอินทรีย์ระเหย

สารประกอบอินทรีย์ระเหยเป็นสารที่ใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ สารดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งของมลภาวะด้านต่างๆในปัจจุบัน เช่น มลภาวะทางน้ำ อากาศ รวมทั้งมลภาวะอากาศภายในอาคาร ทั้งนี้สารประกอบอินทรีย์ระเหยเมื่อระเหยออกสู่บรรยากาศซึ่งจะสร้างปัญหาแก่ชุมชนรอบบริเวณ เนื่องจากมีความเป็นพิษ กลิ่นและอาจก่อให้เกิดหมอกที่เกิดจากสารเคมีและยังส่งผลกระทบต่อมนุษย์ในด้านสุขภาพ คือ เป็นสารก่อมะเร็ง ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2546)

คุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

สารประกอบอินทรีย์ระเหย (Volatile Organic Compounds, VOCs) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยมีความดันไอ (Vapor Pressure) น้อยกว่า 760 ทอร์ (101.3 kPa) และมากกว่า 1 ทอร์ (0.13 kPa) ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส (Derwent, 1995) และมีจุดเดือดสูงไม่เกิน 500 องศาฟาเรนไฮต์ (260 องศาเซลเซียส 533 เคลวิน VOCs สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่ม Hydrocarbon และ Compounds ดังแสดงในตารางที่ 1 (Hunter and Oyama, 2000)

ความดันไอ (Vapor Pressure) คือความเข้มข้นในรูปก๊าซที่สภาวะสมดุลของของเหลวบริสุทธิ์ที่อุณหภูมินั้น ๆ โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์ระเหยชนิดไม่มีขั้วจะมีความดันไอสูงกว่าชนิดที่มีขั้ว เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ระเหยชนิดไม่มีขั้วต้องการระดับพลังงานที่ต่ำสำหรับการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นก๊าซ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลกับความดันไอบ้าง โดยเมื่อจุดเดือดของสารประกอบมีอุณหภูมิสูง ค่าความดันไอของสารประกอบนั้นก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย (Card, 1998) คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหยแสดงดังตารางที่ 2 (LaGrega *et al.*, 1994; Verchueren, 1996; Hunter and Oyama, 2000)

ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility) เป็นค่าการละลายของสารในน้ำที่สภาวะสมดุล โดยสารประกอบที่มีขั้วมีแนวโน้มที่จะสามารถละลายน้ำได้ดีกว่าสารประกอบที่ไม่มีขั้ว ซึ่ง

สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ มีแนวโน้มที่จะไม่ละลายน้ำหรือมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (Card, 1998)

ตารางที่ 1 กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Hydrocarbons	Examples	Compounds	Examples
Paraffins	Propane, Butane, Octane	Alcohols	Methanols, Ethanols
Olefins	Ethylene, Butadiene	Aldehydes	Formaldehyde
Acetylenes	Acetylene	Ketones	Methyl ethylketone
Aromatics	Toluene, Benzopyrene	Acids	Formic acid
		Hydroperoxides	Peroxyacynitrite(PAN)
		Halides	Vinyl chloride, Bromobenzene
		S compounds	Dimethyl sulfide
		N compounds	Trimethyl amine

ที่มา : ดัดแปลงจาก Hunter and Oyama (2000)

สัดส่วนของก๊าซต่อของเหลว (Gas/Liquid Partitioning) ของสารประกอบระหว่างการแยกสถานะ กรณีที่สัดส่วนนี้เป็นสัดส่วนของสารประกอบระหว่างสถานะก๊าซและของเหลว (น้ำ) สัมประสิทธิ์ของสัดส่วนนี้จะเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของเฮนรี (Henry 's law Coefficient) หรือค่าคงที่ของเฮนรี (Henry 's law Constant) เป็นค่าคงตัวของการระเหยกลายเป็นไอของสารที่ละลายในน้ำ โดย Henry 's law กล่าวว่าที่สมดุลความเข้มข้นของสารเคมีในน้ำเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความดันย่อย (Partial Pressure) ของสารเคมีนั้นในอากาศ (Headspace)

$$P = H \cdot X \quad (1)$$

โดย

P = ความดันย่อยของสมการ มีหน่วยเป็นบรรยากาศ (atm)

H = Henry 's law Constant มีหน่วยเป็นบรรยากาศ $\times$ ลูกบาศก์เมตร/โมล ($\text{atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$)

X = เป็นความเข้มข้นของสารในน้ำ มีหน่วยเป็น โมล/ลูกบาศก์เมตร (mol/m^3)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

Compound name	Chemical Formular	molecular Weight	Water Solubility	Vapor Pressure	Henry 's Constant	Melting Point	Boiling Point
Acetone	C ₃ H ₆ O	58.09	Total	266	2.50×10^{-5}	-95	56.2
Benzene	C ₆ H ₆	78.12	1.78×10^3	95.2	5.55×10^{-3}	5.5	80.1
Chloroform	CHCl ₃	119.37	8.00×10^3	200	1.5×10^{-1}	-63.5	61.2
Ethanol	C ₂ H ₆ O	46.08	6.52×10^4	50	3.03×10^{-5}	-114	78.4
Formaldehyde	CH ₂ O	30.03	4.00×10^5	3500	3.00×10^{-7}	-118	-21
Methanol	CH ₄ O	32.05	Total	114	5.20×10^{-6}	-98	65
Methyl ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	72.12	3.50×10^5	100	1.30×10^{-4}	-86.3	79.6
Phenol	C ₆ H ₆ O	94.12	8.20×10^4	0.341	2.60×10^{-6}	43	182
Toluene	C ₇ H ₈	92.15	515	30	6.42×10^{-3}	-95.95	110.6
Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	131.38	1.1	75	1.02×10^{-2}	-73	87
Vinyl chloride	C ₂ H ₃ Cl	62.5	4.27×10^3	2660	2.65×10^{-2}	-154	-13.9

หมายเหตุ

- molecular weight in g/g.mol
- Vapor Pressure in mmHg at 25 °C
- Henry 's law coefficient at 25 °C in (atm.m³/mol)
- Melting point in 25 °C
- Boiling point 25 °C

ที่มา : ดัดแปลงจาก LaGrega *et al.* (1994); Verchueren (1996); Hunter and Oyama (2000)

สารที่ละลายน้ำได้ดี และมีค่าความดันไอต่ำ มีแนวโน้มจะระเหยกลายเป็นไอจากน้ำได้น้อย โดยทั่วไปสารที่มีค่า Henry 's law Constant น้อยกว่า 10^{-5} atm.m³/mol การระเหยกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้น้อยและถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ถ้าสารมีค่า Henry 's law Constant น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-7} atm.m³/mol ถือว่าไม่มีการระเหยออกจากสารละลาย มีผลทำให้ความเข้มข้นในสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากสารละลาย สำหรับสารที่มีค่า Henry 's law Constant มากกว่า

$10^{-5} \text{ atm.m}^3/\text{mol}$ การระเหยกลายเป็นไอจากน้ำมีนัยสำคัญและอาจเป็นวิถีทางของการสูญเสียสารออกจากน้ำอีกทางหนึ่ง (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2543)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งพบว่ามีอยู่ 3 แบบตามลักษณะของโครงสร้างของผลึก คือ Anatase, Rutile และ Brookite สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Anatase และ Rutile จะอยู่ในรูปผง โดยทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีสมบัติใกล้เคียงกันมาก เช่น ความมันวาว ความแข็งและความหนาแน่น พบว่าที่อุณหภูมิ 915 องศาเซลเซียส ไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Anatase สามารถเปลี่ยนเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ Rutile ได้ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

คุณสมบัติทางกายภาพ	คุณสมบัติทางเคมี
1. มีลักษณะเป็นของแข็ง	1. จุดเดือด 2500-3000 °C
2. สีขาว	2. จุดหลอมเหลว 1840 °C
3. ไม่มีกลิ่น	3. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.9
4. น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 79.90	4. ไม่ละลายน้ำ
5. ความแข็ง 5.5-6	5. pH 7-8 ที่อุณหภูมิ 20 °C

ที่มา Amethyst Galleries, Inc. (1996)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีคุณสมบัติดังนี้

1. มีเสถียรภาพต่อสารเคมี ไม่ละลาย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในปริมาณสูง
2. มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูกและไม่มีอันตราย
3. มีช่องว่างพลังงาน (E_g) ไม่สูง ($E_g=3.2$ อิเล็กตรอนโวลต์)

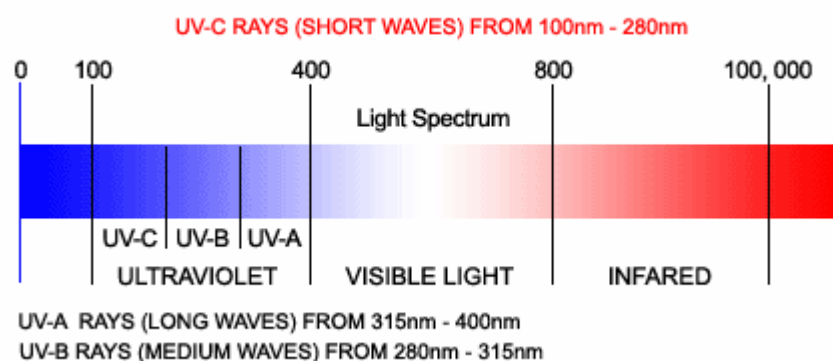
ตัวเร่งปฏิกิริยาแสงอื่นๆ

ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันพบว่ากลุ่มโลหะที่เกิดขึ้นเป็นโลหะออกไซด์สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันได้เช่นกัน ซึ่งโลหะออกไซด์ที่พบว่ามีงานนำมาใช้งานกันนอกเหนือจากไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ ZnO, ZrO_2 , Bi_2WO_6 และ Fe_2O_3 เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้สารอื่นที่อยู่ในกลุ่มสารตัวนำมาร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้เกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรอยต่อระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นแบบ Heterojunction ส่งผลให้แถบพลังงานแคบลงความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแสงมีมากขึ้น การเกิด Recombination ได้รวดเร็วขึ้นซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยทำให้เพิ่มการกระจายประจุ และทำให้ระยะเวลาของตัวนำประจุยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้การถ่ายเทประจุเพื่อดูดซับ Substrate มีผลดีขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในรูป Heterojunction ได้แก่ Cu_2O/TiO_2 , Bi_2O_3/TiO_2 และ $ZnMn_2O_4/TiO_2$ เป็นต้น (Bessekhouad *et al.*, 2005)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันที่ใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ZnO และ TiO_2 ในการกำจัดสารฆ่าแมลง Dichlorvos โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับสารออกซิเดนต์อื่น คือ H_2O_2 หรือ $K_2S_2O_8$ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ZnO มีประสิทธิภาพในการกำจัด Dichlorvos เท่ากับ 82 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 10 นาที ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 สามารถกำจัด Dichlorvos ได้ 69 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีการเติม H_2O_2 ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ลงในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน พบว่าจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง ในขณะที่เมื่อใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วเติม H_2O_2 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น (Evgenidou *et al.*, 2005) ในส่วนของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZrO_2 ชนิดผงที่ได้มีการนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 365 นาโนเมตรเพื่อกำจัด Methanol และ Hexane พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Methanol และ Hexane เท่ากับ 31.6 และ 25.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อมีการใช้ TiO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและทดลองในสภาวะเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด Methanol และ Hexane เท่ากับ 40.3 และ 17.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Wu *et al.*, 2004) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ZrO_2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้เช่นเดียวกับ TiO_2

หลอดแสงอัลตราไวโอเลต

แสงอัลตราไวโอเลตมีค่าความยาวคลื่นในช่วง 100-400 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 สำหรับกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน แสงดังกล่าวที่ใช้จะมีค่าความยาวคลื่นที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้า โดยในการศึกษานี้จะใช้ค่าความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร ซึ่งมีพลังงานเพียงพอในการกระตุ้นอิเล็กตรอน สำหรับรายละเอียดการคำนวณค่าพลังงานดังกล่าวในภาคผนวก ค.



ภาพที่ 1 การแผ่สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

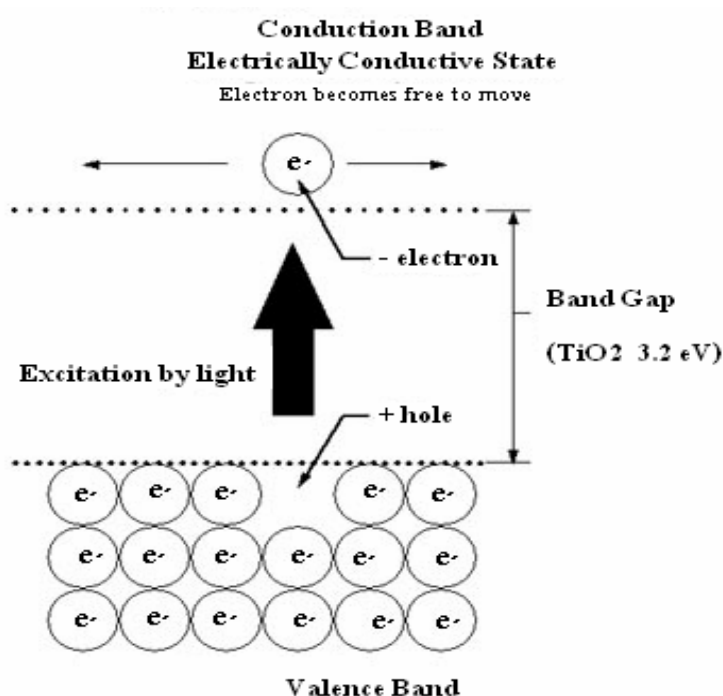
ที่มา Breathe Free Technology Inc. (2004)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสง (Photoreaction) ซึ่งในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้เป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Catalysts) โดยทั่วไปโมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกดูดซับ (Adsorb) ไว้บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะถูกออกซิไดส์โดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนให้กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ ให้ออกซิเจนอิสระ ดังแสดงในภาพที่ 2 เมื่อมีแสงที่มีพลังงานมากพอกระทบกับพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นสู่แถบการนำไฟฟ้า หรือทำให้สารอื่นๆที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม เช่น ไขมัน และออกซิเจน เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล

หลักการเกิดโฟโตออกซิเดชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารปนเปื้อนในสารละลาย และการเกิดออกซิเดชันโดยตรงของไฮดรอกซิลในแถบวาเลนซ์กับสารปนเปื้อนที่ดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Iangphasuk, 1997)

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันนี้ เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีแถบพลังงานที่น่าสนใจอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์ (Valence Band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) แถบพลังงานทั้งสองนี้จะถูกแยกจากกันโดยมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ซึ่งมีความกว้าง E_g กันอยู่ ดังแสดงในภาพที่ 2

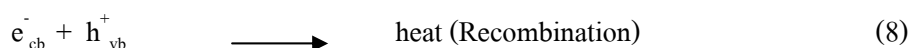
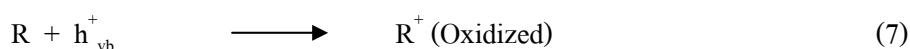
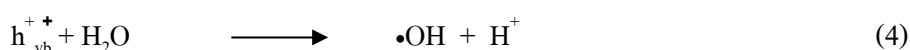
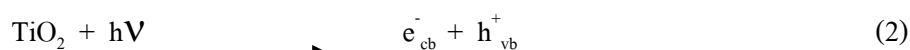


ภาพที่ 2 โครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ
ที่มา Green Titan Inc. (2004)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) ของอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ถูกอนุภาคของแสง (Photon) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างพลังงาน E_g ตกกระทบผิวหน้าอนุภาคสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นเปลี่ยนที่อยู่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เรียกว่าโฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^+_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำไฟฟ้าแทนด้วยสัญลักษณ์ e^-_{cb} ซึ่ง h^+_{vb} และ e^-_{cb} สามารถ

ที่จะกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้อีก เรียกว่ารีคอมไบเนชัน (Recombination) ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน และที่ผิวหน้าระหว่างของแข็งและก๊าซ (Gas-Solid Interface) อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนย้ายจากแถบการนำไฟฟ้าไปสู่ตัวรับอิเล็กตรอน (Acceptor) ในก๊าซ เรียก รีดักชัน (Reduction) หรืออิเล็กตรอนจากผู้ให้ (Donor) ในก๊าซไปสู่โฮลในแถบวาเลนซ์ เรียก ออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ด้วยสมการ 2 ถึง 8 (Al-Ekabi *et al.*, 1991)



เมื่อ	$h\nu$	= อนุภาคของแสง (Photon)
	h_{vb}^+	= โฮลที่แถบวาเลนซ์
	e_{cb}^-	= อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า
	$\bullet\text{OH}$	= ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals)
	O_2^-	= ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radicals)
	R	= โมเลกุลของสารอินทรีย์ (Organic Molecule)

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันในสถานะก๊าซ

อิเล็กตรอนที่แถบการนำไฟฟ้า (e_{cb}^-) ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ที่ดูดติดผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^-) ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์ (h_{vb}^+) สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลสารอินทรีย์ที่

ปนเปื้อนในก๊าซได้โดยตรง หรือไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions : OH⁻) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (•OH) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H₂O) ที่ดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ด้วยเช่นกัน ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong Oxidizing Agent) มีความไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly Reactive) และทำหน้าที่สลายโมเลกุลสารอินทรีย์ในก๊าซที่ดูดซับผิวหรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลสามารถที่ทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ดังสมการที่ 9



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้ โดยจะทำปฏิกิริยากับ e_{cb}⁻ ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการที่ 10 และ 11 (วูทธีนนท์, 2544)



ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอระเหย

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น (Initial substrate concentration) อุณหภูมิ ปริมาณและความดันย่อยของออกซิเจน (Volume and Partial Pressure of Oxygen) ความเข้มของแสง (Light Intensity) และความชื้น (Humidity)

1. ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนตั้งต้น ข้อมูลวิจัยจำนวนมากได้แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างโมเลกุลของสารตั้งต้นมีผลต่ออัตราการย่อยสลาย ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนต่ำ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform) ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด แต่ถ้าหากโครงสร้างโมเลกุลมีความซับซ้อนมากขึ้น ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นด้วย (Ince and Gonenc, 1997) แต่ในทางตรงกันข้ามจากการศึกษาของ Gupta (1994) ได้ทดสอบสารพีซีอี (Perchloroethylene, PCE) ผลที่ได้คือประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพีซีอีตั้งต้นสูงขึ้น

2. อุณหภูมิ จากทฤษฎีทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic theory) อุณหภูมินับเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} (Recombination) และอาจเนื่องมาจากความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอาจเนื่องมาจากการลดลงของพลังงานการกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา (Serpone and Pelizzetti, 1989) แต่ในกรณีของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในสถานะก๊าซ เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาคูดัตติฟส ส่งผลให้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูดัตติฟสลดลง (Satterfield, 1991) ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง

3. ปริมาณและความดันย่อยของออกซิเจน อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ยัดจับ e^-_{cb} ที่แถบการนำไฟฟ้า ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์ไอออน (สมการที่ 4) และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สมการที่ 8) และด้วยเหตุนี้ออกซิเจนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยัดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ (Recombination) ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} โดยออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังแสดงในสมการที่ 12 (Kim *et al.*, 2002)



เมื่อพิจารณาผลกระทบของความดันย่อยต่อโครงสร้าง และกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชันของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีสปัตเตอริง (sputtering) จากการทดลองได้ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของสารละลายเมทิลออเรนจ์ (methyl orange) โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของออกซิเจนจะส่งผลโดยตรงต่อค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งคือทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันสูงขึ้น (Liu *et al.*, 2004)

4. ความเข้มของแสง จากสมการความสัมพันธ์ของ Planck เนื่องจากความเข้มของแสงขึ้นอยู่กับพลังงานของแสงโดยตรง (ความเข้มแสงคือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาจนภาคแสง 1 โฟตอน (photon) ที่มีความถี่ (ν) และมีค่าพลังงาน (E) คิดเป็น 1 ควอนตัม ดังแสดงใน

สมการที่ 13 ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E ดังนั้น

$$E = h\nu \quad (13)$$

โดย

$$\begin{aligned} E &= \text{พลังงานรวมของโฟตอนที่ตกกระทบ (eV)} \\ h &= \text{ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่า } 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s} \\ \nu &= \text{ความถี่ของคลื่น (s}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

(Ollis *et al*; 2005)

$$\begin{aligned} \text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ} / \text{พลังงานของแสง 1} \\ &= E_T / h\nu \end{aligned} \quad (14)$$

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

ไอน์สไตน์(Einstein) ได้ตั้งสมมุติฐานว่า 1 โฟตอนจะทำให้เกิด 1 โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2533) ดังนั้น

$$\text{จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน} \propto \text{จำนวนโฟตอน} \propto \text{ความเข้มของแสง}$$

เพื่อที่จะกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้เกิด e^-_{cb} และ h^+_{vb} ต้องมีพลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลของความเข้มของแสงที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งตามระดับของความเข้มแสงได้ 3 ระดับคือ

1. ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง

2. ที่ระดับความเข้มแสงปานกลางอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง
3. ที่ระดับความเข้มแสงสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่ เมื่อถึงจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass transfer limit) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพควอนตัมของการสลายตัว (Quantum efficiency of degradation = สัดส่วนของการสลายตัวต่อจำนวนโฟตอนที่ใช้) จะมีค่าคงที่ที่ระดับความเข้มแสงต่ำและจะแปรผกผันกับรากที่สองของความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงปานกลางและจะแปรผกผันกับความเข้มแสงที่ระดับความเข้มแสงสูง
(Ollis *et al.*, 1991)

บทบาทของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย เนื่องจากไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยดังกล่าว มีผลต่อคุณภาพอากาศภายในอาคารซึ่งส่งผลกระทบต่อกิจกรรมต่างๆไม่ว่าจะเป็นในสถานที่ทำงาน สถานศึกษา และต่อกลุ่มคนที่อาศัยอยู่ภายในอาคาร โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันมีศักยภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยหลายชนิด เช่น TCE, Ethylene, Acetone, Toluene และสารประกอบอินทรีย์ระเหยในกลุ่ม Mercaptan รวมทั้งกระบวนการโฟโตออกซิเดชันยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดกลิ่นต่างๆที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ระเหย

กระบวนการโฟโตออกซิเดชันในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแสง ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับการใช้แหล่งกำเนิดแสงโดยใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอด UV Incandescent Blacklight โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการหาประสิทธิภาพการกำจัดเอทานอล ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 850 ppmv พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดเอทานอลโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าการใช้แสงจากหลอด UV Incandescent Blacklight โดยค่าความเข้มข้นสุดท้ายของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันอยู่ที่ระดับ 100 ppmv (Chapuis *et al.*, 2002) ในส่วนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในกลุ่ม Mercaptan จากการศึกษาการกำจัดก๊าซ Dimethyl Sulfide โดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UV Incandescent Blacklight ร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

พบว่าสามารถกำจัด Dimethyl Sulfide ที่มีความเข้มข้น 100 ppmv โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับ 45.2 เปอร์เซ็นต์ (Demeestere *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงบทบาทของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันในการกำจัดกลิ่นจากคันบูห์โดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตเพียงอย่างเดียวพบว่าสามารถลดกลิ่นให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของกลิ่นเริ่มต้นภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง (Schmitt *et al.*, 2003)

