



ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน
โดยฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ

ปัทมพร จันทร์กลม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน
โดยฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์พีแอลเอ



ปัทมพร จันทร์กลม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

REMOVAL EFFICIENCY OF BENZENE BY PHOTOCATALYTIC OXIDATION
USING TiO₂/PLA-COMPOSITE FILM



PATTAMAPHON CHANKLOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER OF SCIENCE
IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY
FACULTY OF PUBLIC HEALTH
BURAPHA UNIVERSITY

2020

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ปัทมพร จันทร์กมล ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของมหาวิทยาลัยบูรพา
ได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ต่อพงศ์ กิริษชาติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รชฎี โชติกาวิินทร์)

คณบดีคณะสาธารณสุขศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี รอดจากภัย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย ของ
มหาวิทยาลัยบูรพา

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.นุจรี ไชยมงคล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

61920023: สาขาวิชา: อาชีวอนามัยและความปลอดภัย; วท.ม. (อาชีวอนามัยและความปลอดภัย)

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ระเหยง่าย, เบนซีน, โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน, โททานิยมไดออกไซด์, พีแอลเอ, फिल्मโททานิยมไดออกไซด์/พีแอลเอ, ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

บทมพร จันทรกุลม : ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดยฟิล์มโททานิยมไดออกไซด์/พีแอลเอ. (REMOVAL EFFICIENCY OF BENZENE BY PHOTOCATALYTIC OXIDATION USING TiO_2/PLA -COMPOSITE FILM) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข, Ph.D., รชฤดี โชติกาวิรินทร์, Ph.D. ปี พ.ศ. 2563.

การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นหนึ่งในกระบวนการควบคุมสิ่งคุกคามสุขภาพตามขอบเขตงานสุขศาสตร์อุตสาหกรรม กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และได้รับความนิยม พีแอลเอเป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากพืชถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการสังเคราะห์ TiO_2 และพีแอลเอให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีขั้นตอนการผลิตและใช้วัตถุดิบที่น้อยลง ศึกษาปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเป่าฟิล์มโดยปริมาณ TiO_2 ที่ 5%, 10% และ 15% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพ ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนและความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ผลการศึกษาพบว่า PLA ผสมกับ TiO_2 เข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักสามารถสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเป่าฟิล์ม จากภาพ SEM พบ TiO_2 มีการกระจายตัวบนผิวฟิล์มอย่างสม่ำเสมอ มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.14, 3.18 และ 3.22 eV ตามลำดับ โครงสร้างของ TiO_2 และ PLA ไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังผ่านการเป่าฟิล์ม การบำบัดเบนซีนเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดย 5%, 10% และ 15% TiO_2/PLA -composite film มีประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนเท่ากับร้อยละ 44, 42 และ 32 ตามลำดับ ฟิล์มที่ได้พัฒนาขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 5% TiO_2/PLA -composite film มีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

61920023: MAJOR: OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY; M.Sc.
(OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY)

KEYWORDS: VOCs, VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS, BENZENE,
PHOTOCATALYTIC OXIDATION, TITANIUM DIOXIDE, PLA,
TiO₂/PLA-COMPOSITE FILM, ECO-EFFICIENCY

PATTAMAPHON CHANKLOM : REMOVAL EFFICIENCY OF BENZENE BY
PHOTOCATALYTIC OXIDATION USING TiO₂/PLA-COMPOSITE FILM. ADVISORY
COMMITTEE: TANONGSAK YINGRATANASUK, Ph.D., ROTRUEDEE CHOTIGAWIN,
Ph.D. 2020.

Removal of VOCs is a process of controlling hazard according to industrial hygiene. Photocatalytic oxidation is effectiveness, non-toxicity, environmentally friendly technology, and widely used. A plant-based biodegradable poly (lactic acid) PLA was used as bio-supporter for TiO₂ photocatalyst.

The research was aimed to improve incorporating TiO₂-anatase in PLA for using as environmentally friendly photocatalyst material which use less process and materials. To study appropriate dosage of TiO₂-anatase for synthesized the 5%, 10%, and 15%TiO₂/PLA-composite film using blown film technique. To study physical properties of photocatalyst, removal efficiency of benzene and eco-efficiency.

The result indicated that TiO₂ dosages with PLA in 5,10 and 15% wt./wt. were incorporated utilizing a blown film technique. The SEM images showed homogeneity of the distribution of TiO₂ on the PLA matrix. Band gap energies of TiO₂ in PLA/TiO₂-composite film are 3.14, 3.18, and 3.22 eV, respectively. There is no alteration of structure of TiO₂ and PLA after blown film technique. The benzene degradation rate constants were obtained by fitting the experimental data using first order reaction kinetics. Efficiency of removal benzene was 44%, 42%, and 32% using 5%, 10%, and 15%TiO₂/PLA-composite film, respectively. Improvement of TiO₂/PLA-composite film are eco-efficiency especially 5%TiO₂/PLA-composite film is the best.