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลของ Langmuir-Hinshelwood (L-H) และ Eley-Rideal (E-R) (Kim and Hong, 2001) ในกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ L-H โมเดล (L-H Mechanisms) ปฏิกิริยาเกิดจากสารปนเปื้อนและสารออกซิแดนต์ (Oxidant) ที่ดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนในกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ E-R โมเดล (E-R Mechanisms) ปฏิกิริยาปรากฏขึ้นระหว่างสารออกซิแดนต์ที่ดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (h^+_{vb} หรือ Radical) กับโมเลกุลของสารปนเปื้อนที่กระจายตัวในสารละลาย (Bulk Solution) โดยทั่วไปแล้ว L-H โมเดล จะถูกนำมาใช้สำหรับอธิบายการเกิดโฟโตออกซิเดชันในสถานะก๊าซมากกว่า (Is Sopyan *et al.*, 1996) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สมการที่ดัดแปลงจากสมการในรูปแบบของ L-H ดังสมการที่ 15

$$r_L = r_{m,L} \frac{K_L [C]}{1 + K_L [C]} \quad (15)$$

โดย

r_L	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน, (โมล/ลิตร-นาท)
$r_{m,L}$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสูงสุด, (โมล/ลิตร-นาท)
K_L	=	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่ใช้แสง, (ลิตร/โมล)
$[C]$	=	ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ, (โมล/ลิตร)

จัดรูปสมการที่ 15 โดยการทำให้อสมการเป็นสมการเส้นตรงโดยการเขียนกราฟส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) กับส่วนกลับของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารปนเปื้อน ดังแสดงในสมการที่ 18 (Serpone and Pelizzetti, 1989; Davis and Huang, 1991; Venkatadri and Peters, 1993; Kawaguchi, 1994)

$$\frac{1}{r_L} = \frac{1}{r_{m,L}} + \frac{1}{r_{m,L} K_L [C]} \quad (16)$$

จุดที่เส้นตรงตัดแกนตั้ง Y คือ $(r_{m,L})^{-1}$ และความชันของเส้นตรง คือ $(r_{m,L} K_L)^{-1}$ ในส่วนของค่า k สำหรับอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาเดี่ยวๆ และได้ทำการสรุปไว้ว่าค่า $r_{m,L}$ อันเนื่องมาจากไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งดูดติดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (Kawaguchi, 1994)

สำหรับสมการที่ 16 ค่าความเข้มข้นของสาร $[C]$ และอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r) ที่ใช้ในสมการ จะเป็นค่าความเข้มข้นของสารเริ่มต้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น เนื่องจากกลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงแรก ซึ่งมีสาเหตุจากพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงแรกก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวเป็นพื้นผิวที่ไม่มีสารใดมารบกวน แต่เมื่อมีสารประกอบอินทรีย์ระเหยเข้าไปทำปฏิกิริยา สารดังกล่าวจะถูกดูดซับได้รวดเร็วในช่วงแรก จนกระทั่งพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถดูดติดไอของสารอินทรีย์ระเหยได้มากเกินกว่านี้ รวมทั้งยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกิดขึ้นขณะเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ มีการเปลี่ยนแปลงไปของสารประกอบอินทรีย์ระเหยตั้งต้น เป็นสารกลางและสารผลิตภัณฑ์อื่นที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดปฏิกิริยา และเมื่อพิจารณาสมการที่ 16 จะเห็นได้ว่าตัวแปรสำคัญที่นำมาพิจารณาในสมการซึ่งเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยานั้น มีเพียงตัวแปรเดียวคือค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น ดังนั้นเมื่อใช้สมการที่ 16 ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจึงพิจารณาเพียงค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเท่านั้น และในทำนองเดียวกันสามารถใช้สมการที่ 16 อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวได้เช่นกัน

ในทำนองเดียวกัน กรณีไม่ใช้แสงจะไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน สามารถใช้สมการลักษณะเดียวกันในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดติดผิว ดังสมการที่ (17)

$$r_D = r_{m,D} \frac{K_D[C]}{1 + K_D[C]} \quad (17)$$

และ

$$\frac{1}{r_D} = \frac{1}{r_{m,D}} + \frac{1}{r_{m,D}K_D[C]} \quad (18)$$

โดย

r_D	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวในที่มืด, (โมล/ลิตร-นาท)
$r_{m,D}$	=	อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสูงสุด, (โมล/ลิตร-นาท)
K_D	=	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในที่มืด, (ลิตร/โมล)
$[C]$	=	ค่าความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ, (โมล/ลิตร)

ดังนั้นจากสมการที่ 15 และ 17 สามารถหาอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวได้ ดังแสดงในสมการที่ 19

$$\sigma = \frac{r_{m,L}}{r_{m,D}} \quad (19)$$

โดยที่

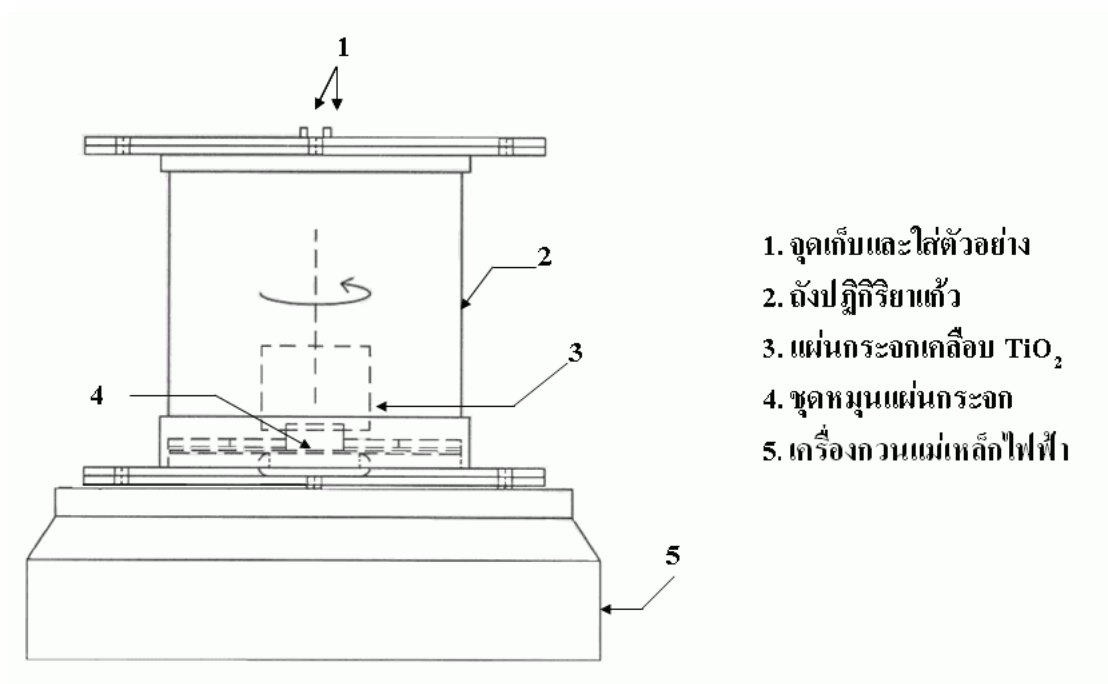
σ	=	อัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันสูงสุดต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวสูงสุด
----------	---	---

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ (Batch Reactor)

ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ซึ่งเป็นถังปฏิกิริยาที่เป็นระบบปิดและใช้วัสดุ 2 ชนิดมาประกอบกัน คือ สแตนเลส และแก้ว โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.30 เซนติเมตร สูงเท่ากับ 9.0 เซนติเมตร และมีปริมาตรเท่ากับ 0.61 ลิตร โดยรายละเอียดลักษณะของถังปฏิกิริยาในการทำการทดลองดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ถังปฏิกิริยาแบบแบทช์สำหรับการทดลอง

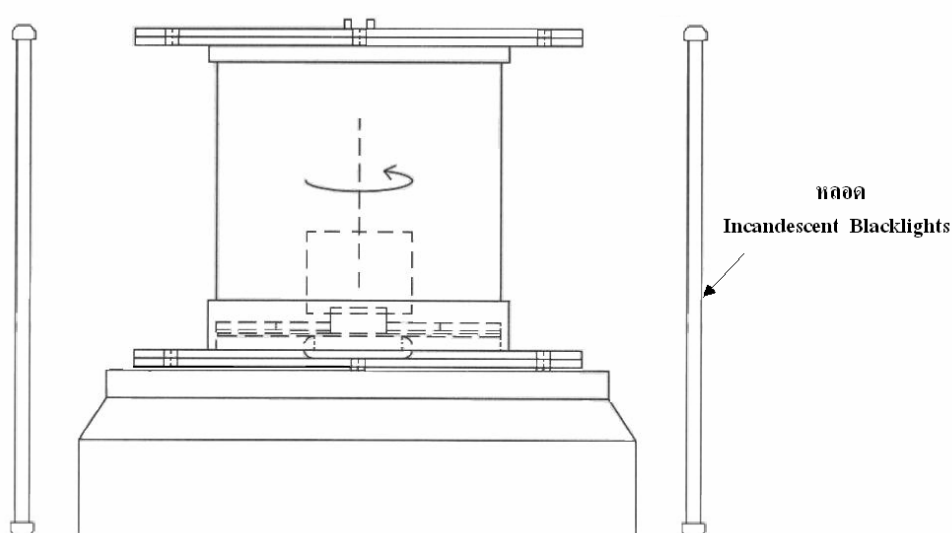
ถังปฏิกิริยาข้างต้นถูกออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานเป็นถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ โดยจะถูกกวนด้วยแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์(รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) ในขณะที่ทำการทดลองแผ่นกระจกดังกล่าวจะถูกยึดติดกับชุดแท่งแม่เหล็ก(Magnetic

Barr) ซึ่งประกอบอยู่ภายในถังปฏิกิริยา และเมื่อนำถังปฏิกิริยามาวางบนเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer) ทำให้ชุดแท่งแม่เหล็กภายในถังปฏิกิริยาสามารถหมุนได้ โดยจะใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 60 รอบต่อนาที นอกจากนี้ส่วนประกอบอื่นของถังปฏิกิริยาดังกล่าวจะประกอบด้วยช่องใส่ตัวอย่างและเก็บตัวอย่างก๊าซที่ใช้ในการทดลองอย่างละ 1 จุด

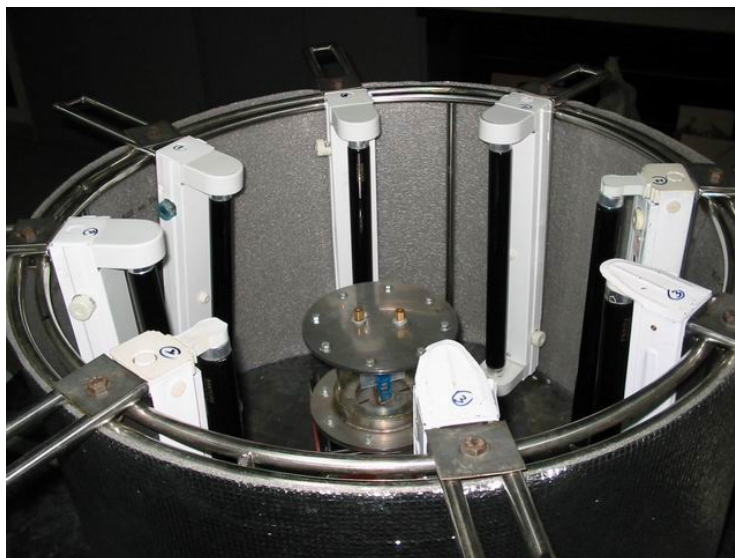
2. ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต

2.1 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตจากหลอด UV Incandescent Blacklight

ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตจากหลอด UV Incandescent Blacklight ดังกล่าวประกอบด้วยขาตั้งสเตนเลสทรงกลมซึ่งมีความสูงเท่ากับ 90 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 64 และ 70 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับหลอด Incandescent Blacklight เป็นหลอดที่มีกำลังไฟฟ้าขนาด 10 วัตต์ มีช่วงค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 365 นาโนเมตร จำนวน 8 หลอด นอกจากนี้ในชุดแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวจะถูกปิดด้วยวัสดุทึบแสงเพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอกในขณะทำการทดลอง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 และ 5



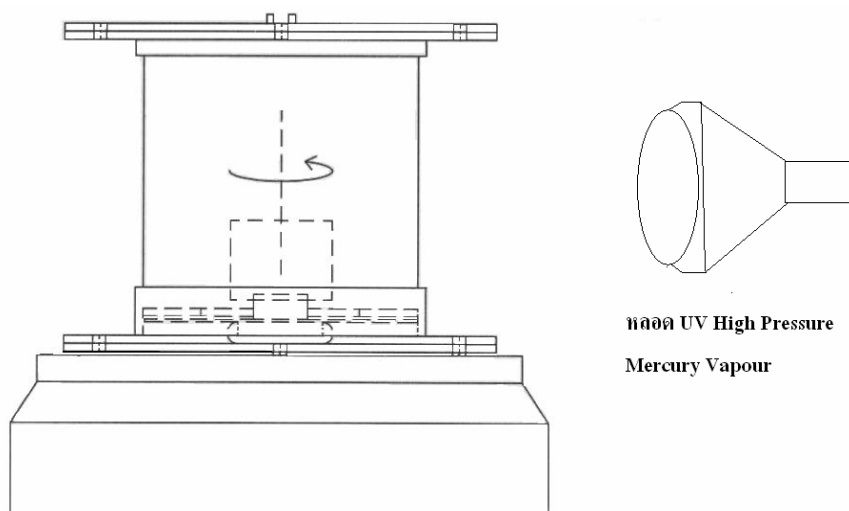
ภาพที่ 4 ถังปฏิกิริยาแบบเบทซ์สำหรับการทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด Incandescent Blacklights



ภาพที่ 5 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV Incandescent Blacklight

2.2 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV High Pressure Mercury Vapour

ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV High Pressure Mercury Vapour ดังกล่าว ประกอบด้วยขาตั้งเหล็กซึ่งมีขนาด ความกว้าง×ความยาว×ความสูง เท่ากับ 26.0, 110.0 และ 26.0 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับหลอด UV High Pressure Mercury Vapour มีช่วงค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 300-400 นาโนเมตร จำนวน 1 หลอด นอกจากนี้ในชุดแหล่งกำเนิดแสงดังกล่าวจะถูกปิดด้วยวัสดุทึบแสงเพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอกในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 6 ถังปฏิกรณ์แบบเบตซ์สำหรับการทดลองที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด
UV High Pressure Mercury Vapour



ก) ภาพแสดงลักษณะภายนอก



ข) ภาพแสดงลักษณะภายใน

ภาพที่ 7 ชุดแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UV High Pressure
Mercury Vapour

3. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Stirrer)
4. แท่งกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Barr)
5. เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Chromatography) รุ่น GC-14B Shimadzu
6. กระบอกฉีดสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ ขนาด 100, 500 และ 1,000 ไมโครลิตร

7. หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ
8. นาฬิกาจับเวลา
9. Thermocouple
10. UV-light Meter Model UV-340 ของบริษัท อินเวอร์ทรอน คอร์ปอเรชั่น จำกัด
11. แผ่นกระจกขนาดความกว้าง × ความยาว × ความหนา เท่ากับ $5 \times 5 \times 0.2$ เซนติเมตร
12. ตู้อบ

สารเคมี

1. สารละลายโทลูอิน (C_7H_8)
2. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ของบริษัท Ridel-DeHaen GmbH ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ในช่วง 0.5-1 ไมครอน
3. สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ ของบริษัท เบสเทรค พรินซ์ จำกัด (ทางบริษัทไม่เปิดเผยข้อมูลองค์ประกอบ)

วิธีการ

1. การเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

1.1 การเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการปั่น

สำหรับการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ด้านโดยวิธีการปั่นนั้น ทำได้โดยนำกระจกขนาดความกว้าง $\times$ ความยาว $\times$ ความหนา เท่ากับ $5 \times 5 \times 0.2$ เซนติเมตร ทำการปั่นสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ เพียง 1 ด้าน โดยอุปกรณ์ปั่นสี แล้วนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

1.2 การเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม

สำหรับการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 ด้านโดยวิธีการจุ่มนั้น ทำได้โดยนำกระจกขนาดเดียวกันกับข้อ 1.1 ทำการจุ่มสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ เพียง 1 ด้าน แล้วนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

สำหรับการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน จะทำการเตรียมโดยวิธีการกันกับในกรณีแรก แต่จะทำการจุ่มสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 2 ด้าน แล้วนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

1.3 การเตรียมแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

สำหรับการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ทำได้โดยนำกาวยาฟอกสีทาบนแผ่นกระจกขนาดเดียวกันกับข้อ 1.1 ทั้งสองด้าน แล้วนำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งผ่านการร่อนตะแกรง เบอร์ 200 แล้วนำมาโรยบนแผ่นกระจกที่เตรียมไว้ จากนั้นนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

1.4 การวิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก

จะทำการวิเคราะห์หาลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก โดยใช้อุปกรณ์ Atomic Force Microscope (AFM) ในการวิเคราะห์ ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล อุปกรณ์ดังกล่าวอาศัยหลักการสร้างภาพจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอม อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถแสดงลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกซึ่งเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1 การเตรียม Standard Curve ของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน

การเตรียม Standard Curve โดยทำการเตรียมสารละลายโทลูอิน ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 ถึง 300 ppmv ในหลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ โดยให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินในสถานะสมดุลเหนือสารละลายโทลูอิน แล้วนำตัวอย่างไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี จากนั้นนำค่าที่วิเคราะห์ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินกับพื้นที่ใต้กราฟ โดยการทดลองในการหากราฟมาตรฐานของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินจะแสดงในภาพผนวกที่ ข1-ข3

2.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินในที่มืด

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทลูอินในภายในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ที่เป็นชุดควบคุม ซึ่งใช้แผ่นกระจกเปล่าที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด โดยเตรียมความเข้มข้นโทลูอินเริ่มต้น ให้มีความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 0-200 ppmv ที่เวลาต่างๆกัน คือ 0, 5 10, 15, 25, 35 และ 45 นาที

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคลอติดฟิวของโทลูอินในสถานะก๊าซในที่มืดทำได้โดยเตรียมสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น อยู่ในช่วง 0-200 ppmv จำนวน 4 ค่า ซึ่งขณะทำการทดลองจะใช้แผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ลักษณะ ที่เตรียมไว้ข้างต้น นำมาทดลองหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคลอติดฟิว ที่เวลาต่างๆกัน คือ 0, 5, 10, 15, 25, 35, 45, 60, 75 และ 90 นาที โดยกำหนดค่าความเข้มข้นทำการทดลองเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดลองเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส และ 56 องศาเซลเซียส

2.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน โดยใช้แสงจากหลอดอัลตราไวโอเลต

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน โดยใช้แสงจากหลอด UV Incandescent Blacklight และ UV High Pressure Mercury Vapour

โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 2.2 ซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นให้มีค่าคงที่ขณะทำการทดลองเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดลองเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส สำหรับการทดลองโดยใช้หลอด UV Incandescent Blacklights และกำหนดอุณหภูมิเท่ากับ 56 องศาเซลเซียส กรณีทำการทดลองโดยใช้หลอด UV High Pressure Mercury Vapour

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 การเตรียม Standard Curve ของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน

การเตรียม Standard Curve โดยทำการเตรียมสารละลายอะซิโตน ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 ถึง 3000 ppmv ในหลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ โดยให้สารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนอิ่มตัวในสถานะสมดุลเหนือสารละลายอะซิโตน แล้วนำตัวอย่างไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี จากนั้นนำค่าที่วิเคราะห์ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน กับพื้นที่ใต้

กราฟ โดยการทดลองในการหากราฟมาตรฐานของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน จะแสดงในภาพผนวกที่ ข1-ข3

3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิวในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนในที่มืด

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิวของโทลูอินในสภาวะก้ำกึ่งภายในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ซึ่งใช้แผ่นกระจกเปล่าที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด โดยเตรียมความเข้มข้นอะซิโตนเริ่มต้น ให้มีความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 0-2000 ppmv ที่เวลาต่างกัน คือ 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 นาที

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนในที่มืด ทำได้โดยเตรียมสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0-2000 ppmv จำนวน 4 ค่า ซึ่งในการทดลองขั้นตอนนี้จะใช้แผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะทดลองที่ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.2 นำมาทดลองหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิว ที่เวลาต่างกัน คือ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 20 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของอะซิโตนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนในกรณีใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต

โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.2 และสภาวะทดลองที่ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในข้อ 2.3 นำมาทดลองหาศึกษากระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน ที่เวลาต่างกัน

4. ในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน จะใช้สมการในรูปแบบของ L-H ในการอธิบาย โดยนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสูงสุดในแต่ละความเข้มข้น เลือกอัตรการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (Initial Rate) สำหรับแต่ละความเข้มข้น

เริ่มต้น (Initial Concentration) โดยการศึกษาจะเลือกที่เวลา 10 นาที สำหรับโทลูอิน และเวลา 6 นาที สำหรับอะซิโตน ซึ่งจะให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เหมาะสมกับสมมุติฐานที่กล่าวว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้น และในช่วงเวลาดังกล่าว ไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยภายในถังปฏิกิริยาน่าจะเกิดการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันภายในถังปฏิกิริยา นอกจากนี้หลังจากช่วงเวลาดังกล่าวอาจมีปัจจัยอื่นที่เข้ามารบกวนอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน หลังจากนั้นนำข้อมูลอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้น (C^{-1}) กับ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r^{-1}) ตามสมการที่ 16 และ 18 ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการเส้นตรง และสามารถหาค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาได้ คือ r_m และ K ได้จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว แล้วนำค่า r_m และ K มาแทนค่าในสมการที่ 15 และ 17 ที่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าต่างหากัน เพื่อหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงในกรณีที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการในรูปแบบของ L-H

5. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยหยดน้ำที่ระยะห่างประมาณ 3 เซนติเมตรลงบนแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ได้แก่ แผ่นกระจกที่เตรียมขึ้นก่อนที่จะทำการทดลอง, แผ่นกระจกที่เตรียมขึ้นผ่านแสงอัลตราไวโอเลต, แผ่นกระจกที่เตรียมขึ้นผ่านการทดลองในที่มืด และแผ่นกระจกที่เตรียมขึ้นผ่านการทดลองโดยให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย คือ โทลูอินและอะซิโตน แล้วนำมาตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจก

6. แผนการทดลอง

ตารางที่ 4 แผนการทดลอง

สารที่ใช้ใน การทดลอง	ลักษณะการ เคลือบตัวเร่ง ปฏิกิริยา	ความเข้มแสง($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)			
		ในที่มืด	165.7	193.3	1230.0
โทลูอิน	กระจกเปล่า	✓	-	-	-
	1 ด้าน	✓	✓	✓	-
	2 ด้าน	✓	✓	-	-
	ผง 2 ด้าน	✓	✓	✓	✓
อะซิโตน	กระจกเปล่า	✓	-	-	-
	ผง 2 ด้าน	✓	-	✓	-