กิตติกรรมประกาศ

ขอรำลึกในพระมหากรุณาธิคุณของพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีและขอขอบพระคุณมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีที่ได้สนับสนุนการค้นคว้าวิจัยฉบับนี้

ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ทงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข ผู้ช่วยศาสตราจารย์จตุดี โชติกาวิินทร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ช่วยศาสตราจารย์โกวิท สุวรรณหงษ์ คณาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ ข้อเสนอแนะ เพื่ออุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังมอบความเมตตาและกรุณาต่อข้าพเจ้าตลอดมา

ปัทมพร จันทร์กลม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
สมมติฐานของการวิจัย	4
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
ขอบเขตของการวิจัย	6
นิยามศัพท์เฉพาะ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
คุณภาพอากาศในอาคาร	8
สารอินทรีย์ระเหยง่าย	12
เบนซีน	18
ค่ามาตรฐานของเบนซีน	22
การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	22
กระบวนการดูดซับ	27

กระบวนการสลายด้วยแสง	27
กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	28
จลนศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	45
การออกแบบเครื่องฟอกอากาศสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	51
ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ	54
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
รูปแบบของการวิจัย	57
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	58
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ	59
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	63
จริยธรรมการวิจัย	63
การสังเคราะห์ TiO ₂ /PLA-composite film ด้วยวิธีเป่าฟิล์ม	63
เตรียมเครื่องฟอกอากาศและถังปฏิกรณ์	64
ศึกษาคุณสมบัติของ TiO ₂ /PLA-composite film	68
ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน	68
การวิเคราะห์ข้อมูล	70
บทที่ 4 ผลการวิจัย	72
ส่วนที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO ₂ /PLA-composite film	72
ส่วนที่ 2 คุณสมบัติของ TiO ₂ /PLA-composite film	75
ส่วนที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน	78
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	88
สรุปและอภิปรายผล	88
ข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม	91

ภาคผนวก111

ประวัติย่อของผู้วิจัย117



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ.....	11
ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย	12
ตารางที่ 3 ตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	13
ตารางที่ 4 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่าย.....	14
ตารางที่ 5 ขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติ.....	16
ตารางที่ 6 ค่าฝ้าระวังสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศในเวลา 1 ปี.....	17
ตารางที่ 7 มาตรฐานค่าฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศทั่วไปในเวลา 24.....	17
ตารางที่ 8 คุณสมบัติเบนซีน	19
ตารางที่ 9 ระดับความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศพื้นที่ทำงาน	22
ตารางที่ 10 วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	24
ตารางที่ 11 การตรึงไททานเนียมไดออกไซด์.....	34
ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ถูกยึดตรึงด้วยเทคนิคต่าง ๆ	35
ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของไททานเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงในรูปแบบต่าง ๆ	36
ตารางที่ 14 วรรณกรรมที่มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน ...	42
ตารางที่ 15 โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน.....	50
ตารางที่ 16 การทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน	70
ตารางที่ 17 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO ₂ /PLA composite film	77
ตารางที่ 18 สภาวะที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดสารเบนซีน.....	80
ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนที่ 24 ชั่วโมง.....	81
ตารางที่ 20 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งที่เกิดในกระบวนการบำบัดเบนซีน	84

ตารางที่ 21 ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาจากการคำนวณด้วยสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด84



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	5
ภาพที่ 2 กลไกการเกิดพิษของเบนซีน	21
ภาพที่ 3 เทคโนโลยีในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	23
ภาพที่ 4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	29
ภาพที่ 5 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย	30
ภาพที่ 6 รูปแบบผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์.....	33
ภาพที่ 7 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	39
ภาพที่ 8 กลไกการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	40
ภาพที่ 9 ความเข้มข้นสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์กับเวลา	46
ภาพที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้น A และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	47
ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log A$ และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	48
ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง	49
ภาพที่ 13 เครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith	52
ภาพที่ 14 ภาพตัดขวางภายในของเครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith	52
ภาพที่ 15 เครื่องฟอกอากาศแบบ Fluidized bed reactor	53
ภาพที่ 16 เครื่องฟอกอากาศแบบ Annular	54
ภาพที่ 17 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	58
ภาพที่ 18 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	60
ภาพที่ 19 เครื่องเป่าฟิล์ม.....	60
ภาพที่ 20 เครื่องวัดความเข้มแสงยูวีซี.....	61
ภาพที่ 21 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR).....	61