ตารางที่ 5 ค่าตัวแปรที่ทำการทดลองและช่วงค่าแปรผัน

	ช่วงค่าแปรผัน	หน่วย
ความเข้มข้นไอของ สารประกอบอินทรีย์ระเหย โทลูอินเริ่มต้น	0, 50, 100, 150 และ 200	ppmv
ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ไอของสารประกอบอินทรีย์ ระเหยโทลูอิน	0, 5 10, 15, 25, 35, 45, 60, 75 และ 90	นาที
ความเข้มข้นไอของ สารประกอบอินทรีย์ระเหยอะ ซิโตนเริ่มต้น	0, 500, 1000, 1500 และ 2000	ppmv
ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง ไอของสารประกอบอินทรีย์ ระเหยอะซิโตน	0, 2 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 20	นาที

สถานที่ทำการวิจัยและระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม 2 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

ระยะเวลาที่ทำการวิจัยเริ่มต้นตั้งแต่เดือนมกราคม 2548 ถึงเดือน กุมภาพันธ์ 2549

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลการศึกษาด้านผลศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดซับผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย
2. ข้อมูลการศึกษาด้านผลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยเปรียบเทียบข้อมูลด้านผลศาสตร์ของแหล่งกำเนิดแสงจากหลอด Incandescent Blacklights และ หลอด UV High Pressure Mercury Vapour ที่ความเข้มแสงแตกต่างกัน ซึ่งหลอดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีข้อได้เปรียบในด้านความปลอดภัย การติดตั้ง รวมทั้งในด้านของราคา ทำให้มีศักยภาพที่จะประยุกต์ใช้งานได้อย่างแพร่หลาย
3. ข้อมูลของประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหย โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกออกซิเดชัน ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเตรียมในลักษณะที่แตกต่างกัน

แหล่งทุนสนับสนุน

ทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. การศึกษาหาลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

ในการศึกษาหาลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมขึ้นใน 4 ลักษณะ คือ

แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการพ่น 1 ด้าน

แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

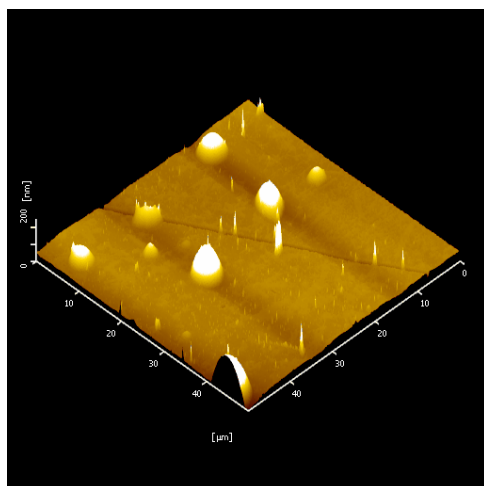
แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

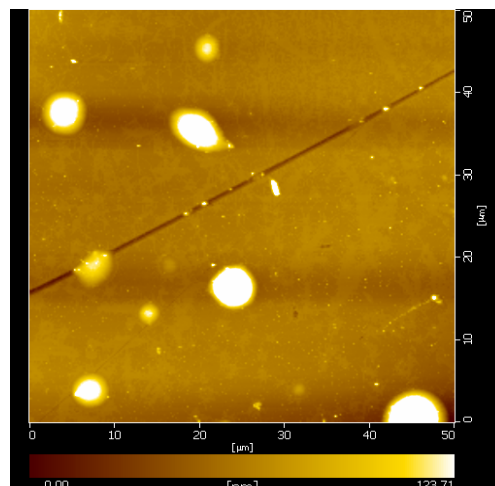
แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยลักษณะที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า พบว่า แผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการพ่นจะมีลักษณะฟิล์มบางสีขาวขุ่นเคลือบอยู่ทั่วบริเวณแผ่นกระจก เช่นเดียวกันกับแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางสีขาวขุ่นเช่นกัน แต่แผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบจะมีแผ่นฟิล์มที่มีสีขุ่นกว่าแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการพ่น ในส่วนของแผ่นกระจกที่เคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นเม็ดละเอียดสีขาวเคลือบอยู่ทั่วบริเวณผิวของแผ่นกระจกอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาภาพถ่ายโดยอุปกรณ์ AFM แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการพ่น 1 ด้าน สามารถเห็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวในลักษณะอนุภาคเดี่ยวๆอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งแตกต่างกับแผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม คือ แผ่นกระจกดังกล่าวจะมีการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทั่วบริเวณของแผ่นกระจก แต่ไม่สามารถเห็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคแยกกันอย่างชัดเจน ในลักษณะเดียวกันกับแผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก ซึ่งมีขนาด 0.5-1 ไมครอน ไม่กระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆอย่างชัดเจน โดยมีลักษณะรวมตัวกันและไม่สามารถมองเห็นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในลักษณะที่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆได้ เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวโดยใช้

อุปกรณ์ AFM ที่กำลังขยายสูง พบว่าอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่กระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ

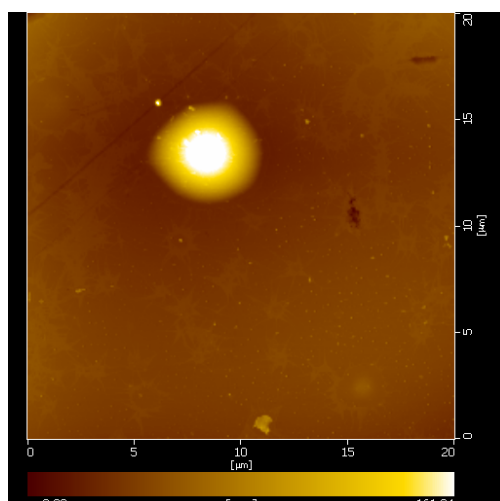
เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของแผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการพ่น (ภาพที่ 8) จะเห็นได้ว่ามีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวอยู่น้อยมาก ดังนั้นในการทดลองจึงไม่นำแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีดังกล่าวมาทำการทดลอง อย่างไรก็ตามภาพแสดงลักษณะพื้นผิวที่ได้จากอุปกรณ์ AFM ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10 อาจไม่สามารถอธิบายลักษณะพื้นผิวได้อย่างชัดเจนว่า บริเวณใดคือผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์และบริเวณใดคือผิวของตัวกลาง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวบนแผ่นกระจกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 ลักษณะ จากภาพที่ 8ข. จะเห็นว่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการพ่นจะมีน้อยกว่าการเตรียมโดยวิธีอื่นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการจุ่มและใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นกระจกดังแสดงในภาพที่ 9ข. และ 10ข. จะเห็นว่าไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่า แผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการแบบใดมีความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพของแผ่นกระจกที่เตรียมขึ้น ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า แผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่าแผ่นกระจกที่เตรียมโดยวิธีการจุ่ม สำหรับขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการศึกษา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ มีขนาด 0.5-1 ไมครอน อธิบายได้ว่าลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่รวมตัวเป็นกลุ่มติดกันโดยไม่มีช่องว่าง แต่สามารถอธิบายได้ว่าวิธีการเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มากกว่าวิธีการเคลือบโดยวิธีการจุ่มอย่างชัดเจน (ภาพที่ 9 และ 10) เมื่อพิจารณาปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่ใช้มีปริมาณเพียง 3.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความเข้มข้นน้อยกว่าผงไทเทเนียมไดออกไซด์



ก)

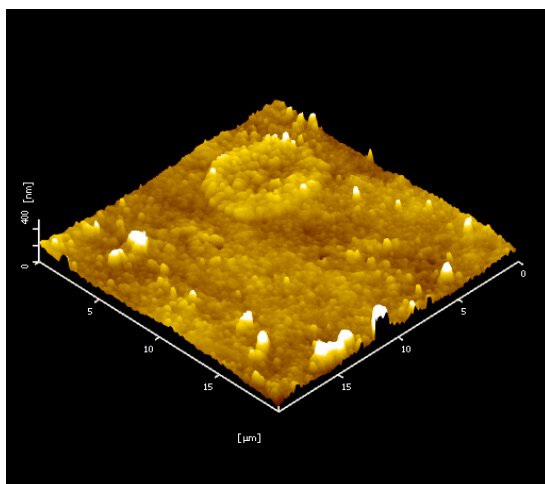


ข)

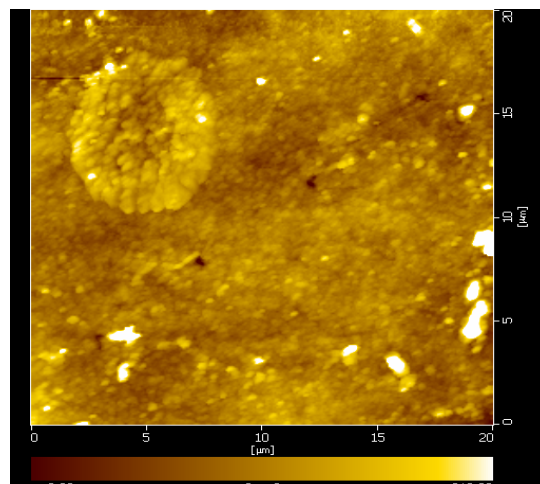


ค)

ภาพที่ 8 แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการพ่น ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ

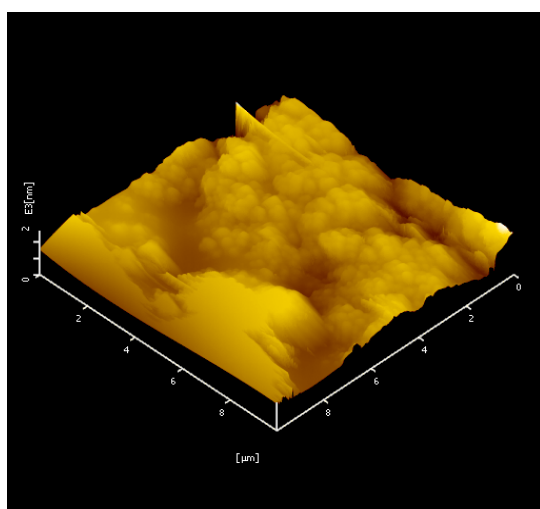


ก)

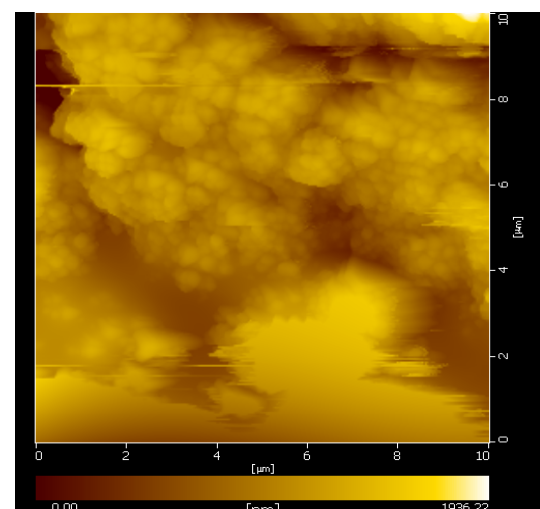


ข)

ภาพที่ 9 แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม



ก)



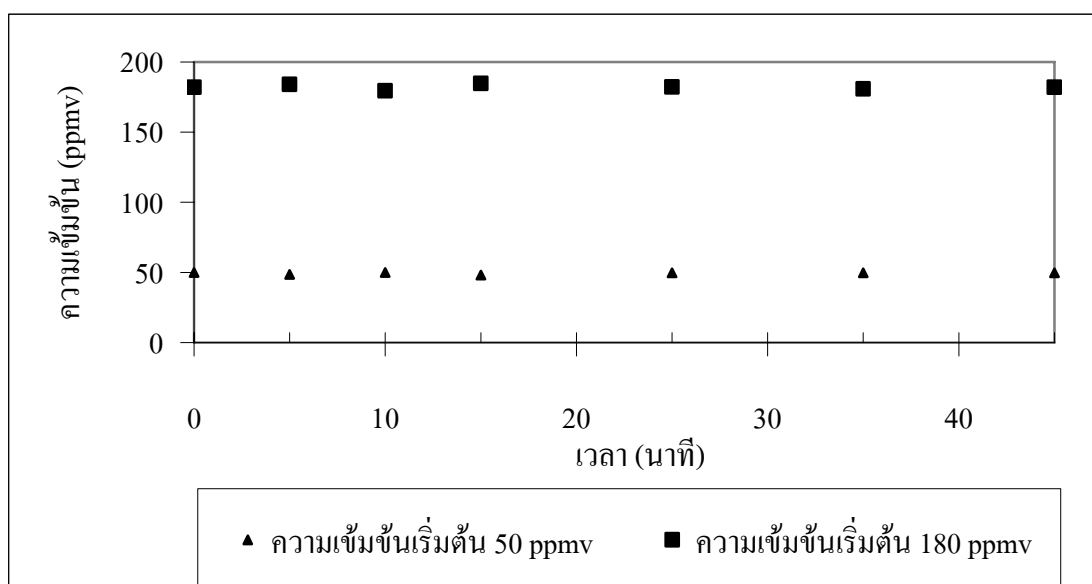
ข)

ภาพที่ 10 แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูดัดผิวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กระบวนการโฟโตออกซิเดชันที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูดัดผิวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นชุดควบคุม

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูดัดผิวของถังปฏิกิริยาที่เป็นชุดควบคุม ทำให้ทราบถึงค่าการคูดัดผิวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (ppmv) กับเวลา(นาที) ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นชุดควบคุม โดยใช้แผ่นกระจกไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด

จากภาพที่12 แสดงให้เห็นว่าผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูดัดผิวในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์โดยใช้แผ่นกระจกไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มืด มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโทลูอินน้อยมาก ทำให้ทราบว่าถังปฏิกิริยาไม่มีการดูดซับโทลูอิน ทำให้สามารถตัดปัจจัยด้านการดูดซับในถังปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาไม่มีการรั่วซึม

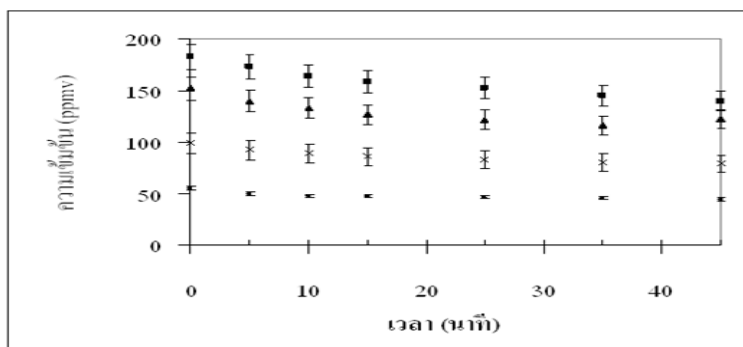
2.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน

จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดติดผิวของโทลูอินในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นระบบปิดในที่มืด ทำให้สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดติดผิวของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังแสดงในภาพที่ 12

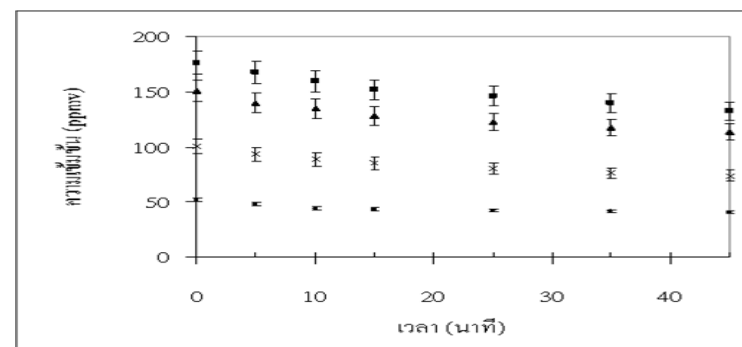
จากภาพที่ 12 แสดงถึงการดูดติดผิวของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมในลักษณะที่แตกต่างกันในสถานะที่ทดลองในที่มืด ซึ่งใช้จำนวนชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 4 ชุด จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาดูดติดผิวของโทลูอินบนตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าการดูดติดผิว (Adsorption) เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยหลังจากเวลาผ่านไปปฏิกิริยาในลำดับต่อมาจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลง

เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที พบว่า ปริมาณโทลูอินที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 180 ppmv สามารถดูดติดในปริมาณที่สูงที่สุดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีเคลือบผิวแบบจุ่ม 1 ด้านและ 2 ด้าน มีค่าเท่ากับ 31.96 และ 35.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส และในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมโดยวิธีใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นกระจก พบว่า ปริมาณโทลูอินที่มีความเข้มข้น 180 ppmv สามารถดูดติดในปริมาณที่สูงที่สุดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้คิดเป็น 36.24 และ 12.76 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 46 และ 56 องศาเซลเซียส ณ เวลาเดียวกัน

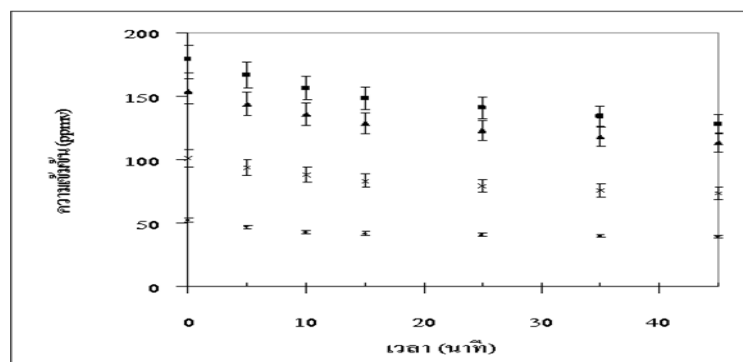
ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่ากลไกการดูดติดผิวของปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อปริมาณการดูดติดผิวสูงขึ้น การดูดติดผิวก็จะเกิดการดูดติดผิวทับถมกันเป็นหลายๆชั้น ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารที่ถูกดูดติดผิวจึงลดลงพันธะที่เกิดขึ้นจึงแข็งแรงน้อยกว่าในกรณีที่ปริมาณการดูดติดผิวน้อย เช่นเดียวกับหลักการทำงานของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) ซึ่งใช้แยกอนุภาคฝุ่นจากก๊าซโดยแยกอนุภาคไปสะสมบนแผ่นเก็บประจุ เมื่อชั้นอนุภาคเกิดทับถมที่ผิวหน้ามากขึ้น ความหนาของชั้นอนุภาคเพิ่มขึ้น อนุภาคที่อยู่ใกล้กับแผ่นเก็บประจุมากที่สุดจะเสียประจุไปเกือบทั้งหมดทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นเก็บประจุกับอนุภาคเหล่านี้นี้ลดลง (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2540)



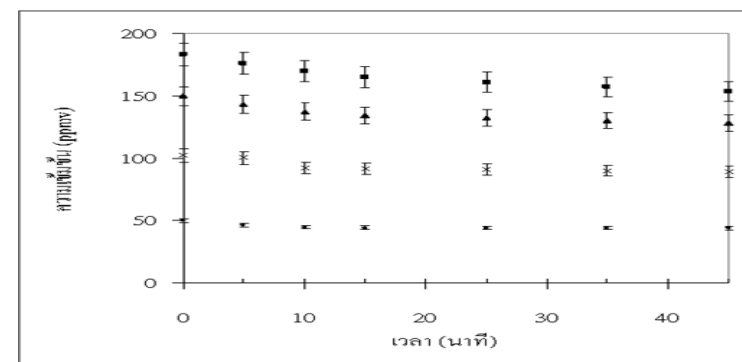
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ข) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ค) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ง) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C

- ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppmv * ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppmv ▲ ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppmv ■ ความเข้มข้นเริ่มต้น 180 ppmv

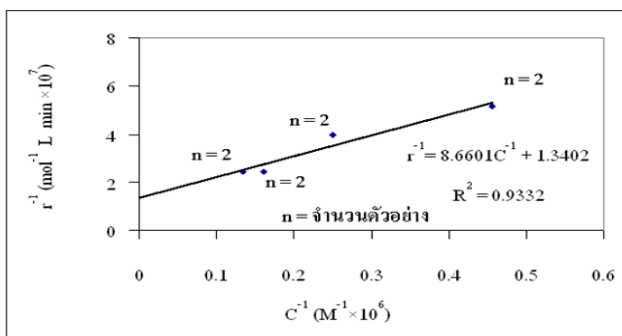
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ กรณีทำการทดลองในที่มืด

นอกจากนี้กลไกการดูดติดผิวของโพลูอินดังกล่าว จะเกิดได้มากหรือน้อยเพียงใดยังขึ้นอยู่กับปัจจัยของการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่า ในกรณีที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาแน่นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น

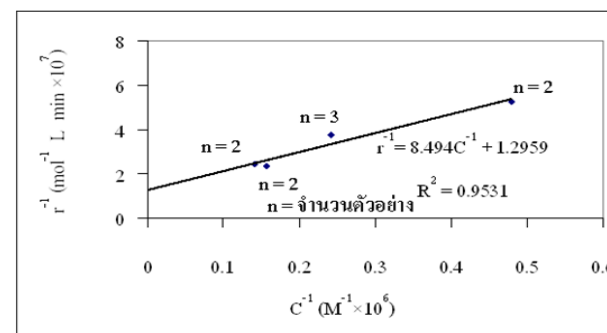
รวมทั้งในกรณีที่ความเข้มข้นของโพลูอินเริ่มต้นมีผลต่อกลไกการดูดติดผิวโดยตรง คือ เมื่อความเข้มข้นของโพลูอินเริ่มต้นมีค่ามากจะส่งผลให้ปริมาณโพลูอิน สามารถดูดติดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้รวดเร็วยิ่งขึ้น จนกระทั่งความเข้มข้นของโพลูอินเริ่มต้นสูงขึ้นมาที่สุดค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวของโพลูอินในสถานะก๊าซ ดังแสดงในภาพที่ 12

สำหรับสมการที่ใช้อธิบายกลไกการดูดติดผิวเพื่อหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ สมการในรูปแบบของ Langmuir Hinshelwood (L-H kinetic model) เนื่องจากเมื่อทำการทดลองกลไกการดูดติดผิวเพื่อหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของโพลูอิน พบว่าเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นและค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโพลูอินที่เวลา 10 นาที กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นกราฟอิ่มตัว (Saturation Type)

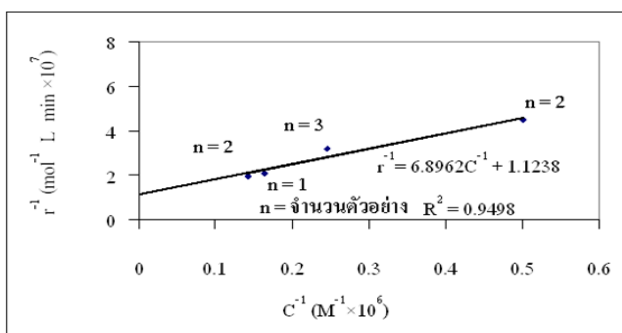
เมื่อทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาดูดติดผิว เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโพลูอินบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งหาค่าตัวแปรต่างๆได้จากการทดลองและสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโพลูอิน และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโพลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r^{-1}) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโพลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นแตกต่างกัน 3 ลักษณะ ได้ตามสมการในรูปแบบของ L-H (สมการที่ 16) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6



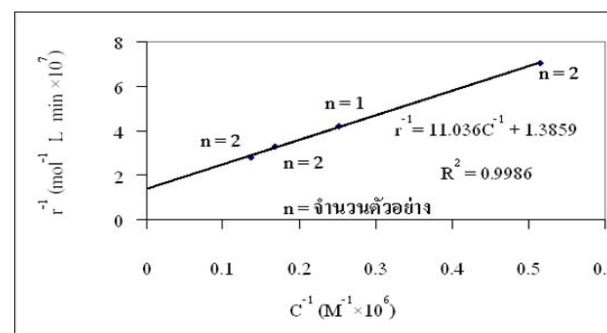
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ข) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ค) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



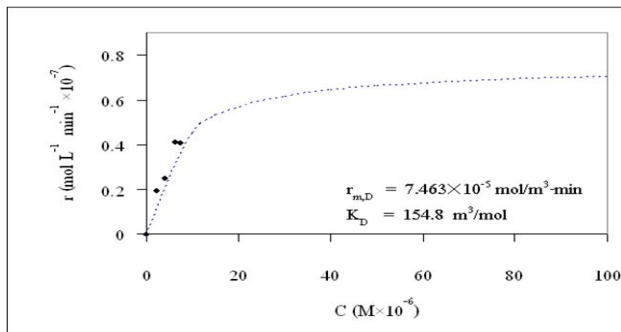
(ง) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C

ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาจุดติดผบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) กรณีทำการทดลองในที่มืด

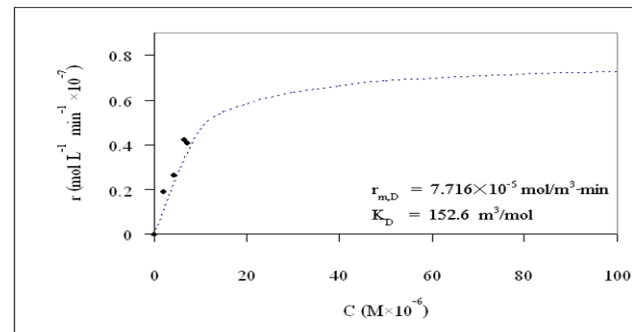
ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาาคูดัดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์	อุณหภูมิ, ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าคงที่ในปฏิกิริยาาคูดัดผิว	
		$r_{m,D}$, $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}}\right)$	K_D , $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}\right)$
เคลือบ 1 ด้าน	46	7.463×10^{-5}	154.8
เคลือบ 2 ด้าน	46	7.716×10^{-5}	152.6
ผงเคลือบ 2 ด้าน	46	8.897×10^{-5}	163.0
ผงเคลือบ 2 ด้าน	56	7.215×10^{-5}	125.6

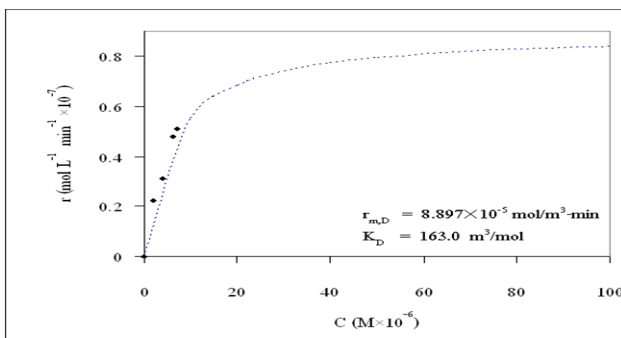
เมื่อนำค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากกราฟและการคำนวณดังแสดงในตัวอย่างการคำนวณภาคผนวก ก. แล้วแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาาคูดัดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถแสดงได้ในภาพที่ 14



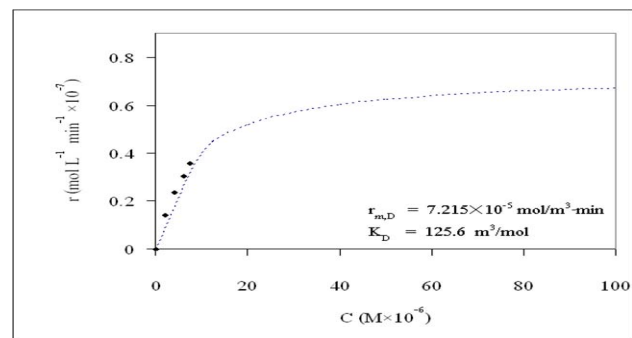
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ข) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ค) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C



(ง) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C

----- อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการในรูปแบบของ L-H ♦ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง

ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r) จากการทดลองจริงและจากการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H กรณีทำการทดลองในที่มืด

จากข้อมูลจากตารางที่ 6 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจุดติดผิวสูงสุด($r_{m,D}$) ในสมการในรูปแบบของ L-H มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก พบว่าค่า $r_{m,D}$ มีความสัมพันธ์ กับปริมาณของของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจก โดย $r_{m,D}$ จะแปรผันตรงกับปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ดังแสดงในตารางที่ 6 ค่า $r_{m,D}$ ของปฏิกิริยาจุดติดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าค่า $r_{m,D}$ ของปฏิกิริยาจุดติดผิวจะสูงขึ้น เมื่อปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกเพิ่มขึ้น และค่า $r_{m,D}$ จะมีค่าต่ำลง เมื่อปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์บนแผ่นกระจกลดลง

ในกรณีของการเกิดปฏิกิริยาจุดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เตรียมโดยวิธีใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นกระจก 2 ด้าน พบว่าค่า $r_{m,D}$ จะลดต่ำลงซึ่งเป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิในสภาวะทดลองเพิ่มขึ้นจาก 46 องศาเซลเซียส เป็น 56 องศาเซลเซียส ทำให้ค่า $r_{m,D}$ ลดต่ำลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินลดลง (Charles N. S., 1991)

2.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน โดยใช้แสงจากหลอดอัลตราไวโอเลต

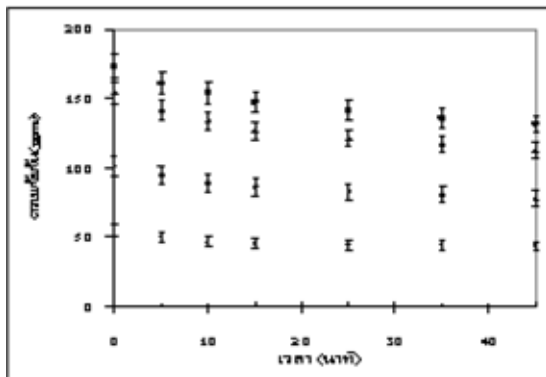
ในขั้นตอนแรกจะทำการตรวจสอบว่าค่าพลังงานของแสงอัลตราไวโอเลตมีเพียงพอที่จะเกิดกระบวนการโฟโตออกซิเดชันหรือไม่ สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ของ Planck เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลองดังแสดงภาคผนวก ก. ซึ่งพบว่ามีค่าพลังงานเพียงพอที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

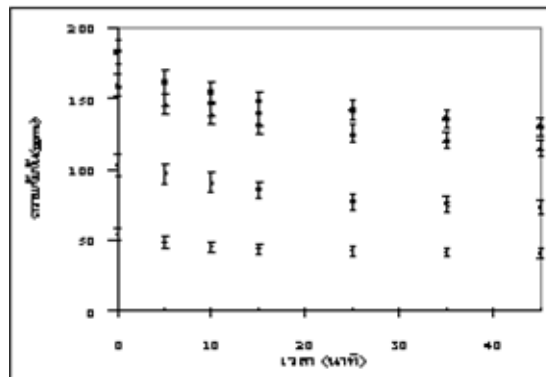
3.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินในกรณีใช้แสงอัลตราไวโอเลต

จากผลการศึกษาดังกล่าว สำหรับกรณีใช้แสงจากหลอด UV Incandescent Blacklight ทำให้สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังแสดงในภาพที่ 15 และในกรณีใช้แสงจากหลอด UV High Pressure Mercury Vapour สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับผิวของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังแสดงในภาพที่ 16

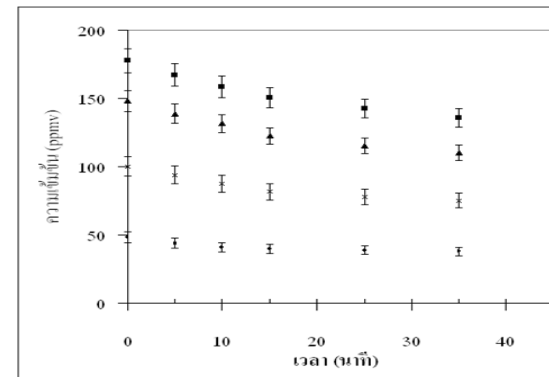
เมื่อทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของโทลูอินบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งหาค่าตัวแปรต่างๆได้จากการทดลองและสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นของโทลูอิน และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ส่วนกลับของความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (r^{-1}) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 16 โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นแตกต่างกัน 3 ลักษณะ ได้ตามสมการในรูปแบบของ L-H ดังแสดงในตารางที่ 7



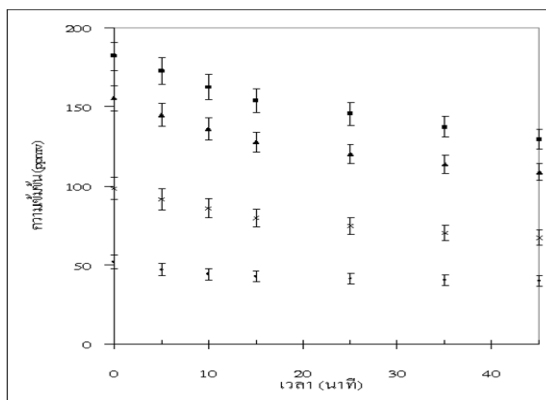
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



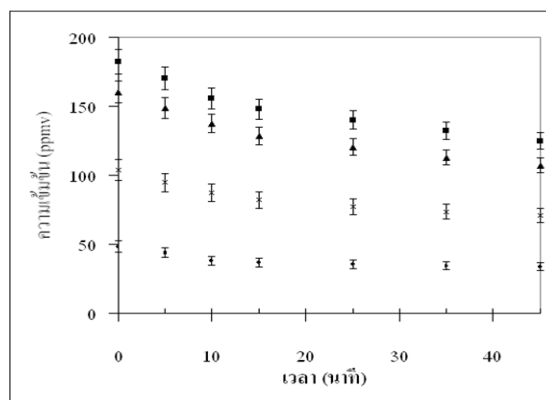
(ข) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



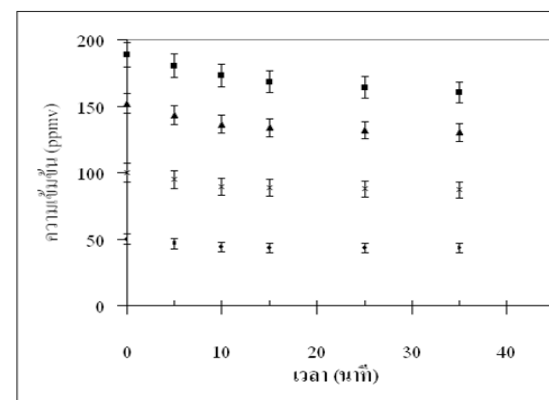
(ค) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



(ง) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$



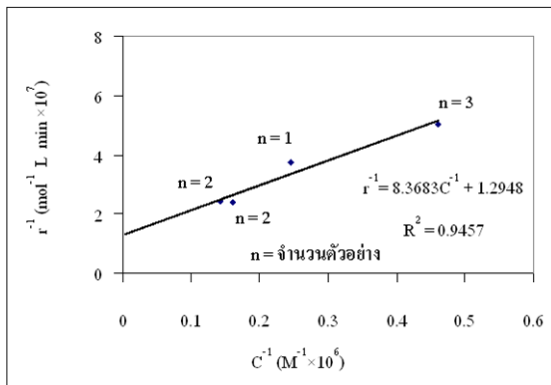
(จ) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 W/cm^2



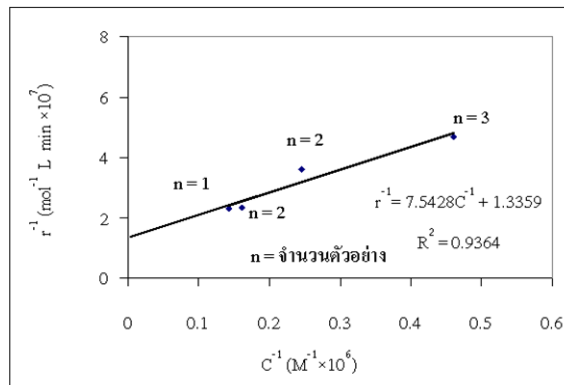
(ฉ) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C และ 1230.0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

- ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppmv * ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppmv ▲ ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 ppmv ■ ความเข้มข้นเริ่มต้น 180 ppmv

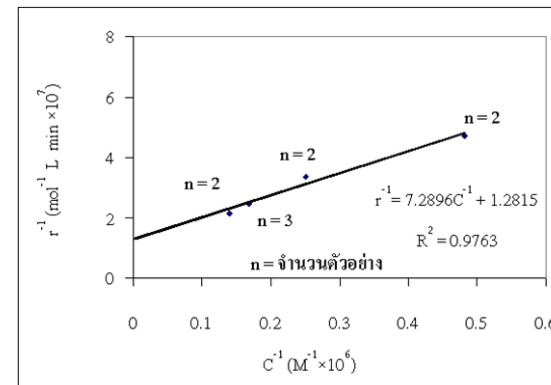
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์
กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง



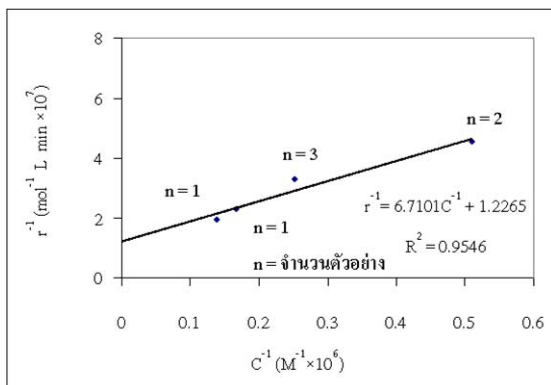
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 μW/cm²



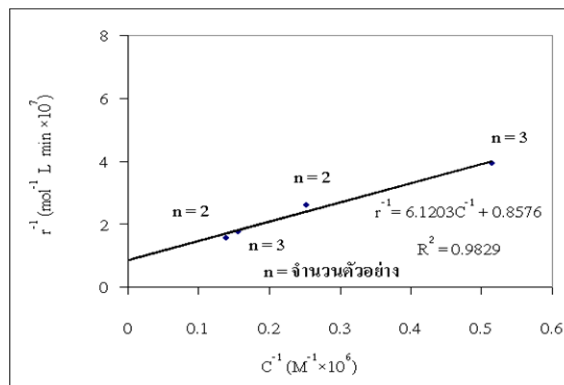
(ข) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



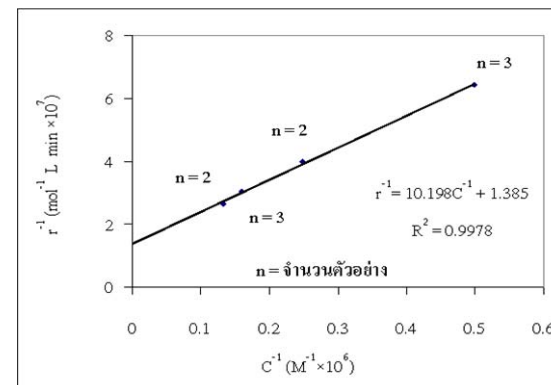
(ค) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 μW/cm²



(ง) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



(จ) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



(ฉ) เคลือบผ 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C และ 1230.0 W/cm²

ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง

ตารางที่ 7 ค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน

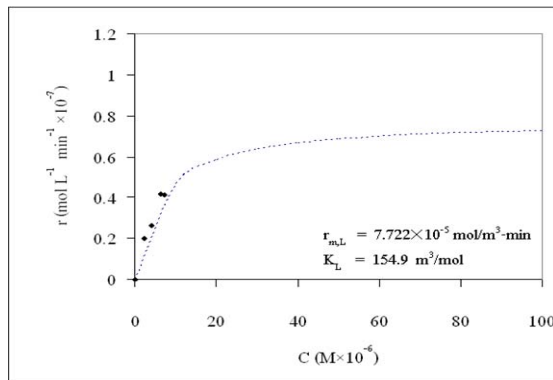
ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์	ความเข้มแสง ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	อุณหภูมิ, ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าคงที่ในปฏิกิริยา	
			$r_{m,L}$, $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}}\right)$	K_L , $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol}}\right)$
เคลือบ 1 ด้าน	165.7	46	7.722×10^{-5}	154.9
	193.3	46	7.485×10^{-5}	177.1
เคลือบ 2 ด้าน	165.7	46	7.800×10^{-5}	175.9
	193.3	46	8.150×10^{-5}	182.9
ผงเคลือบ 2 ด้าน	193.3	46	1.166×10^{-4}	140.2
	1230.0	56	7.220×10^{-5}	135.8

และเมื่อนำค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากกราฟและการคำนวณดังแสดงในตัวอย่างการคำนวณภาคผนวก ก. แล้วแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถแสดงได้ในภาพที่ 17

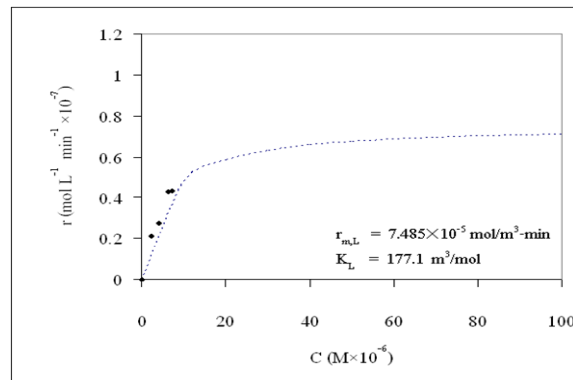
จากผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ทำให้ทราบว่าความเข้มแสงมีส่วนทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งเห็นได้จากผลการทดลองเมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $193.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ จะทำให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันสูงสุด ($r_{m,L}$) มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ $165.7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส) แต่ในทางกลับกันเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเป็น $1230 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ส่งผลให้อุณหภูมิในถังปฏิกิริยาสูงขึ้น ทำให้การคูดัดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่ผิวกระจกเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิดผิวสูงสุด ($r_{m,D}$) เกิดขึ้นได้ไม่ดี

ในส่วนของการเตรียมแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการเตรียมแผ่นกระจกโดยวิธีเคลือบผงแบบ 2 ด้าน จะทำให้ $r_{m,L}$ ในกระบวนการสูงกว่าการเตรียมแผ่นกระจกโดยวิธีการแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในการเตรียมแผ่นกระจกโดยวิธีการเคลือบผง 2 ด้าน ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาคูคิดผิว และเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จะเกิดปฏิกิริยากับไอของ

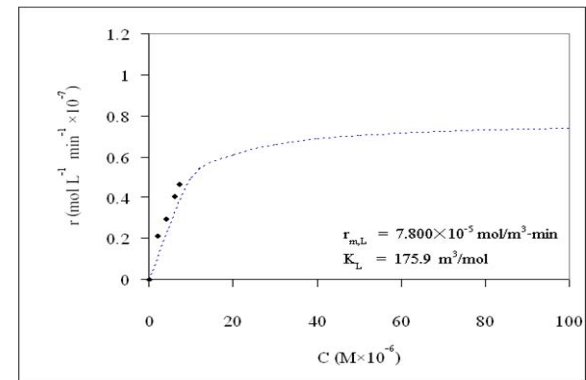
สารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาการใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะที่ทำให้ค่า $r_{m,L}$ สูงที่สุด พบว่าที่สภาวะที่มีการใช้แสงที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ $193.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ร่วมกับแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส โดยที่สภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ทำให้ค่า $r_{m,L}$ สูงสุดเท่ากับ $1.166 \times 10^{-4} \text{ mol}/\text{m}^3\text{-min}$ ของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน และที่สภาวะดังกล่าวจะใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนต่อไป



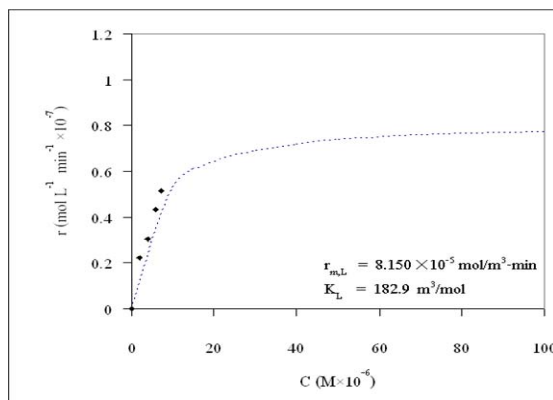
(ก) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 μW/cm²



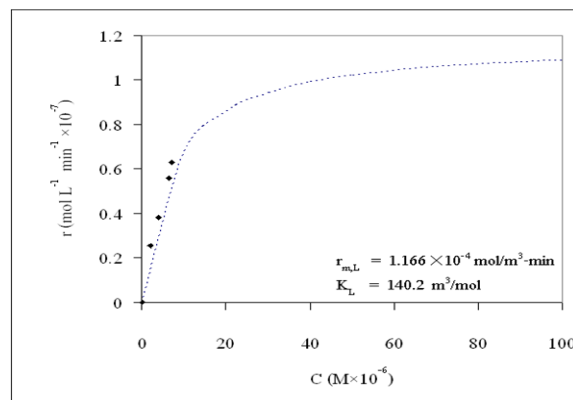
(ข) เคลือบ 1 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



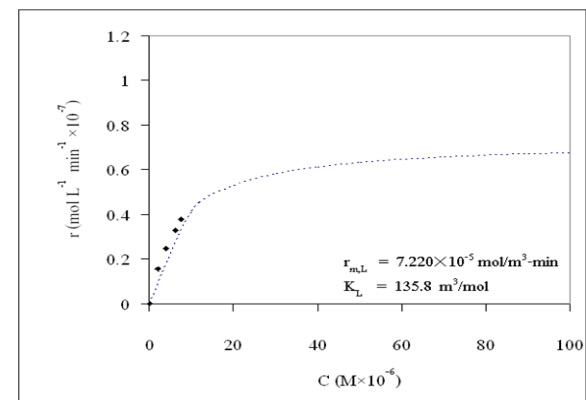
(ค) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 165.7 μW/cm²