ภาพที่ 22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	62
ภาพที่ 23 เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS).....	62
ภาพที่ 24 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (GC-FID).....	63
ภาพที่ 25 ภายในเครื่องฟอกอากาศ.....	65
ภาพที่ 26 เครื่องฟอกอากาศภายในถังปฏิกรณ์.....	65
ภาพที่ 27 ภายในเครื่องฟอกอากาศ.....	66
ภาพที่ 28 ถังปฏิกรณ์ภายนอก.....	66
ภาพที่ 29 ถังปฏิกรณ์และแผงควบคุม.....	67
ภาพที่ 30 ภายในถังปฏิกรณ์.....	67
ภาพที่ 31 ตัวอย่างการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	73
ภาพที่ 32 ตัวอย่างการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง.....	73
ภาพที่ 33 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้ขณะผ่านเครื่องเป่าฟิล์ม.....	74
ภาพที่ 34 TiO ₂ /PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้.....	74
ภาพที่ 35 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของ TiO ₂ /PLA-composite film.....	75
ภาพที่ 36 ช่วงการดูดกลืนแสงของ TiO ₂ /PLA-composite film.....	76
ภาพที่ 37 ผลการตรวจด้วยเทคนิค ATR-FTIR.....	77
ภาพที่ 38 ระดับความเข้มข้นของเบนซินขณะบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส.....	78
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnCt กับเวลาในกระบวนการโฟโตไลซิส.....	79
ภาพที่ 40 ระดับความเข้มข้นของเบนซินที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน.....	81
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnCt กับ t เมื่อบำบัดด้วย 5%TiO ₂ /PLA-composite film.....	82
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnCt กับ t เมื่อบำบัดด้วย 10%TiO ₂ /PLA-composite film.....	83
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง lnCt กับ t เมื่อบำบัดด้วย 15%TiO ₂ /PLA-composite film.....	83
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่าง (C0-Ct)/t กับ [ln(C0/Ct)]/t เมื่อบำบัดด้วย 5%TiO ₂ /PLA-.....	85
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่าง (C0-Ct)/t กับ [ln(C0/Ct)]/t เมื่อบำบัดด้วย 10%TiO ₂ /PLA-.....	85

- ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C0-Ct)/t$ กับ $[\ln(C0/Ct)]/t$ เมื่อบำบัดด้วย 15%TiO₂/PLA-86
- ภาพที่ 47 ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจของTiO₂/PLA-composite film.....87



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตหรือการสังเคราะห์โดยมีจุดเดือดไม่เกิน 250 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (Curran & Strlić, 2015) สามารถพบได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง สี กาว ตัวทำละลาย (Lamplugh et al., 2019; Méausoone et al., 2019) อุตสาหกรรมที่พบสารอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น โรงกลั่นปิโตรเคมี โรงงานยางสังเคราะห์ โรงงานผลิตสี โรงงานกระดาษ โรงงานผลิตยูทริกซ์ โรงงานพลาสติก โรงงานผลิตคอมพิวเตอร์ โรงกำจัดขยะและน้ำเสีย และการเผาไหม้ของเครื่องจักร เป็นต้น และยังพบได้ในอาคาร ที่พักอาศัยอีกด้วย จะเห็นได้ว่าไม่มีที่ใดที่ไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Tuomi & Vainiotalo, 2014)

สารอินทรีย์ระเหยง่ายส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้ทั้งเฉียบพลันและเรื้อรัง เช่น กลุ่มอาการเจ็บป่วยจากอาคาร (Joshi, 2008; Mitha et al., 2013; Schell, Burnitz, & Lathrop, 2010) มีผลกระทบต่อโรคผิวหนังแพ้ผิวหนัง (Atopic dermatitis) (Kim, Kim, Lim, Lee, & Kim, 2016) เพิ่มโอกาสเกิดโรคมะเร็ง ทำให้เกิดโรคหืดในวัยทำงานสัมพันธ์กับงานที่ทำ (Work-related asthma) (Lejeune, 2009; Quirce & Barranco, 2010) สารอินทรีย์ระเหยง่ายจึงเป็นหนึ่งในคุณภาพอากาศในอาคารที่ต้องควบคุมไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงาน

นอกจากนี้สารอินทรีย์ระเหยง่ายยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เกิดเป็น โอโซน (Ozone) เมื่ออยู่ร่วมกับฝุ่นละอองในอากาศเกิดเป็นหมอกควัน (Photochemical smog) ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศส่งผลให้สมรรถภาพปอดลดลง กระตุ้นให้โรคหืดและโรคปอดอุดกั้นเรื้อรังกำเริบ (Bernstein et al., 2008; Brauer & Vedal, 1999)

เบนซีน (Benzene) เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดหนึ่งมีโครงสร้างแบบแอมัลติก ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เบนซีนเป็นสาเหตุก่อให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Leukemia) หลายประเภท ได้แก่ มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันแบบไม่ใช้ลิมโฟไซต์ (Acute non-lymphocytic leukemia) มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันแบบไมอีลอยด์ (Acute myeloid leukemia) มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันแบบลิมโฟไซต์ (Acute lymphocytic leukemia) ทำให้เกิดมะเร็งปอด (Lung cancer) และมะเร็งต่อมน้ำเหลือง (Lymphoma) (Loomis et al., 2017)

ประเทศไทยยังคงมีปัญหการรับสัมผัสเบนซิน โดยเฉพาะบริเวณนิคมอุตสาหกรรม มาบตาพุด จังหวัดระยอง มีการเฝ้าระวังระดับเบนซินในสิ่งแวดล้อมพบว่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน อีกทั้งยังพบว่าประชาชนโดยรอบมีอุบัติการณ์โรคระบบทางเดินหายใจและโรคมะเร็งสูงขึ้น (Kampeerawipakorn et al., 2017) จากปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมสามารถสะท้อนไปถึงระดับเบนซินในพื้นที่ทำงานที่อาจจะเกินเกณฑ์มาตรฐานและปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจนตรวจพบว่าเบนซินในสิ่งแวดล้อมมีระดับเกินกว่ามาตรฐานได้ โดยเบนซินหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่อคุณภาพอากาศในอาคาร

จากงานวิจัยพบว่าคนงานได้รับสัมผัสเบนซินมากถึง 5 ส่วนในล้านส่วน (Seyed Younes, Mansour Rezazadeh, Raana Taiefteh, & Elahe, 2015) ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่แนะนำโดยสถาบันอาชีวอนามัยและความปลอดภัยแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (National Institute for Occupational Safety and Health: NIOSH) กลุ่มผู้ประกอบการอาชีพริมถนน ในเขตมาบตาพุด จังหวัดระยองได้รับสัมผัสเบนซินเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 10.93 ± 10.50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ผาน ปัทมะ พลอยง, อนามัย เทศกะทีก และนันทพร ภัทรพุทธ, 2561) อย่างไรก็ตามแม้ว่าคนงานจะได้รับระดับเบนซินจะอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานก็ตาม มิได้ยืนยันว่าคนงานที่สัมผัสเบนซินจะไม่เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ (Kampeerawipakorn et al., 2017)

การคาดการณ์ ตรวจจับ ประเมิน และควบคุมสิ่งคุกคามเป็นหลักการทางสุขศาสตร์อุตสาหกรรมในการป้องกันสิ่งที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งการควบคุมสารอินทรีย์ระเหยง่ายอันเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ มี 3 แนวทาง ได้แก่ ควบคุมที่แหล่งกำเนิด (Source) ควบคุมที่ทางผ่าน (Path) ควบคุมที่คนงาน (Receiver) โดยแนวทางการควบคุมที่แหล่งกำเนิดเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูง (Bhusnure, 2018)

วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารในปัจจุบันมีหลายวิธี ได้แก่ เทคโนโลยีกายภาพ เทคโนโลยีเคมีและเทคโนโลยีชีวภาพ (Bouchaala, 2012; Tang, 2016) อาทิเช่น การดูดซับ (Adsorption) ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) (Patil, Jeong, Lim, Byun, & Han, 2019) การใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation) (Torpy et al., 2018) กระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) การใช้โอโซน (Ozonation) (da Costa Filho et al., 2019) การใช้ปฏิกิริยาความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Thermal Catalytic Oxidation) (Shah & Li, 2019) และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Photo catalytic Oxidation) (He et al., 2019)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันถูกใช้อย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาด (Pawar, Sendodular, & Gouma, 2018) ไม่เกิดขยะต่อเนื่องดังเช่นการดูดซับที่ถ่านกัมมันต์บางส่วนเสื่อมสภาพ กระบวนการโฟโตคะตะไลติก