(ง) เคลือบ 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



(จ) เคลือบพวง 2 ด้าน อุณหภูมิ 46 °C และ 193.3 μW/cm²



(ฉ) เคลือบพวง 2 ด้าน อุณหภูมิ 56 °C และ 1230.0 W/cm²

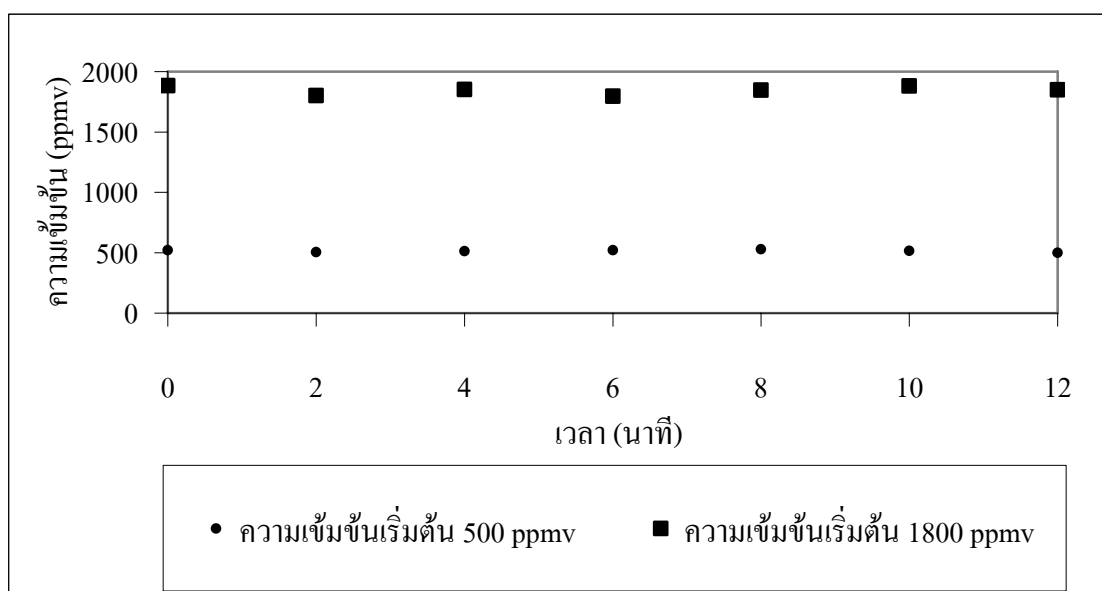
----- อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการในรูปแบบของ L-H ♦ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง

ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r) จากการทดลองจริงและจากการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H กรณีทำการทดลองโดยใช้แสง

4. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นหุคควบคุม

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคูคติดผิวของถังปฏิกิริยาทำให้ทราบถึงค่าการคูคติดผิวของไอของอะซิโตนในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียสซึ่งผลการศึกษาดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน (ppmv) กับเวลา(นาท) ในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์โดยใช้แผ่นกระจกไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มีค

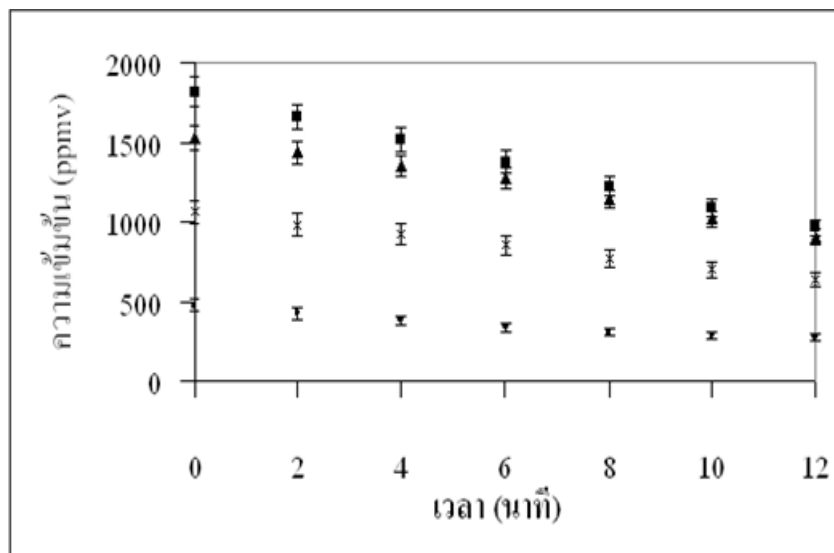
จากภาพที่ 18 แสดงให้เห็นผลจากการศึกษาการคูคติดผิวในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์โดยใช้แผ่นกระจกไม่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในที่มีค มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะซิโตนน้อยมาก ทำให้ทราบว่าถังปฏิกิริยาไม่มีการคูคตอะซิโตน ทำให้สามารถตัดปัจจัยด้านการคูคตอะซิโตนในถังปฏิกิริยาได้

4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน

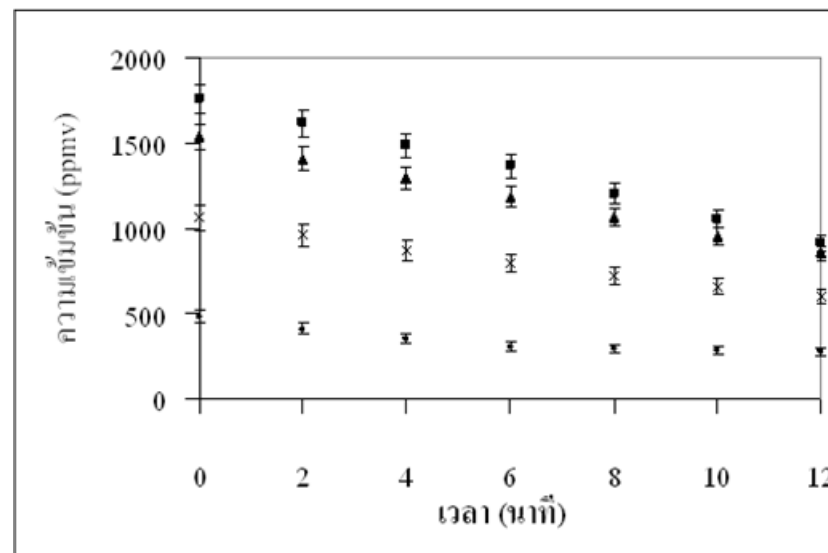
จากการทดลองสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดติดผิวของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบหาความเข้มข้นของอะซิโตนที่เหลืออยู่ เมื่ออะซิโตนผ่านการดูดติดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆกันจนการดูดติดผิวเข้าสู่ภาวะสมดุล คือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะซิโตนที่เหลืออยู่ในถังปฏิกิริยาน้อยมาก หรือไม่มีการดูดติดผิวของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามากไปกว่านี้แล้ว โดยช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล ได้แก่ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 20 นาที ดังแสดงในภาพที่ 19 d.

จากภาพที่ 19 ก. แสดงถึงการดูดติดผิวของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่ทดลองในที่มืด จากการศึกษาดูจลนพลศาสตร์การดูดติดผิวดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วง 6 นาทีแรก โดยหลังจากเวลาผ่านไป 8 นาที และปฏิกิริยาในลำดับต่อมาจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลง จากนั้นใช้เวลาประมาณ 8 นาทีเพื่อที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุล

เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที พบว่า ปริมาณอะซิโตนที่มีความเข้มข้น 1800 ppmv สามารถดูดติดในปริมาณที่สูงที่สุดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นกระจก พบว่า ปริมาณอะซิโตนที่มีความเข้มข้น 1800 ppmv สามารถดูดติดในปริมาณที่สูงที่สุดบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้คิดเป็น 60.22 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส



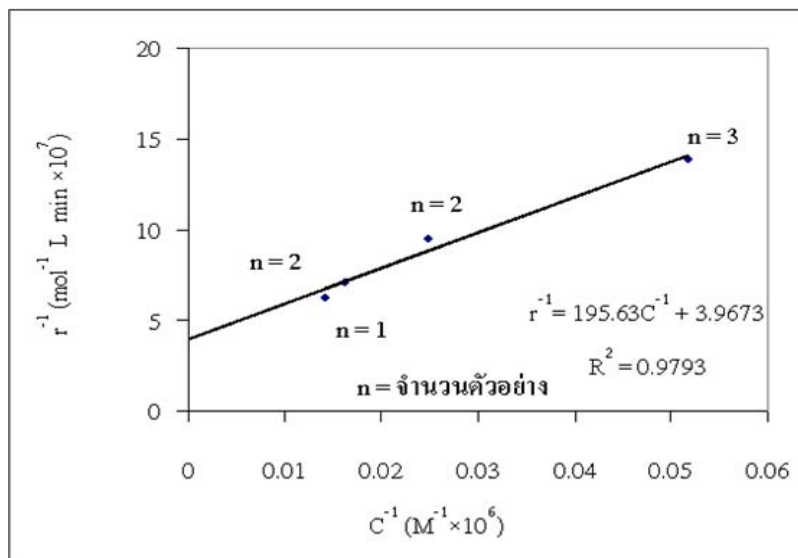
(ก) ในที่มีค



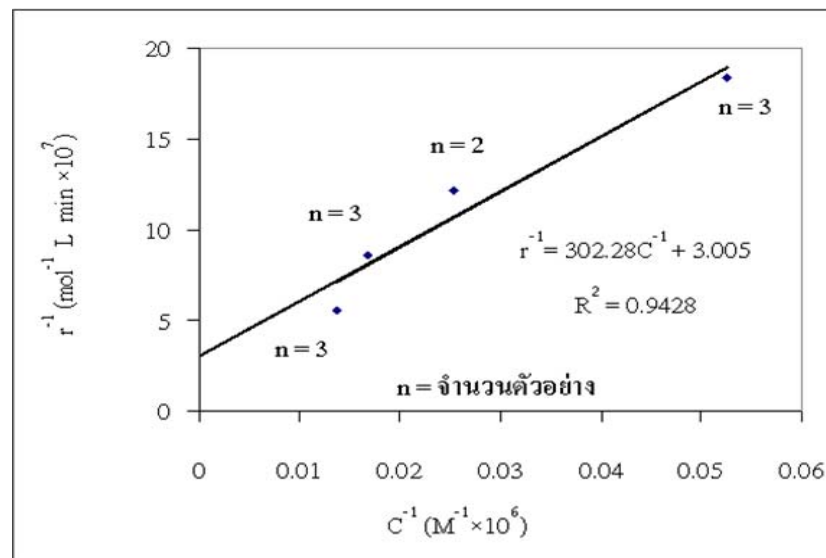
(ข) ความเข้มแสง 193.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

- ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppmv ○ ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ppmv * ความเข้มข้นเริ่มต้น 1500 ppmv ▲ ความเข้มข้นเริ่มต้น 1800 ppmv ■

ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน กับเวลา โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน และ อุณหภูมิ 46 °C



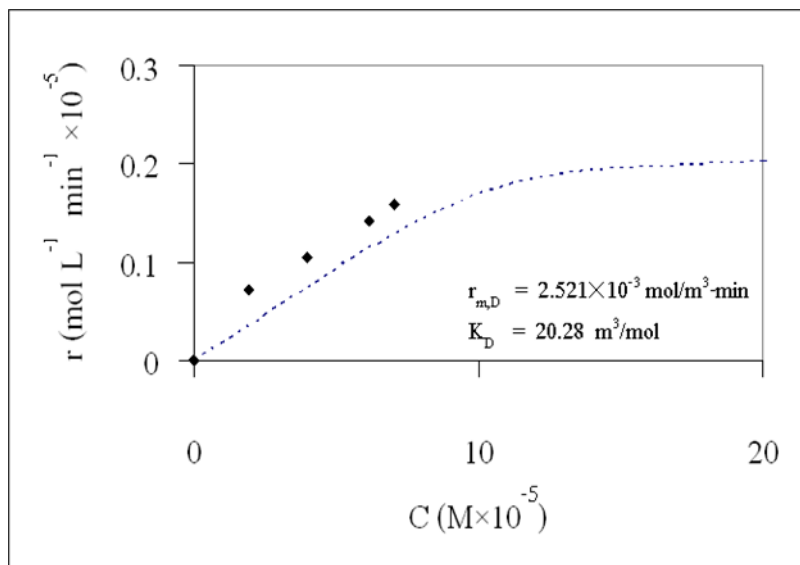
(ก) ในที่มืด



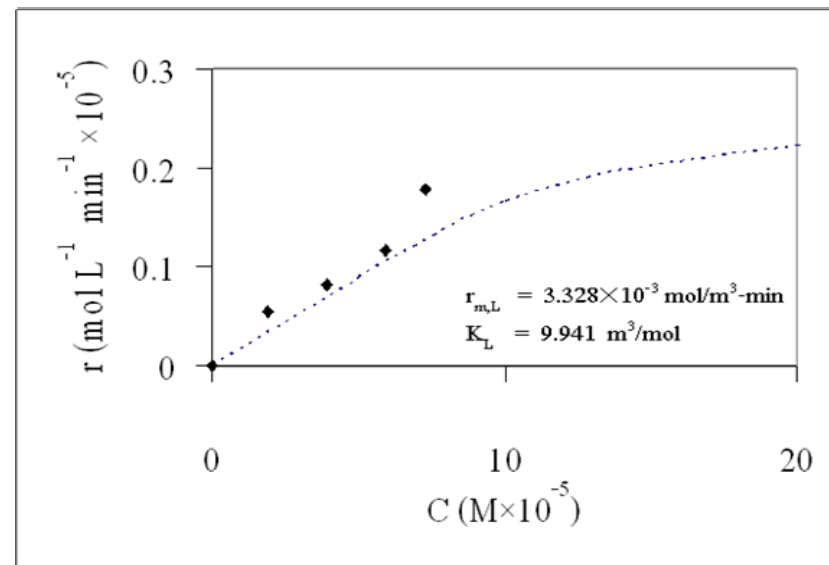
(ข) ความเข้มแสง 193.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

- ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 ppmv * ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 ppmv ▲ ความเข้มข้นเริ่มต้น 1500 ppmv ■ ความเข้มข้นเริ่มต้น 1800 ppmv

ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1})



(ก) ในที่มีมืด



(ข) ความเข้มแสง 193.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

----- อัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการในรูปแบบของ L-H ♦ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากการทดลอง

ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์อะซีโตน (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

(r) จากการทดลองจริงและจากการแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H

เมื่อทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาดูดติดผิวเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งหาค่าตัวแปรต่างๆได้จากการทดลองและสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากับค่าความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (r^{-1}) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 20 ก. โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาดูดติดผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน ได้ตามสมการในรูปแบบของ L-H ได้ ดังแสดงในตารางที่ 8

4.3 การศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนในกรณีใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต

จากผลการศึกษาดังกล่าว สำหรับกรณีใช้แสงจากหลอด UV Incandescent Blacklight ที่มีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ 2 ด้าน ในสภาวะทดลองที่มีค่าความชื้นเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิเท่ากับ 46 องศาเซลเซียส ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่มีค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวสูงสุด เมื่อทำการทดลองกับโทลูอิน ผลการศึกษาดังกล่าวทำให้สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดติดผิวของโทลูอินบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ดังแสดงในภาพที่ 19 ข.

เมื่อทำการศึกษากลไกของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของอะซิโตนในสภาวะกึ่งชนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งหาค่าตัวแปรต่างๆได้จากการทดลองและสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้น กับ ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของอะซิโตน และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ส่วนกลับของความเข้มข้นเริ่มต้น (C^{-1}) กับ ส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (r^{-1}) ของอะซิโตนได้ ดังแสดงในภาพที่ 20 ข. โดยจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของอะซิโตนบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นแตกต่างกัน 3 ลักษณะ ได้ตามสมการในรูปแบบของ L-H ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน

ความเข้มแสง ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์	อุณหภูมิ, ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าคงที่ในปฏิกิริยา	
			$r_m, \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \text{ min}} \right)$	$K, \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \right)$
ที่มีด	ผงเคลือบ 2 ด้าน	46	2.521×10^{-3}	20.28
193.313	ผงเคลือบ 2 ด้าน	46	3.328×10^{-3}	9.94

และเมื่อนำค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากกราฟและการคำนวณดังแสดง แล้วแทนค่าในสมการในรูปแบบของ L-H เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้น (C) กับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจุดตัดผิวเริ่มต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาของอะซิโตน สามารถแสดงได้ในภาพที่ 21 ข.

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน สำหรับสถานะที่ใช้ทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่มีด กับกรณีที่ใช้สถานะที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันจากการทดลองของโทลูอิน จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปในทำนองเดียวกันกับโทลูอิน แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันสูงสุด ($r_{m,L}$) ของอะซิโตนจะมีค่าสูงกว่าโทลูอิน ซึ่งคาดว่าเนื่องจากโครงสร้างและลักษณะพันธะของอะซิโตนแข็งแรงน้อยกว่าโทลูอิน ดังนั้นปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันจึงเกิดได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับในกรณีของโทลูอินซึ่งมีพันธะที่แข็งแรงกว่า

5. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

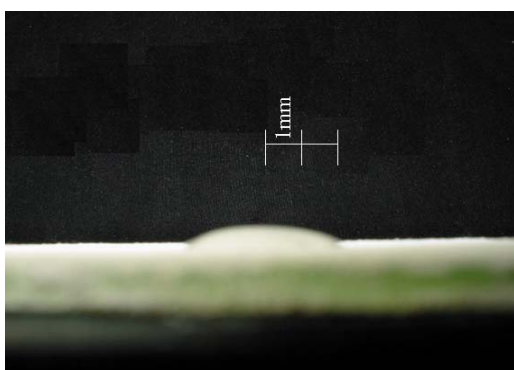
สำหรับผลการศึกษาลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นให้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 22



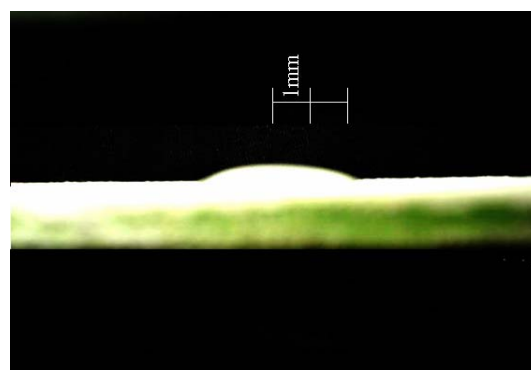
ก. ก่อนทำการทดลอง



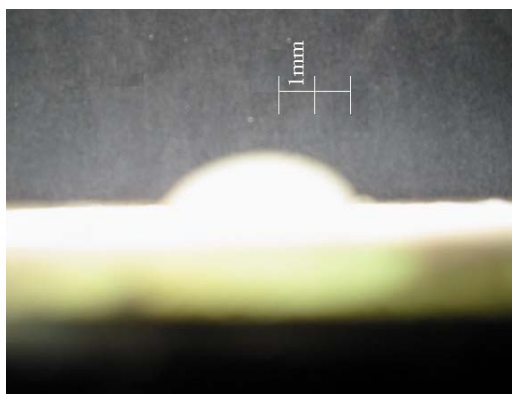
ข. ทดลองในกรณีใช้แสง
แต่ไม่มีสารประกอบอินทรีย์ระเหย



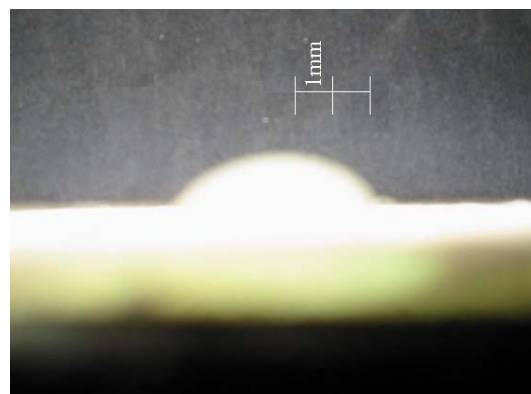
ค. ทดลองกับโทลูอินในที่มืด



ง. ทดลองกับโทลูอินในกรณีใช้แสง



จ. ทดลองกับอะซิโตนในที่มืด



ฉ. ทดลองกับอะซิโตนในกรณีใช้แสง

ภาพที่ 22 มุมสัมผัสของหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

จากภาพที่ 22 แสดงภาพด้านข้างของลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งภาพที่ 22 ก. และ 22 ข. แสดงให้เห็นว่าแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะพื้นผิวเป็นแบบชอบน้ำ (Hydrophilic) ก่อนที่จะนำไปทดลองกับสารประกอบ

อินทรีย์ระเหย แต่เมื่อแผ่นกระจกดังกล่าวผ่านการทดลองกับโทลูอินและอะซิโตน ทั้งในกรณีที่ทำการทดลองในที่มืดและกรณีที่ใช้แสงแล้ว พบว่าลักษณะของพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลง จากพื้นผิวที่เป็นแบบชอบน้ำเป็นพื้นผิวที่เป็นแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ดังแสดงในภาพที่ 22 ค.-22 จ. สำหรับภาพดังกล่าวจะไม่แสดงภาพด้านบนของลักษณะของหยดน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนแผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของลักษณะหยดน้ำได้ชัดเจน

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นทั้งโทลูอินและอะซิโตน พบว่าแนวโน้มของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับสมการในรูปแบบของ L-H (สมการที่ 18)

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_{\max}} + \frac{1}{r_{\max}K[C]}$$

อย่างไรก็ตามการประเมินดังกล่าวจะมีความคลาดเคลื่อนของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากสมการที่ใช้ในการอธิบายกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการที่จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ 20 คือ

$$y = ax + b \quad (20)$$

ซึ่งสมการเส้นตรงโดยทั่วไป a และ b เป็นค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับตัวแปรใดๆ แต่ในกรณีสมการเส้นตรงที่นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น

สังเกตได้ว่า เมื่อกำหนดให้ $a = \frac{1}{r_{\max}K}$ และ $b = \frac{1}{r_{\max}}$ จะเห็นว่าตัวแปร a และ b จะสัมพันธ์กันโดยทั้ง a และ b จะไม่เป็นอิสระต่อกัน เช่นเดียวกับในกรณีของกราฟความมอดสัมพันธ์ของส่วนกลับของ Lineweaver-Burk ที่จัดรูปเป็นสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ (21)

$$\frac{1}{v} = \frac{k_m}{v_{\max}[S]} + \frac{1}{v_{\max}} \quad (21)$$

โดยสมการ Lineweaver-Burk อธิบายค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{v}$ และ $\frac{1}{[S]}$ เมื่อ $[S]$ เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยส่งผลต่อความชันของกราฟ ในขณะที่ $[S]$ ที่มีค่าน้อยๆ จะเกิดความคลาดเคลื่อนที่น้อย (Wiseman, 1995) จากคำอธิบายของสมการ Lineweaver-Burk ทำให้สามารถประเมินแนวโน้มของค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น เมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นจะมีค่ามากกว่ากรณีเปรียบเทียบกับค่าที่ประเมินแนวโน้มอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง 4 จุด โดยเฉพาะในช่วงที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ ทำให้การประเมินแนวโน้มมีการคลาดเคลื่อน เนื่องจากเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่ามากขึ้นจนอัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าใกล้ค่า $r_{\max}$ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าหนึ่งซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากการประเมินแนวโน้มอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ประเมินโดยค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมีการกระจายตัวของข้อมูลไม่เพียงพอ คือในส่วนข้อมูลการทดลองเมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงที่กำลังเพิ่มขึ้น และช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ซึ่งสภาวะดังกล่าวค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวจะมีค่าสูงมาก โดยมีค่าเท่ากับ 1220×10^{-6} mol/L สำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพที่ 17 และ 21 จะเห็นได้ว่า สมการในรูปแบบของ L-H ไม่สามารถอธิบายข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง แม้ว่าค่า R^2 มีค่าสูงมากในขั้นตอนการหาค่าจลนพลศาสตร์ดังแสดงในภาพที่ 16 และ 20 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าภาพที่ 17 และ 21 ข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีค่าความเข้มข้นต่ำไม่เกิน 180 ppmv สำหรับโทลูอินและ 1800 ppmv สำหรับอะซีโตน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นสำหรับความเข้มข้นที่สูงขึ้น อาจจะไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่พบในธรรมชาติมีค่าไม่สูงมากนัก ทำให้สามารถนำค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองมาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบถังปฏิกิริยาได้

แต่สำหรับการศึกษาทดลองสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่ทำการทดลองได้ โดยสามารถนำมาประเมินแนวโน้มของอัตรา

การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าต่ำๆได้ เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของมลภาวะอากาศภายในอาคารของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินและอะซีโตน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 และ 500 ppmv ตามลำดับ (Tidwell, 2006) ซึ่งเมื่อพิจารณาค่ามาตรฐานดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าที่ศึกษาทดลองแล้วค่าที่ศึกษาทดลองยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก ทำให้เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ที่ได้จากการทดลอง สามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาประเมินแนวโน้มของอัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารประกอบอินทรีย์ระเหยดังกล่าวอยู่ช่วงของค่ามาตรฐานมลภาวะอากาศภายในอาคาร

สำหรับค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอุทกพิพของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (σ) ที่ทำการศึกษา สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19 และแสดงผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอุทกพิพของสารประกอบอินทรีย์ระเหย (σ) ที่ทำการศึกษา

สารประกอบ อินทรีย์ระเหยใน สถานะก๊าซ	ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมได ออกไซด์	อุณหภูมิ, ($^{\circ}\text{C}$)	ความเข้มแสง ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	σ
โทลูอิน	เคลือบ 1 ด้าน	46	165.7	1.04
		46	193.3	1.14
	เคลือบ 2 ด้าน	46	165.7	1.16
		46	193.3	1.23
	ผงเคลือบ 2 ด้าน	46	193.3	1.13
		56	1230.0	1.08
อะซีโตน	ผงเคลือบ 2 ด้าน	46	193.3	1.37

โดยสามารถอธิบายได้ว่าอนุภาคของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในสถานะก๊าซถูกดูดซับอยู่ทั่วบริเวณผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการ

เปลี่ยนแปลง และก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ทราบว่าเป็นข้อจำกัดของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในการศึกษานี้ ก็อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้ดีกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต โดยสามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ไม่ขึ้นอยู่กับจุดจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) ในปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ขึ้นอยู่กับจุดจำกัดของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate Limit) ในขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ทำให้เมื่อมีเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในข้างต้นแล้ว ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดข้อจำกัดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้แสงโดยปฏิกิริยาดังกล่าวจะไม่สามารถรองรับปริมาณสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำการออกซิไดซ์ได้หมด

นอกจากนี้การที่ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเกิดได้ไม่ดีอาจมีสาเหตุจาก ปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในถังปฏิกิริยามีปริมาณลดลงเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไป ทำให้การเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดต่ำลง ทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ปฏิกิริยาต่างๆในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ได้แก่ r_{max} และ K ที่ได้จากการทดลองกับสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินและอะซิโตน ในกรณีที่เปรียบเทียบกับ การทดลองของ Kim and Hong (2001) ซึ่งทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยในอากาศ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดฟิล์มบาง โดยในงานวิจัยดังกล่าวจะใช้ตัวแปรของค่าคงที่ปฏิกิริยาอยู่ในเทอมของ k และ K ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับค่า r_{max} และ K ในงานศึกษาวิจัยนี้ตามลำดับ สำหรับตารางที่แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบค่าคงที่ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในการศึกษาวิจัย

สารประกอบ อินทรีย์ ระเหย	การศึกษาวิจัย					
	งานวิจัยนี้			งานวิจัยของ Kim and Hong		
	I, ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	r_{max} , ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$)	K, (m^3/mol)	I, ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	r_{max} , ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$)	K, (m^3/mol)
โทลูอิน	193.3	1.166×10^{-4}	140.2	2095	4.493×10^{-4}	327.1
อะซีโตน	193.3	3.328×10^{-3}	9.94	2095	2.199×10^{-3}	392.4

จากตารางที่ 11 เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด พบว่า ค่า r_{max} ของงานวิจัยทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าค่าความเข้มแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่ำกว่ามาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ระดับความเข้มแสงสูงๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับค่าความเข้มแสง และอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าคงที่เมื่อถึงจุดจำกัดการเคลื่อนย้ายมวล (Ollis *et al.*, 1991) และเมื่อเปรียบเทียบ ค่า K ของงานวิจัยทั้งสอง จะเห็นได้ว่าค่า K ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าทั้งในกรณีที่ทดลองโดยใช้โทลูอินและอะซีโตน ซึ่งอาจเกิดจากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาคงที่ในงานวิจัยนี้ มีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยของ Kim and Hong มาก คือ มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $5 \times 5 \text{ cm}$. และ $2.6 \times 16.5 \text{ cm}$. เมื่อพิจารณาความเข้มแสงที่ใช้ในการทดลองพบว่า ความเข้มแสง $193.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน และในส่วนของการศึกษาที่ใช้ในการศึกษา พบว่า ถึงปฏิกิริยาแบบแบทช์ ที่มีการกวนผสมรุนแรง ทำให้เกิดการปั่นป่วนของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยารวมมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ระเหยบนตัวเร่งปฏิกิริยา และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

จากผลการศึกษาทดลองกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของโทลูอินและอะซีโตนในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ที่เป็นระบบปิดในกรณีที่ใช้แสงร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันนั้น ในขั้นตอนแรกของการเกิดปฏิกิริยาโทลูอิน จะเกิดการดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน หลังจากนั้นเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีพลังงานมากเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปโทลูอินและอะซีโตนได้

โดยพบว่าโทลูอินและอะซิโตนจะเปลี่ยนเป็นสารกลาง (Intermediate Product) ซึ่งก็คือ..ฟอร์มัลดีไฮด์ (HCHO) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก่อนที่จะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (End Product) เมื่อพิจารณาสารกลางที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน พบว่าปริมาณของฟอร์มัลดีไฮด์ และ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีค่าน้อยมาก คือ มีค่าประมาณ 0.57-0.97 และ 12.4-14.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Jeong *et al.*, 2004) จึงไม่นำมาประกอบการพิจารณาว่าจะเกิดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยจะทำการศึกษาถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 2 ชนิด ได้แก่ โทลูอิน และ อะซิโตน จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน ของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินและอะซิโตนในสถานะก๊าซ

1.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินและอะซิโตนในสถานะก๊าซ พบว่าอัตราการออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์ระเหยดังกล่าวบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ลักษณะ คือ แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน, แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน และแผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

1.2 ค่าคงที่ของสมการการออกซิเดชันในรูปแบบของ L-H ได้แก่ ค่า $r_{m,D}$ ซึ่งค่าสูงสุดสำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้อยู่ที่สภาวะทดลองที่ใช้แผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ด้าน ที่อุณหภูมิคงที่ 46 °C และความชื้นสัมพัทธ์คงที่เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า $r_{m,D}$ มีค่าเท่ากับ 8.897×10^{-5} mol/m³-min เมื่อทดลองกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน และมีค่าเท่ากับ 2.521×10^{-3} mol/m³-min เมื่อทดลองกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 300-400 นาโนเมตร

2.1 ค่าคงที่ของสมการการปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในรูปแบบของ L-H คือ ค่า $r_{m,L}$ ซึ่งค่าสูงสุดสำหรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยทั้ง 2 ชนิด ที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้อยู่ที่สภาวะทดลองที่ใช้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ $193.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ และใช้แผ่นกระจกเคลือบผงตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิคงที่ 46°C และความชื้นสัมพัทธ์คงที่เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า $r_{m,L}$ มีค่าเท่ากับ $1.166 \times 10^{-4} \text{ mol}/\text{m}^3\text{-min}$ เมื่อทดลองกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน และมีค่าเท่ากับ $3.328 \times 10^{-3} \text{ mol}/\text{m}^3\text{-min}$ เมื่อทดลองกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน

2.2 การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันทำให้ทราบว่า ในการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงให้กับถังปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่มีการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงมากจนทำให้อุณหภูมิในขณะทำการทดลองเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน คือ ทำให้อัตราการดูดซับผิวของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยลดลง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาดูดซับผิว ถ้าอุณหภูมิสูงมากขึ้นความสามารถในการดูดซับผิวของสารก็จะลดลง ทำให้เกิดปัจจัยจำกัดในการเคลื่อนที่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันซึ่งจำเป็นต้องเกิดที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดได้ไม่ดี

3. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 2 ชนิด คือ โทลูอิน และ อะซิโตน พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโทลูอินในกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน มีค่าน้อยกว่าอะซิโตน ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของสารประกอบที่แตกต่างกัน สภาพความมีขี้ผึ้งที่แตกต่างกัน ความสามารถในการถูกดูดซับบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโดยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เป็นการศึกษาทดลองในถังปฏิริยาแบบแบทช์(Batch) ซึ่งน่าจะมีการนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาทดลองในถังปฏิริยาแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous) เพื่อที่จะสามารถควบคุมปัจจัยจำกัดหลายๆปัจจัย เช่น ความชื้น และปริมาณออกซิเจน เป็นต้น

2. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์อันตรายอื่นๆ ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ

3. จากข้อจำกัดของกลไกการเกิดปฏิริยาโฟโตออกซิเดชัน การออกแบบถังปฏิริยาในการกำจัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ควรออกแบบให้ถังปฏิริยามีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวในการดูดซับของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยกับปริมาตรถังปฏิริยามีมากขึ้น และเพิ่มความเข้มแสงให้สูงขึ้น นอกจากนี้เพื่อเพิ่มปริมาณของไฮดรอกซิลเรดิคัลซึ่งทำให้ปฏิริยาออกซิเดชันในกระบวนการโฟโตออกซิเดชันเกิดได้ดี ควรใช้ตัวเร่งปฏิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับโลหะออกไซด์อื่นๆ เช่น ZnO , ZrO_2 , Bi_2WO_6 และ Fe_2O_3 เป็นต้น (Bessekhouad *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2004)

4. ในการออกแบบถังปฏิริยาเมื่อพิจารณาสมการในรูปแบบของ L-H เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นกับอัตราการเกิดปฏิริยาเริ่มต้น ซึ่งเกิดค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นเริ่มต้นซึ่งยังเป็นค่าที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้ เนื่องจากค่ามาตรฐานของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยยังอยู่ในช่วงของความเข้มข้นเริ่มต้นดังกล่าว และค่าแนวโน้มของอัตราการเกิดปฏิริยาจะน้อยกว่าค่าอัตราการเกิดปฏิริยาจริงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ ดังนั้นเมื่อออกแบบถังปฏิริยาโดยใช้ค่าออกแบบข้างต้น ทำให้ถังปฏิริยาที่ออกแบบมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงกว่าค่าจริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. มหาวิทยาลัยรังสิต, กรุงเทพฯ.

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. 2543. **โททอลปิโตเลียมไฮโดรคาร์บอน**. กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

ทบวงมหาวิทยาลัย. 2533. **เคมีเล่ม 1**. พิมพ์ครั้งที่ 6, สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, กรุงเทพฯ .

วูธนันท์ สิริพงษ์. 2544. การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อันชรีย์ จนนไทย. 2547. อิทธิพลของหน้าดินชั้นสุดท้ายต่อการระบายสารอินทรีย์ระเหยจากพื้นที่กำจัดมูลฝอยชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Al-Ekabi, H., G. Edwards, W. Holden, A. Safarazadeh-Amiri and J. Story. 1991. **Water treatment by heterogeneous photocatalysis**, pp. 254-261. In W.W. Echenfelder, A. R. Bowers and J. A. Roth(eds.). Chemical Oxidation. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster.

Amethyst Galleries, Inc. 1996. **The Mineral Anatase** <http://mineral.galleries.com/minerals/oxides/anatase/anatase.htm>. January 25, 2005.

Breath Free Technologies, Inc. 2004. **Ultraviolet Technology** <http://www.breathfreeinc.com/uvtech.htm>. January 25, 2005.

Bessekhouad, Y. , D. Robert and J. Weber. 2005. Photocatalytic activity of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$, $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ และ $\text{ZnMn}_2\text{O}_4/\text{TiO}_2$ Heterojunctions. **Catalysis Today**. 101: 315-321.

- Card, T.R. 1998. Fundamentals: Chemistry and Characteristics of Odors and VOCs. pp. 2.1-2.36. *In* **Odor and VOC Control Handbook**. H.J. Rafson (ed.). The McGraw – Hill Company, New York, U.S.A.
- Chapuis Y, Klvana D, Guy C, Kirchnerova J. 2002. Photocatalytic oxidation of volatile organic compounds using fluorescent visible light. **Air Waste Manag Assoc**. 52(7): 845-854.
- Davis, A.P. and C.P. Huang. 1991. The photocatalytic oxidation of sulfur-containing organic compound using cadmium sulfide and effect on CdS photocorrosion. **Wat. Res.** 25(10) : 1273-1278.
- Demeestere, K. , J. Dewulf., B.D. Witte and H.V. Langenhove. 2005. Titanium dioxide mediated heterogeneous photocatalytic degradation of gaseous dimethyl sulfide: Parameter study and reaction pathways. **Environmental**. 60: 95-108.
- Derwent, R.G. 1995. Sources, Distributions and Fates of VOCs in the Atmosphere. pp 1-15. *In* R.E. Hester and R.M. Harrison (eds.). **Volatile Organic Compounds in the Atmosphere**. The Royal Society of Chemistry, Cambridge. U.K.
- Evgenidou, E., Fytianos, K. and Poullos, I. 2005. Semiconductor-sensitized photodegradation of dichlorvos in water using TiO_2 and ZnO as catalysts. **Environmental**. 59: 81-89.
- Green Titan, Inc. 2004. **What is Photocatalyst** <http://www.greentitan.com/pco.htm>. January 25, 2005.
- Gupta, H. 1994. **Photocatalytic Degradation of Chlorinated Hydrocarbons and Its Combination with Anaerobic Digestion**. AIT Dissertation. AIT, Bangkok.

- Hunter, P. and S.T. Oyama. 2000. **Control of Volatile Organic Compound Emissions**. A Wiley – Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc. New York. U.S.A.
- Iangphasuk, M. 1997. **The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile wastewater**. Ph.D. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Iis Sopyan, Mitsuru Watanabe, Sadao Murasawa, Kazuhito Hashimoto. 1996. Akira Fujishima. An efficient TiO₂ thin-film photocatalyst: photocatalytic properties in gas-phase acetaldehyde degradation. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. 98: 79-86.
- Ince, N. H. and D. T. Gonenc. 1997. Treatability of A Textile Azo Dye by UV/H₂O₂. **Environ. Technol.** 18: 179-185.
- Jeong, J., K. Sekiguchi., W. Lee and K. Sakamoto. 2004. Photodegradation of gaseous volatile organic compounds (VOCs) using TiO₂ photoirradiated by an ozone-producing UV lamp: decomposition characteristics, identification of by-products and water-soluble organic intermediates. **Chemistry**. 169: 279-287.
- Kawaguchi, H. 1994. Dependence of photocatalytic reaction rate on titanium dioxide concentration in aqueous suspension. **Environ. Technol.** 15: 183-188.
- Kim, S.B., H.T. Hwang and S.C. Hong. 2002. Photocatalytic degradation of volatile organic compounds at the gas-solid interface of a TiO₂ photocatalyst. **Chemosphere**. 48: 437-444.
- Kutal, C and N. Serpone. 1993. **Photosensitive metal-organic systems mechanistic principles and applications**. Washington DC: American Chemical Society. Cited by Iangphasuk, M. 1997. **The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile wastewater**. Ph.D. thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok.

- LaGrega, M.D., P.L. Buckingham and J.C. Evans. 1994. **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, Singapore.
- Liu, B., X. Zhao., Q. Zhao., C. Li and X. He. 2004. The effect of O₂ partial pressure on the structure and photocatalytic property of TiO₂ films prepared by sputtering. **Material Chemistry and Physics**. 90: 207-212.
- Ollis, D.F., E. Pelizzette and N. Serpone. 1991. **Environ. Sci. Technol.** 25(1523). Cited by Venkatadri, R. and R.W. Peters. 1993. **Chemical oxidation**.
- Satterfield, N. C. 1991. **Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice**. 2nd ed. McGraw-Hill Book, Inc. New York.
- Schmitt, Borris, Klausnitzer, Jahnke. 2003. Olfactometry – A new tool for the assessment of cabin air filter performance. **Filtech Europe II**, p. 186-191.
- Serpone, N. and E. Pelizzetti. 1989. **Photocatalysis: Fundamentals and Applications**. John Wiley and Sons, New York. Cited by Iangphasuk, M. 1997. **The potential for photocatalytic oxidation of dyes in textile wastewater**. Ph.D. thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Tidwell, J. 2006. **Health & Fitness** <http://allergies.about.com/library/chem/>. January 25, 2005.
- Venkatadri, R. and R.W. Peters. 1993. Chemical oxidation technologies: ultraviolet light/hydrogen peroxide, fenton's reagent and titanium dioxide-assisted photocatalysis. **Hazardous Waste & Hazardous Materials**. 10(2) : 107-149.
- Verchueren, K. 1996. **Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals**. 3rd ed. USA.

Wiseman, A. 1995. **Handbook of Enzyme Biotechnology**. 3rd ed. Ellis Horwood. London.

Wu, C., X. Zhao., Y. Ren., Y. Yue., W. Hua., Y. Cao., Y. Tang and Z. Gao. 2004. Gas-phase photo-oxidations of organic compounds over different forms of zirconia. **Chemical**. 299: 233-239.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	54.902	55.403	53.621	54.642
5	50.416	50.02	48.294	49.577
10	49.238	47.324	45.827	47.463
15	48.523	46.953	45.862	47.113
25	47.895	45.785	44.912	46.197
35	46.659	44.994	44.015	45.223
45	45.528	43.73	43.148	44.135
60	44.863	43.275	42.367	43.502
75	43.051	42.354	41.708	42.371
90	42.203	41.446	41.12	41.590

ตารางผนวกที่ ก2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	99.396	93.839	103.953	99.063
5	94.436	86.787	96.002	92.408
10	88.784	83.903	93.916	88.868
15	86.212	81.189	90.713	86.038
25	82.203	79.529	88.079	83.270
35	80.396	76.269	85.031	80.565
45	78.253	76.23	83.931	79.471
60	72.96	71.483	78.984	74.476
75	72.904	74.883	77.258	75.015
90	71.655	69.536	76.542	72.578

ตารางผนวกที่ ก3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	153.326	145.568	156.912	151.935
5	143.368	130.046	146.284	139.899
10	136.454	124.212	140.367	133.678
15	129.961	118.724	132.288	126.991
25	124.543	115.303	126.194	122.013
35	118.605	110.008	120.151	116.255
45	144.805	107.088	116.201	122.698
60	111.012	104.513	112.247	109.257
75	108.446	102.391	109.989	106.942
90	104.539	101.368	106.275	104.061

ตารางผนวกที่ ก4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	176.357	188.601	182.498	182.485
5	164.523	180.539	174.413	173.158
10	153.863	171.571	166.343	163.926
15	149.686	166.268	159.422	158.459
25	146.686	158.835	151.642	152.388
35	138.185	152.167	144.977	145.110
45	133.773	146.839	139.477	140.030
60	128.025	140.034	134.984	134.348
75	123.85	134.747	129.984	129.527
90	119.058	129.173	124.284	124.172

ตารางผนวกที่ ก5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	52.278	56.314	53.703	54.098
5	47.850	51.878	49.292	49.673
10	44.418	47.922	45.590	45.977
15	44.011	46.608	44.870	45.163
25	43.489	45.982	43.950	44.474
35	43.102	45.124	43.349	43.858
45	42.884	44.572	42.600	43.352
60	42.423	42.560	41.484	42.156
75	42.174	41.831	41.234	41.746
90	41.527	41.635	40.397	41.186

ตารางผนวกที่ ก6 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	101.375	90.589	110.879	100.948
5	94.297	84.492	104.036	94.275
10	90.569	78.122	97.854	88.848
15	86.051	76.021	94.647	85.573
25	82.88	72.626	91.828	82.445
35	79.69	72.525	88.754	80.323
45	76.007	70.493	86.983	77.828
60	76.874	69.147	85.562	77.194
75	74.144	68.564	84.006	75.571
90	70.447	67.653	83.118	73.739

ตารางผนวกที่ ก7 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	152.487	148.782	160.363	153.877
5	143.526	139.837	142.052	141.805
10	135.476	131.792	133.490	133.586
15	127.464	125.134	127.496	126.698
25	121.925	119.524	122.843	121.431
35	116.987	114.694	118.625	116.769
45	112.081	110.008	115.554	112.548
60	109.065	107.003	113.136	109.735
75	106.535	104.936	110.922	107.464
90	104.48	103.214	109.401	105.698

ตารางผนวกที่ ก8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	175.468	169.851	174.989	173.436
5	165.483	150.844	165.420	160.582
10	158.877	144.426	157.902	153.735
15	151.505	139.005	150.300	146.937
25	145.734	134.136	144.538	141.469
35	139.281	129.183	139.151	135.872
45	134.469	125.636	134.360	131.488
60	129.848	122.425	129.981	127.418
75	126.705	119.400	125.714	123.940
90	122.771	116.523	121.603	120.299

ตารางผนวกที่ ก9 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	58.422	52.191	51.607	54.073
5	53.217	47.369	45.646	48.744
10	49.246	43.946	42.895	45.362
15	48.565	42.795	41.282	44.214
25	47.013	41.043	39.766	42.607
35	45.763	39.776	38.511	41.350
45	44.904	38.916	37.701	40.507
60	43.022	38.081	36.916	39.340
75	41.957	37.459	36.164	38.527
90	41.867	37.041	35.533	38.147

ตารางผนวกที่ ก10 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	107.811	99.877	102.855	103.514
5	99.089	93.905	96.997	96.664
10	91.957	88.558	91.595	90.703
15	87.694	83.612	86.009	85.772
25	72.271	78.695	81.046	77.337
35	77.816	73.059	76.384	75.753
45	75.848	69.075	74.084	73.002
60	73.641	67.440	72.176	71.086
75	72.294	66.192	70.824	69.770
90	71.992	65.210	70.399	69.200

ตารางผนวกที่ ก11 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	155.612	168.554	154.581	159.582
5	144.574	149.125	144.421	146.040
10	138.318	142.005	137.024	139.116
15	132.589	133.356	130.842	132.262
25	126.404	128.100	122.681	125.728
35	121.882	124.304	115.621	120.602
45	115.380	118.647	110.038	114.688
60	110.971	115.310	104.812	110.364
75	105.793	112.262	101.282	106.446
90	101.856	110.080	98.313	103.416

ตารางผนวกที่ ก12 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	184.327	175.244	188.593	182.721
5	157.790	165.238	161.875	161.634
10	150.891	157.625	154.974	154.497
15	145.043	149.941	149.059	148.014
25	139.539	141.718	143.532	141.596
35	134.384	133.914	138.11	135.469
45	129.616	127.430	133.146	130.064
60	125.795	121.908	128.358	125.354
75	122.053	116.482	123.864	120.800
90	118.581	113.464	120.311	117.452

ตารางผนวกที่ ก13 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	54.457	50.997	50.227	51.894
5	50.054	46.556	46.846	47.819
10	47.021	43.244	42.126	44.130
15	45.257	42.948	41.468	43.224
25	43.968	42.090	40.556	42.205
35	43.014	41.165	39.802	41.327
45	42.528	40.319	38.825	40.557
60	41.114	39.502	37.837	39.484
75	41.024	38.365	37.286	38.892
90	40.200	37.347	36.914	38.154

ตารางผนวกที่ ก14 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	96.403	103.568	101.832	100.601
5	88.324	96.556	94.616	93.165
10	83.116	92.803	90.969	88.963
15	82.484	88.272	86.185	85.647
25	79.261	81.740	80.969	80.657
35	74.097	77.635	76.960	76.231
45	72.523	74.481	73.871	73.625
60	70.246	73.223	72.523	71.997
75	68.675	72.349	71.760	70.928
90	68.376	71.829	71.290	70.498

ตารางผนวกที่ ก15 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการ จุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	135.940	150.841	165.783	150.855
5	122.528	141.851	155.663	140.014
10	122.705	133.365	148.791	134.954
15	118.849	123.823	141.257	127.976
25	114.640	116.717	136.578	122.645
35	110.902	110.627	131.739	117.756
45	108.295	106.250	126.418	113.654
60	101.753	102.630	123.613	109.332
75	99.078	98.364	117.634	105.025
90	96.687	97.035	112.184	101.969

ตารางผนวกที่ ก16 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการ จุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	177.613	180.027	171.411	176.350
5	168.610	172.639	162.279	167.843
10	160.257	163.854	154.332	159.481
15	152.797	155.422	147.328	151.849
25	147.664	149.101	141.594	146.120
35	140.923	142.386	135.661	139.657
45	133.313	136.117	128.534	132.655
60	127.024	129.005	120.411	125.480
75	119.872	121.318	115.427	118.872
90	114.491	118.425	110.368	114.428

ตารางผนวกที่ ก17 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	50.407	52.788	42.254	48.483
5	46.551	47.104	38.018	43.891
10	42.589	43.317	36.921	40.942
15	40.920	42.762	35.727	39.803
25	40.113	41.569	35.002	38.895
35	38.672	40.238	34.623	37.844
45	38.886	39.810	33.718	37.471
60	37.724	39.271	32.962	36.652
75	37.372	38.913	32.454	36.246
90	36.268	38.526	31.772	35.522

ตารางผนวกที่ ก18 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	101.439	102.415	96.722	100.192
5	95.146	96.327	90.417	93.963
10	89.724	88.521	84.226	87.490
15	83.369	82.096	79.403	81.623
25	79.251	78.071	76.446	77.923
35	76.420	75.285	73.821	75.175
45	74.683	73.463	73.415	73.854
60	72.125	70.829	71.563	71.506
75	71.354	69.807	70.658	70.606
90	70.533	69.196	70.28	70.003

ตารางผนวกที่ ก19 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	152.932	150.883	140.257	148.024
5	143.523	141.322	131.587	138.811
10	135.264	135.827	123.538	131.543
15	126.332	126.596	114.571	122.500
25	119.295	119.495	107.215	115.335
35	114.278	114.542	102.005	110.275
45	109.989	110.144	97.900	106.011
60	106.263	106.517	94.489	102.423
75	102.999	103.363	91.507	99.290
90	102.513	100.328	92.939	98.593

ตารางผนวกที่ ก20 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	172.699	184.527	175.634	177.620
5	162.354	174.892	164.237	167.161
10	154.104	164.981	156.474	158.520
15	146.100	156.725	148.321	150.382
25	138.479	149.008	140.601	142.696
35	132.008	141.990	133.659	135.886
45	125.755	134.971	127.234	129.320
60	119.645	128.945	120.913	123.168
75	113.818	123.845	114.805	117.489
90	110.437	116.217	111.531	112.728

ตารางผนวกที่ ก21 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	57.398	45.791	51.746	51.645
5	54.181	41.032	45.329	46.847
10	52.492	37.024	42.565	44.027
15	50.548	35.786	41.379	42.571
25	48.626	34.885	40.434	41.315
35	47.069	34.099	39.580	40.249
45	47.201	33.525	38.779	39.835
60	46.668	33.021	38.053	39.247
75	45.560	32.593	37.516	38.556
90	38.270	30.447	35.023	34.580

ตารางผนวกที่ ก22 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	102.857	94.615	97.443	98.305
5	95.522	88.141	90.053	91.239
10	89.725	83.046	84.864	85.878
15	83.163	77.292	78.762	79.739
25	77.762	72.940	73.548	74.750
35	73.508	67.326	69.292	70.042
45	70.186	65.108	66.192	67.162
60	67.932	62.757	64.272	64.987
75	66.420	61.347	63.152	63.640
90	64.445	61.322	61.474	62.414

ตารางผนวกที่ ก23 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	149.802	154.436	161.748	155.329
5	140.3290	139.252	154.323	144.635
10	132.083	128.451	147.344	135.959
15	123.925	120.439	138.020	127.461
25	116.358	113.414	130.156	119.976
35	109.626	107.370	123.913	113.636
45	103.828	103.048	118.902	108.593
60	99.261	99.722	114.767	104.583
75	95.397	97.438	111.256	101.364
90	92.524	96.539	95.769	94.944

ตารางผนวกที่ ก24 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	185.341	177.287	183.096	181.908
5	176.424	166.538	174.461	172.474
10	168.934	157.038	161.377	162.450
15	159.924	148.914	152.592	153.810
25	151.191	140.690	144.368	145.416
35	142.770	132.665	136.343	137.259
45	134.448	124.743	128.421	129.204
60	126.413	117.529	120.855	121.599
75	118.587	109.562	113.640	113.930
90	112.941	108.204	107.875	109.673

ตารางผนวกที่ ก25 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	57.422	49.377	49.879	52.226
5	52.144	44.325	44.482	46.984
10	47.532	40.133	40.904	42.856
15	46.320	39.011	39.586	41.639
25	45.410	38.135	38.532	40.692
35	44.609	37.420	37.636	39.888
45	43.886	36.988	37.124	39.333
60	43.373	36.663	36.868	38.968
75	43.015	36.452	36.526	38.664
90	42.112	36.368	35.994	38.158

ตารางผนวกที่ ก26 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	108.625	92.493	101.952	101.023
5	101.452	85.638	94.443	93.844
10	95.532	79.874	89.585	88.330
15	90.511	75.279	84.481	83.424
25	86.089	71.247	80.248	79.195
35	82.550	68.122	76.492	75.721
45	79.840	66.288	74.239	73.456
60	78.139	65.324	72.415	71.959
75	77.089	64.788	71.451	71.109
90	75.139	64.524	69.822	69.828

ตารางผนวกที่ ก27 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	160.236	148.267	152.553	153.685
5	148.726	141.231	142.323	144.093
10	138.961	135.642	133.112	135.905
15	131.963	128.625	125.960	128.849
25	126.326	123.193	119.639	123.053
35	121.474	118.408	114.429	118.104
45	116.949	114.283	109.808	113.680
60	112.627	109.630	105.486	109.248
75	108.320	105.323	101.201	104.948
90	107.885	100.651	99.472	102.669

ตารางผนวกที่ ก28 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	178.628	187.354	171.615	179.199
5	164.539	174.853	161.252	166.881
10	151.487	166.232	151.295	156.338
15	143.855	157.600	143.443	148.299
25	136.801	150.046	136.421	141.089
35	129.879	143.014	129.868	134.254
45	123.811	136.225	123.526	127.854
60	118.788	129.693	117.413	121.965
75	114.467	123.629	111.298	116.465
90	113.896	118.527	110.346	114.256

ตารางผนวกที่ ก29 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	45.694	52.325	47.126	48.382
5	40.117	50.362	41.218	43.899
10	35.523	42.117	36.494	38.045
15	34.102	40.492	35.181	36.592
25	32.949	39.134	34.193	35.425
35	31.983	37.970	33.472	34.475
45	31.398	37.016	32.875	33.763
60	30.910	36.116	32.664	33.230
75	30.590	35.358	32.544	32.831
90	30.216	33.588	32.515	32.106

ตารางผนวกที่ ก30 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	95.664	100.915	115.127	103.902
5	87.056	91.472	105.363	94.630
10	80.977	84.329	96.981	87.429
15	75.842	79.291	90.767	81.967
25	71.320	74.777	85.311	77.136
35	68.095	71.590	81.023	73.569
45	65.341	69.057	77.508	70.635
60	63.330	67.104	75.486	68.640
75	61.574	65.565	73.664	66.934
90	61.141	62.862	71.533	65.179

ตารางผนวกที่ ก31 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	165.238	159.442	156.629	160.436
5	154.823	147.025	144.156	148.668
10	143.653	135.887	133.296	137.612
15	134.029	126.565	124.545	128.380
25	125.816	118.433	116.530	120.260
35	118.285	111.308	109.268	112.954
45	112.068	105.430	104.144	107.214
60	106.822	101.205	99.887	102.638
75	102.098	97.312	96.929	98.780
90	100.213	95.988	95.217	97.139

ตารางผนวกที่ ก32 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	177.756	188.325	180.05	182.044
5	164.715	174.442	171.246	170.134
10	152.478	161.354	153.981	155.938
15	144.657	153.239	145.960	147.952
25	137.121	144.919	138.215	140.085
35	129.746	136.797	130.682	132.408
45	122.478	128.474	123.431	124.794
60	115.524	120.609	116.576	117.570
75	109.001	112.855	110.147	110.668
90	105.981	109.865	108.483	108.110

ตารางผนวกที่ ก33 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่ อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	53.714	52.483	42.990	49.729
5	49.877	50.235	39.022	46.378
10	47.683	48.568	37.429	44.560
15	47.253	48.161	37.236	44.217
25	47.028	47.896	36.843	43.922
35	47.011	47.674	37.144	43.943
45	46.895	47.423	37.024	43.781
60	47.102	47.121	36.849	43.691
75	46.714	46.059	36.707	43.160
90	46.538	46.081	36.697	43.105

ตารางผนวกที่ ก34 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่ อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	110.467	95.223	101.867	102.519
5	105.385	90.183	105.536	100.368
10	99.536	86.144	91.724	92.468
15	98.851	85.322	91.018	91.730
25	98.004	84.124	90.427	90.852
35	97.163	83.522	89.328	90.004
45	97.546	82.328	87.268	89.047
60	95.325	81.899	87.585	88.270
75	94.628	81.032	87.027	87.562
90	93.718	80.328	86.612	86.886

ตารางผนวกที่ ก35 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่ อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	142.834	148.008	158.319	149.720
5	135.351	141.382	152.778	143.170
10	129.252	135.578	147.682	137.504
15	126.724	132.013	144.527	134.421
25	124.425	130.258	142.503	132.395
35	122.321	128.439	140.364	130.375
45	120.005	126.645	138.059	128.236
60	118.934	124.936	135.561	126.477
75	118.053	123.527	132.471	124.684
90	117.392	122.536	130.454	123.461

ตารางผนวกที่ ก36 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่ อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	186.429	183.733	179.258	183.140
5	180.473	176.529	171.382	176.128
10	175.287	169.134	164.845	169.755
15	170.665	164.832	160.027	165.175
25	165.986	161.207	155.892	161.028
35	161.354	157.836	152.024	157.071
45	157.683	154.353	149.115	153.717
60	154.938	150.578	145.835	150.450
75	151.442	148.779	143.957	148.059
90	149.638	146.113	142.869	146.207

ตารางผนวกที่ ก37 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 50 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	48.239	55.442	46.135	49.939
5	44.228	52.329	43.281	46.613
10	41.423	49.584	40.010	43.672
15	41.115	49.334	39.826	43.425
25	41.000	49.151	39.659	43.270
35	40.978	49.048	39.591	43.206
45	40.814	48.987	39.568	43.123
60	40.792	48.952	39.985	43.243
75	40.472	48.947	39.981	43.133
90	40.983	48.559	39.954	43.165

ตารางผนวกที่ ก38 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 100 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	102.387	98.657	99.788	100.277
5	96.535	94.417	93.882	94.945
10	91.648	89.073	87.536	89.419
15	90.681	88.155	86.777	88.538
25	89.813	87.298	86.034	87.715
35	88.976	86.476	85.381	86.944
45	88.218	85.738	84.848	86.268
60	87.481	84.980	84.437	85.633
75	86.786	84.276	84.125	85.062
90	86.637	84.225	84.318	85.060

ตารางผนวกที่ ก39 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 150 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	159.165	151.667	145.327	152.053
5	151.214	145.323	132.857	143.131
10	143.529	140.495	124.945	136.323
15	140.654	137.708	123.027	133.796
25	138.643	135.550	121.595	131.929
35	136.690	133.534	120.384	130.203
45	135.085	131.700	121.421	129.402
60	133.818	129.980	120.748	128.182
75	132.055	128.329	119.632	126.672
90	131.572	124.289	120.037	125.299

ตารางผนวกที่ ก40 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินประมาณ 180 ppmv ที่ความเข้มแสง 1230.0 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน ที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	192.328	183.862	189.02	188.403
5	183.837	175.062	182.207	180.369
10	176.441	167.394	175.088	172.974
15	171.968	162.812	170.256	168.345
25	167.881	158.541	165.904	164.109
35	163.871	154.417	161.890	160.059
45	160.513	150.824	158.265	156.534
60	157.226	147.800	155.143	153.390
75	154.801	145.237	152.799	150.946
90	153.982	144.326	149.892	149.400

ตารางผนวกที่ ก41 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 500 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	482.880	424.012	511.275	472.722
2	434.483	378.861	459.874	424.406
4	393.722	337.049	411.325	380.699
6	352.640	298.714	368.337	339.897
8	320.362	273.292	334.049	309.234
10	298.001	256.655	312.765	289.140
12	282.379	246.116	297.134	275.210
14	271.107	238.835	285.706	265.216
16	266.080	236.301	278.172	260.184
20	263.274	235.388	271.425	256.696

ตารางผนวกที่ ก42 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,000 ppmv ในที่มืด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	969.523	1221.522	992.384	1061.143
2	894.482	1136.743	913.548	981.591
4	829.625	1061.507	885.336	925.489
6	775.297	998.681	784.933	852.970
8	700.011	908.534	710.840	773.128
10	633.427	824.745	645.726	701.299
12	575.952	749.531	591.694	639.059
14	530.176	688.398	549.107	589.227
16	488.825	640.830	514.150	547.935
20	481.536	628.394	505.327	538.419

ตารางผนวกที่ ก43 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,500 ppmv ในที่มีด โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	1678.132	1492.533	1421.874	1530.846
2	1588.477	1387.627	1328.702	1434.935
4	1510.634	1294.326	1247.107	1350.689
6	1441.484	1209.742	1175.549	1275.592
8	1290.237	1084.117	1053.188	1142.514
10	1147.839	967.274	938.654	1017.922
12	1025.798	860.162	832.980	906.313
14	913.362	763.835	737.232	804.810
16	812.108	677.483	652.907	714.166
20	774.714	672.698	637.844	695.085

ตารางผนวกที่ ก44 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,800 ppmv ในที่มีด โดยใช้ แผ่นกระจกเคลือบผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	1856.901	1726.842	1869.601	1817.781
2	1693.213	1575.664	1708.429	1659.102
4	1550.489	1436.405	1557.394	1514.763
6	1412.564	1305.165	1416.228	1377.986
8	1257.668	1151.249	1262.974	1223.964
10	1112.441	1031.098	1119.286	1087.609
12	975.859	926.473	984.152	962.162
14	848.716	825.149	858.357	844.074
16	743.082	739.487	753.843	745.471
20	725.526	709.634	734.117	723.092

ตารางผนวกที่ ก45 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 500 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบฟลูออโรพอลิเมอร์ไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย (ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	453.260	553.624	435.561	480.815
2	386.364	482.126	366.711	411.734
4	331.420	423.581	309.253	354.751
6	284.415	372.867	260.486	305.923
8	270.958	362.390	250.0876	294.479
10	258.637	352.554	240.3253	283.839
12	248.613	343.680	231.5179	274.604
14	239.081	336.258	224.1516	266.497
16	229.640	330.520	218.4566	259.539
20	226.582	286.354	211.471	241.469

ตารางผนวกที่ ก46 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,000 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบฟลูออโรพอลิเมอร์ไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	1108.680	887.907	1197.824	1064.804
2	1007.328	794.527	1085.241	962.365
4	920.466	715.023	985.674	873.721
6	840.528	643.070	895.678	793.092
8	758.989	590.359	813.574	720.974
10	688.502	542.626	739.223	656.784
12	625.245	499.468	671.999	598.904
14	570.800	465.867	619.661	552.109
16	528.413	439.354	578.364	515.377
20	515.552	418.639	548.627	494.273

ตารางผนวกที่ ก47 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,500 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบฟลูออโรพอลิเมอร์ไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	1597.404	1488.652	1521.905	1535.987
2	1467.935	1364.392	1393.322	1408.550
4	1351.242	1253.956	1277.884	1294.361
6	1242.898	1152.331	1172.590	1189.273
8	1110.651	1032.513	1059.018	1067.394
10	990.293	924.519	956.654	957.155
12	876.769	827.941	865.111	856.607
14	774.130	740.763	782.478	765.790
16	681.983	665.364	711.010	686.119
20	670.213	607.742	638.841	638.932

ตารางผนวกที่ ก48 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตนประมาณ 1,800 ppmv ที่ความเข้มแสง 193.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้แผ่นกระจกเคลือบฟลูออโรพอลิเมอร์ไดออกไซด์ 2 ด้าน

เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	1704.883	1824.634	1742.743	1757.420
2	1569.693	1677.701	1600.004	1615.799
4	1446.220	1544.433	1470.809	1487.154
6	1333.876	1419.939	1349.182	1367.666
8	1169.619	1259.468	1194.584	1207.890
10	1015.878	1107.781	1048.449	1057.369
12	873.527	965.208	911.0942	916.610
14	737.865	833.556	784.2606	785.227
16	616.386	713.069	668.1834	665.879
20	591.473	620.596	601.527	604.532

ตารางผนวกที่ ก49 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเปล่า

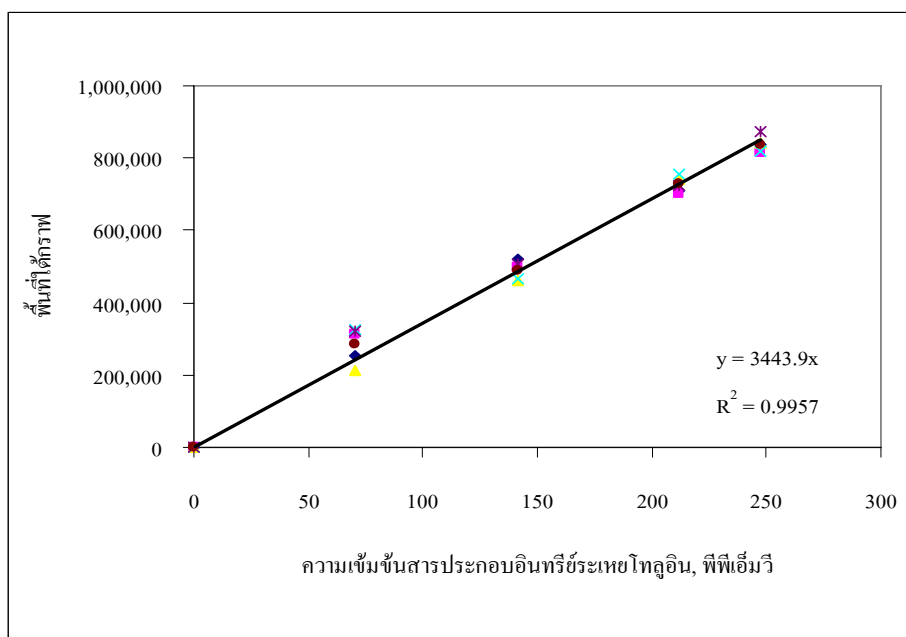
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)	
0	49.979	181.962
5	48.702	184.032
10	49.985	179.392
15	48.067	184.596
25	49.688	182.116
35	49.713	180.835
45	49.676	182.060

ตารางผนวกที่ ก50 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยอะซิโตน ในที่มีดโดยใช้แผ่นกระจกเปล่า

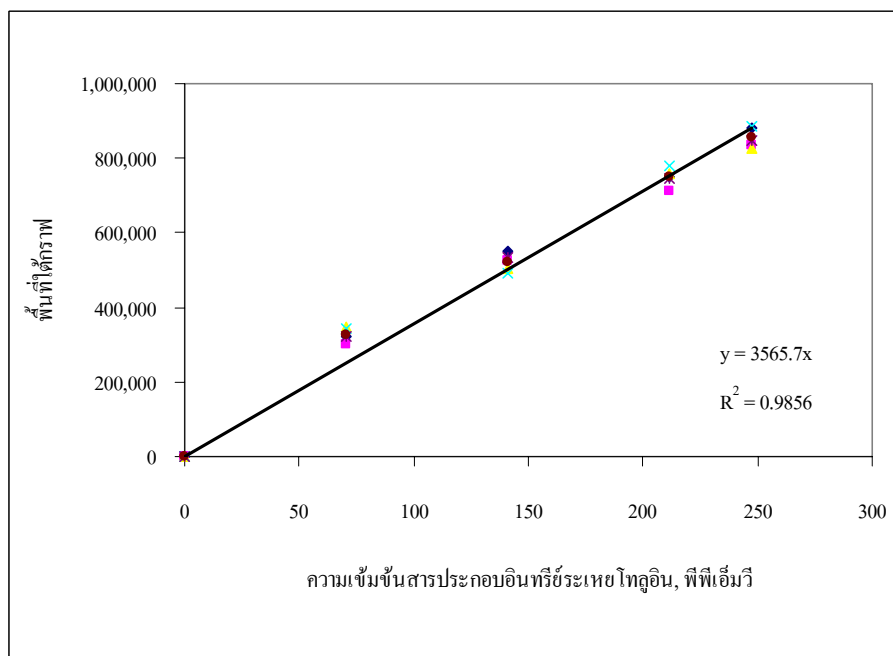
เวลา (นาทีก)	ความเข้มข้นไอระเหย(ppmv)	
0	520.364	1884.593
2	504.783	1801.642
4	511.269	1852.647
6	520.446	1794.532
8	526.981	1846.365
10	514.635	1880.332
12	498.253	1848.799

ภาคผนวก ข

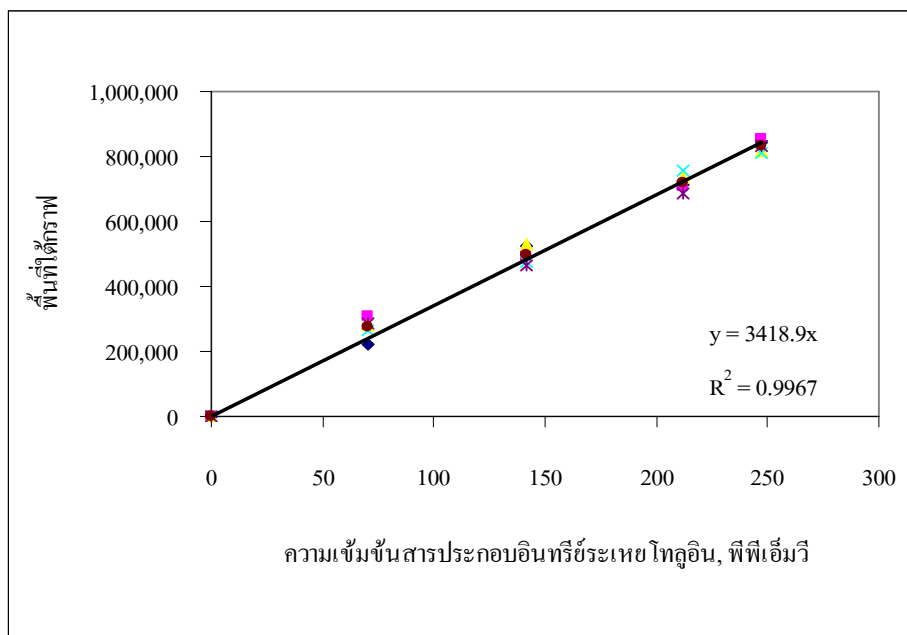
ภาพกราฟมาตรฐาน



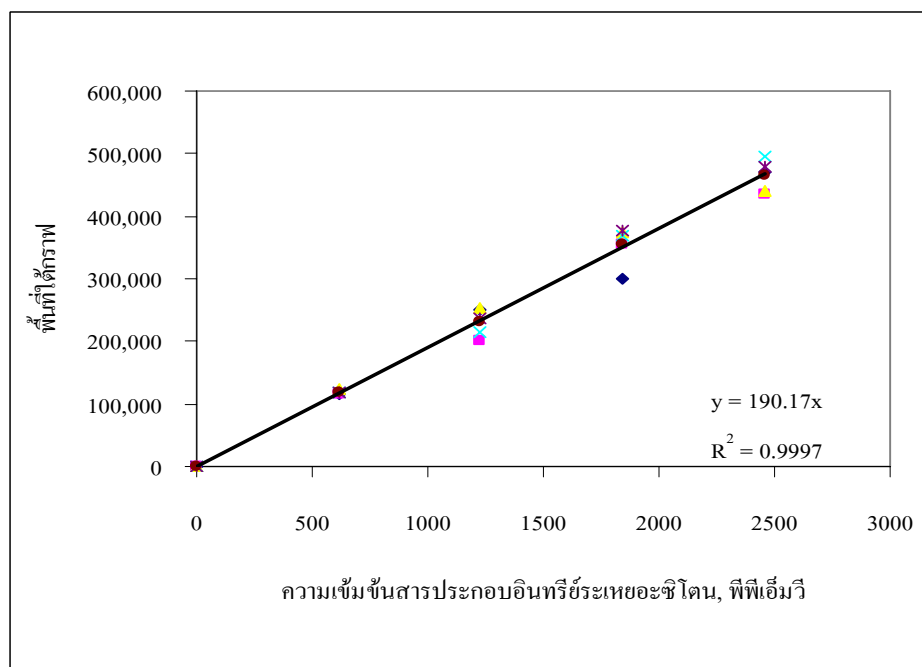
ภาพผนวกที่ ข1 กราฟมาตรฐานโทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟมาตรฐานโทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 2 ด้าน



ภาพผนวกที่ ข3 กราฟมาตรฐานโทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผง
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน



ภาพผนวกที่ ข4 กราฟมาตรฐานอะซิโตนในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบผง
ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 ด้าน

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างรายการคำนวณ

ตัวอย่างรายการคำนวณ

1. การเตรียมไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยในการทดลอง

คุณสมบัติของสารละลายโทลูอิน

ค่าความดันไอ = 22 mmHg ที่ 20 °C

มวลโมเลกุล = 92.13

หาค่าความดันไอของโทลูอิน ที่ 32 °C (อุณหภูมิทดลอง)

$$\text{จาก } \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

$$P_2 = \frac{P_1 T_2}{T_1}$$

$$P_2 = \frac{22 \text{ mmHg} \times (273 + 32) \text{ K}}{(273 + 20) \text{ K}}$$

$$P_2 = 22.901 \text{ mmHg} = 0.030 \text{ atm} \quad \#$$

หาค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่ความดันไอ 0.030 atm, 32 °C

$$\text{จาก } PV = nRT$$

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{RT}$$

$$= \frac{0.030 \text{ atm}}{0.082 \text{ L.atm} / \text{mol.K} \times 303 \text{ K}} = 1.207 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

จาก มวลโมเลกุลของโทลูอิน = 92.13 g/mol

$$\begin{aligned}\frac{m}{V} &= \frac{92.13g}{mol} \times \frac{1.207 \times 10^{-3} mol}{L} \\ &= 0.1112 \text{ g/L} \\ &= 111.2 \text{ mg/L} \quad \# \end{aligned}$$

หาค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน ในหน่วย ppmv

จาก คุณสมบัติก๊าซอุดมคติที่อุณหภูมิ 0 °C (273K) ก๊าซจะมีปริมาตร = 22.4 L
ที่อุณหภูมิ 32 °C (305K) ก๊าซจะมีปริมาตร

$$\begin{aligned}\text{จาก } V_2 &= \frac{V_1 T_2}{T_1} \\ &= \frac{22.4L \times 305K}{273K} = 25.026 \text{ L} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหย 111.2 mg/L ในหน่วย ppmv

$$\begin{aligned}\text{จาก } \text{ppmv} &= \frac{\mu g}{m^3} \times \frac{V \times 10^{-3}}{Mw} \\ &= \frac{111.2mg}{L} \times \frac{10^3 \mu g}{mg} \times \frac{10^3 L}{m^3} \times \frac{25.026 \times 10^{-3} m^3}{92.13} \\ &= 30,008.188 \text{ ppmv} \quad \# \end{aligned}$$

หาปริมาณสารของโทลูอินในตัวอย่างที่ดึงมา

จากค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน 111.2 mg/L (30,008.188 ppmv)

$$\begin{aligned}\text{กรณีดึงตัวอย่างมา } 500 \mu\text{L} \text{ จะมีเนื้อสาร} &= \frac{111.2 \text{ mg}}{L} \times 500 \times 10^{-6} L \\ &= 0.056 \text{ mg}\end{aligned}$$

เมื่อดึงตัวอย่างที่ปริมาตรต่างๆจะมีปริมาณโทลูอิน ดังตารางผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณโทลูอินกับปริมาตรไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ดึงมา

ปริมาตรไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่ดึงมา (μL)	ปริมาณโทลูอิน (mg)
500	0.056
400	0.044
300	0.033
200	0.022
100	0.011

เมื่อเตรียมตัวอย่างไอของสารประกอบอินทรีย์โทลูอิน ในหลอดทดลองขนาด 8.5 mL

หาความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์โทลูอินในหลอดทดลองที่ ปริมาตรไอของ
สารประกอบอินทรีย์ที่ดึงมา 500 μL มีปริมาณ โทลูอิน 0.056 mg
ดังนั้นความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ในหลอดทดลอง

$$\begin{aligned}&= \frac{0.056 \text{ mg}}{8.5 \text{ mL}} \times \frac{10^3 \text{ mL}}{L} \\ &= 6.588 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

ความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ในหลอดทดลอง ในหน่วย ppmv

$$= \frac{6.588 \text{ mg}}{\text{L}} \times \frac{10^3 \mu\text{g}}{\text{mg}} \times \frac{10^3 \text{ L}}{\text{m}^3} \times \frac{25.026 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{92.13}$$

$$= 1789.614 \text{ ppmv}$$

เมื่อตั้งตัวอย่างที่ปริมาตรต่างๆจะมีความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์โทลูอิน ใน
หลอดทดลองโทลูอิน ดังนี้

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณโทลูอินกับความเข้มข้นและปริมาตรที่ดึงมาของไอของสารประกอบ
อินทรีย์ระเหยในหลอดทดลอง

ปริมาตรไอของสารประกอบ อินทรีย์ระเหยที่ดึงมา (μL)	ปริมาณโทลูอิน (mg)	ความเข้มข้นของไอของ สารประกอบอินทรีย์ระเหย (ppmv)
500	0.056	1789.614
400	0.044	1406.126
300	0.033	1054.594
200	0.022	703.063
100	0.011	351.531

2. ตัวอย่างการคำนวณการแปลงหน่วยจากหน่วย ppmv เป็น โมลต่อลิตร

จาก

$$\text{ppmv} = \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \times \frac{V \times 10^{-3}}{M_w}$$

และจากการคำนวณในภาคผนวก ค ข้อที่ 1

ความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน 111.2 mg/L มีค่าเท่ากับ
30,008.188 ppmv

ดังนั้น

จากความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน $111.2 \text{ mg/L} = 30,008.188$
ppmv

$$\begin{aligned} \text{ppmv} &= \frac{111.2 \times 10^{-3} \text{ g}}{\text{L}} \times \frac{1}{92.13 \text{ g/mol}} \times \frac{1}{30,008.188 \text{ ppmv}} \\ &= 4.022 \times 10^{-8} \text{ mol/L} \end{aligned}$$

2. การหาความชื้น

การหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมในระบบเพื่อให้ความชื้นในถังปฏิกิริยาเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์

ตัวอย่างการคำนวณ

สภาวะที่ทำการทดลอง

อุณหภูมิ = $46^{\circ}\text{C} = 319 \text{ K}$

ปริมาตรของถังปฏิกิริยา = 0.61 L

หาความดันย่อยของไอน้ำในถังปฏิกิริยา

จาก $P_v = \phi P_g$

โดยที่ P_v = ความดันย่อยของไอน้ำ (KPa)

P_g = ความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่อุณหภูมิที่ทดลอง (KPa)

ϕ = ค่าความชื้นสัมพัทธ์

ดังนั้น $P_v = 0.45 \times 10.144 \text{ KPa}$; ($P_g @ 46^{\circ}\text{C} = 10.144 \text{ KPa}$)

$P_v = 4.565 \text{ KPa}$ #

หาค่ามวลของอากาศชื้นในถังปฏิกิริยา

$$\text{จาก } m_v = \frac{P_v V}{R_v T}$$

โดยที่ m_v = มวลของอากาศชื้นภายในถังปฏิกิริยา (kg)

V = ปริมาตรของถังปฏิกิริยา (m^3)

R_v = ค่าคงที่เท่ากับ 0.462 kJ/kg.K

T = อุณหภูมิ (K)

$$m_v = \frac{4.565 \text{ kPa} \times (0.61 \times 10^{-3}) m^3}{0.462 \text{ kJ / kg.K} \times 319 \text{ K}}$$

$$= 1.889 \times 10^{-5} \text{ kg} \quad \#$$

หาค่าปริมาตรน้ำที่ต้องเติมในถังปฏิกิริยา

จาก ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 46 °C = 0.990 kg/L

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรน้ำที่ต้องเติม} = \frac{1.889 \times 10^{-5} \text{ kg}}{0.990 \text{ kg / L}} \times \frac{10^6 \mu\text{L}}{L} = 19.081 \mu\text{L} \quad \#$$

หาค่าเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำที่เติมในถังปฏิกิริยา

$$= \frac{19.081 \mu\text{L}}{0.610 L} \times \frac{L}{10^6 \mu\text{L}} \times 100$$

$$= 0.03 \%$$

หาค่าความเข้มข้นของน้ำที่เติมในถังปฏิกิริยา

$$\text{จาก น้ำ } 1 \text{ mol} = 18 \text{ g}$$

ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำในถังปฏิกิริยา

$$= \frac{1.889 \times 10^{-5} \text{ kg}}{18 \text{ g/mol}} \times \frac{10^3 \text{ g}}{\text{kg}} \times \frac{1}{0.610 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$= 1.720 \text{ mol/m}^3 \quad \#$$

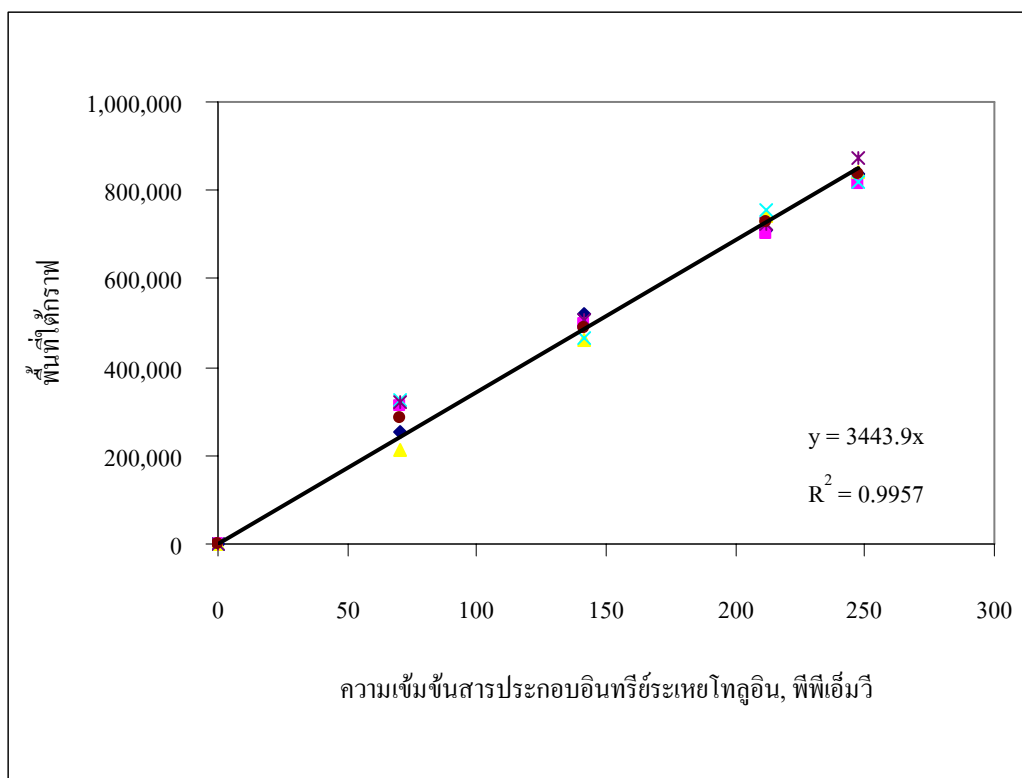
3. การคำนวณหาความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยจากกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่มีความเข้มข้นต่างกัน นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ซึ่งได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟดังแสดงในตารางผนวกที่ ค3

ตารางผนวกที่ ค3 ค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินต่างๆ

ความเข้มข้นสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (ppmv)	พื้นที่ใต้กราฟ
0	0
70.61	285,261
141.22	490,723
211.82	726,352
247.13	838,057

และจากข้อมูลดังตารางผนวกที่ ค3 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (ppmv) กับ พื้นที่ใต้กราฟ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 กราฟมาตรฐานโทลูอินในการทำการทดลองโดยใช้แผ่นกระจกเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่ม 1 ด้าน



ภาพผนวกที่ ค2 กราฟของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatograph ที่เวลา 0.282 นาที

และจากกราฟในภาพผนวกที่ ค2 สามารถใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน กับพื้นที่ใต้กราฟ เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินที่ทำการวิเคราะห์โดยเครื่อง Gas Chromatograph ได้

$$y = 3565.7x \quad \text{โดย } R^2 = 0.9856$$

โดยที่ $y =$ พื้นที่ใต้กราฟ
 $x =$ ความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (ppmv)

ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความเข้มข้นไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอินได้โดยแทนค่าในสมการ

$$\begin{aligned} y &= 3565.7x \\ x &= 184668 / 3443.9 \\ x &= 53.62 \text{ ppmv} \end{aligned}$$

4. การหาค่าพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต

การหาค่าพลังงานของหลอดอัลตราไวโอเลต ชนิด UV Incandescent Blacklights ที่มีค่าความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรที่ใช้ในการทดลอง สามารถหาได้จากสมการที่ 13

จาก

$$E = h\nu$$

และ $\lambda\nu = c$

โดย $E =$ พลังงานรวมของโฟตอนที่ตกกระทบ (eV)
 $h =$ ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck' s constant) มีค่า $4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$
 $\nu =$ ความถี่ของคลื่น (s^{-1})

$$\begin{aligned}\lambda &= \text{ความยาวคลื่น (nm)} \\ c &= \text{ความเร็วของคลื่นแสง มีค่า } 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}\end{aligned}$$

- คำนวณหาค่าความถี่ของหลอดอัลตราไวโอเลต ชนิด UV Incandescent Blacklights ที่มีค่าความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{c}{\lambda} \\ &= \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{365 \text{ nm}} \times \frac{1 \text{ nm}}{10^{-9} \text{ m}} \\ &= 8.219 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

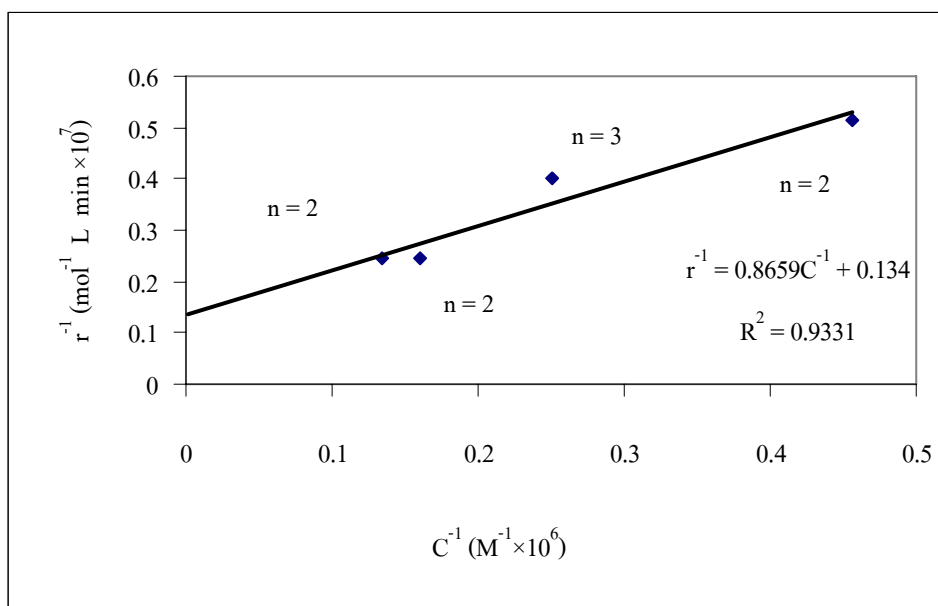
คำนวณหาค่าพลังงานของหลอดอัลตราไวโอเลต ชนิด UV Incandescent Blacklights ที่มีค่าความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

$$\begin{aligned}E &= h\nu \\ &= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV.s} \times 8.219 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \\ &= 3.399 \text{ eV.s}\end{aligned}$$

สำหรับพลังงานที่ทำให้เกิดกระบวนการโฟโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ จะต้องมีย่านอย่างน้อย 3.2 eV ซึ่งจะเห็นได้ว่าหลอดรังสี UV Incandescent Blacklight ที่มีค่าความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรมีค่าพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยา

5. การหาค่าคงที่ต่างๆ ตามสมการในรูปแบบของ L-H

ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาคูดัดผิวตามสมการในรูปแบบของ L-H โดยหาค่า $r_{m,L}$ และค่า K_D สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ ดังภาพผนวกที่ ค3



ภาพผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) ที่เตรียมโดยวิธีการเคลือบแบบ 1 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส

โดยจากสมการที่ 17 และ 18 ซึ่งพิจารณาปฏิกิริยาคูดัดผิวในที่มืด

$$r_D = r_{m,D} \frac{K_D[C]}{1 + K_D[C]}$$

จัดรูปใหม่

$$\frac{1}{r_D} = \frac{1}{r_{m,D} K_D} \frac{1}{[C]} + \frac{1}{r_{m,D}}$$

จะได้

$$\text{ความชัน} = r_{m,D}^{-1} K_D^{-1}$$

$$\text{จุดตัดแกน Y} = r_{m,D}^{-1}$$

โดย

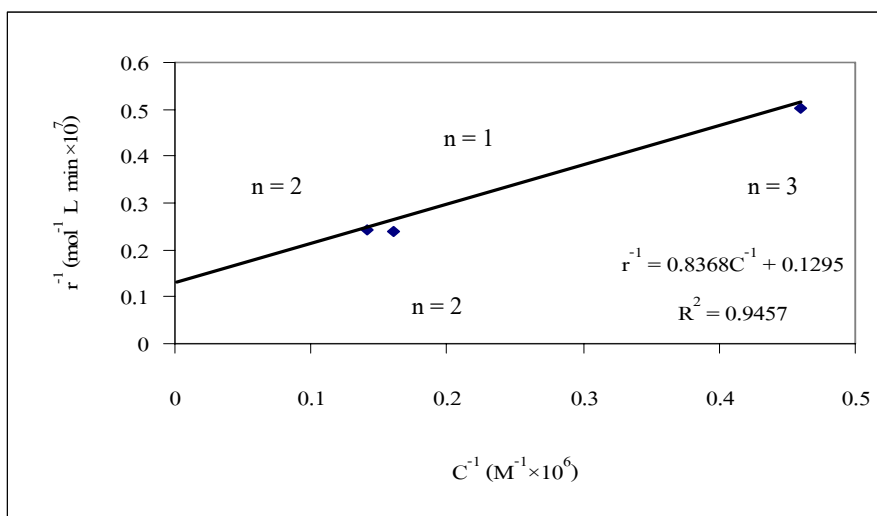
$$\text{ความชัน} = 8.695 \times 10^1 \text{ min}$$

$$r_{m,D}^{-1} = 0.134 \times 10^7 \frac{L \cdot \text{min}}{\text{mol}}$$

$$\text{สามารถคำนวณหา } K_D \text{ ได้เท่ากับ } 154,800 \frac{L}{\text{mol}} = 154.8 \frac{m^3}{\text{mol}}$$

$$\text{และค่า } r_{m,D} = 7.463 \times 10^{-7} \frac{\text{mol}}{L \cdot \text{min}} = 7.463 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{m^3 \cdot \text{min}}$$

และในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันตามสมการ L-H โดยหาค่า $r_{m,L}$ และค่า K_L สามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ ดังภาพผนวกที่ ค4



ภาพผนวกที่ ค4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยโทลูอิน (C^{-1}) กับ ส่วนกลับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (r^{-1}) ที่เตรียมโดยวิธีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ 1 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

โดยจากสมการที่ 15 และ 16 ซึ่งพิจารณาปฏิกิริยาการโฟโตออกซิเดชัน ในกรณีใช้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต

$$r_L = r_L \frac{K_L [C]}{1 + K_L [C]}$$

จัดรูปใหม่

$$\frac{1}{r_L} = \frac{1}{r_{m,L} K_L} \frac{1}{[C]} + \frac{1}{r_{m,L}}$$

จะได้

$$\text{ความชัน} = r_{m,L}^{-1} K_L^{-1}$$

$$\text{จุดตัดแกน } Y = r_{m,L}^{-1}$$

โดย

$$\text{ความชัน} = 8.368 \times 10^1 \text{ min}$$

$$r_{m,L}^{-1} = 0.1295 \times 10^7 \frac{L \cdot \text{min}}{\text{mol}}$$

$$\text{สามารถคำนวณหา } K_L \text{ ได้เท่ากับ } 154,900 \frac{L}{\text{mol}} = 154.9 \frac{m^3}{\text{mol}}$$

$$\text{และค่า } r_{m,L} = 7.722 \times 10^{-7} \frac{\text{mol}}{L \cdot \text{min}} = 7.722 \times 10^{-4} \frac{\text{mol}}{m^3 \cdot \text{min}}$$

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันสูงสุดต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิตผิวสูงสุด ในกรณีนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19 ดังนี้

จาก

$$\sigma = \frac{r_{m,L}}{r_{m,D}}$$

แทนค่าต่างๆที่คำนวณได้ข้างต้นในสมการจะได้

$$\sigma = \frac{7.722 \times 10^{-4}}{7.463 \times 10^{-4}}$$

$$\sigma = 1.04$$

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคูคิตผิว ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เตรียมโดยวิธีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบ 1 ด้าน ที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 165.7 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1.04

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	25 มกราคม 2519
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. สิ่งแวดล้อม ม.เทคโนโลยีสุรนารี
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์