ออกซิเดชันบำบัดแล้วได้สารที่ไม่มีความเป็นพิษ (Pawar et al., 2018; Sunun, Wipawee, Ratthapol, & Kowit, 2017) และเป็นเทคโนโลยีที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม (Sunun et al., 2017) นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ต่ำ (Shah & Li, 2019) และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง (Y. Huang et al., 2016; Shah & Li, 2019) จากจุดเด่นของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้เป็นสารที่ไม่มีพิษ ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการอื่นที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายไม่ได้ถูกกำจัดโดยแท้จริง เปรียบเสมือนการย้ายปัญหาที่ต้องบำบัดสารเคมีในรูปอื่นต่อไป และยังสามารถกำจัดแบคทีเรียได้อีกด้วย (Djellabi, Ali, Zhao, Saber, & Yang, 2020; Regmi, Joshi, Ray, Gyawali, & Pandey, 2018)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอาศัยการทำงานของสารกึ่งตัวนำภายใต้รังสียูวีมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ทำให้เกิดตัวออกซิไดซ์ขึ้นระหว่างกระบวนการซึ่งไปย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (Shah & Li, 2019; Sunun et al., 2017) ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำนิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (X. Chen & Mao, 2007; Kreetachat, Krueenate, & Suwannahong, 2013; Lin, Weng, Tzeng, & Lin, 2016; Mishra & Mukhopadhyay, 2019; K. Suwannahong, Liengcharernsit, Sanongraj, & Krueenate, 2012; X. Yan, 2015; Xia, Zhang, Murowchick, & Chen, 2014; Yao, Zhong, & Shen, 2015) เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีความปลอดภัย ราคาถูก มีปริมาณมาก เสถียร สามารถใช้ซ้ำได้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ (Sunun et al., 2017) เพื่อเป็นการประหยัดไททาเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดมลพิษต่าง ๆ จึงนำไททาเนียมไดออกไซด์มายึดตรึง (Immobilization) ไว้กับวัสดุต่าง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ไททาเนียมไดออกไซด์ไหลไปกับอากาศที่บำบัด เช่น พลาสติกชนิดต่าง ๆ (Ohtani, Adzuma, Nishimoto, & Kagiya, 1992; Tu-morn, Pairoh, Sutapun, & Trongsatitkul, 2019) โลหะสแตนเลสผสมไททาเนียม (Y. Chen & Dionysiou, 2006) ทองแดงและเหล็กไททาเนียม (D. Zhang, 2010) หรือสารจากธรรมชาติ เช่น เส้นใยไหม (Sha, Zhao, & Xiao, 2013) โดยตัวกลางที่เป็นทองแดงสามารถป้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ส่วนลูกแก้ว กระจกสไลด์ เม็ดแก้ว แก้วทรงกลมและแผ่นกระจก ซึ่งเป็นตัวกลางที่มีพื้นผิวเรียบต้องใช้สารที่ช่วยในการยึดติด (Hänel, Moreń, Zaleska-Medynska, & Jan, 2010; Nawi & Zain, 2012; Vaiano, Sacco, Sannino, & Ciambelli, 2015)

ตัวกลางที่ได้รับความนิยมเป็นพลาสติก (K. Suwannahong et al., 2012) เนื่องจากมีความทนทานและราคาถูก แต่ทว่าหลังจากหมดอายุการใช้งานแล้วย่อยสลายยากทำให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้จึงใช้พลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอที่ผลิตจากการหมักพืช ซึ่งปลอดภัย

ย่อยสลายง่ายและไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Kreetachat, 2015; K. Suwannahong, Kreetachat, & Krueenate, 2013; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019)

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเป็นการสร้างสมดุลระหว่างความก้าวหน้าเศรษฐกิจควบคู่ไปกับการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นใช้พลาสติกที่ย่อยสลายยาก แม้ว่าจะราคาถูก แต่ทว่าทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันจึงมีแนวคิดด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เชิงนิเวศขึ้น เพื่อใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า มีความก้าวหน้าทางเศรษฐกิจ และไม่มีปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา (B. Zhang, Bi, Fan, Yuan, & Ge, 2008)

งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการทางวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรมในการควบคุมสิ่งคุกคามด้วยการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดไททานเนียมไดออกไซด์กับพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ (TiO₂/PLA-composite film) เพื่อใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสำหรับบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้เบนซีนเป็นตัวแทนเนื่องจากเป็นสารก่อมะเร็ง มีอันตรายต่อสุขภาพผู้ปฏิบัติงานและยังคงเป็นปัญหาในประเทศไทย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์นี้พัฒนาให้สามารถย่อยสลายได้ง่าย ไม่เกิดเป็นมลพิษสิ่งแวดล้อม มีขั้นตอนการผลิตน้อยลง และลดต้นทุน (Tharasawatpipat, 2015; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019) รวมถึงศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ควบคู่ เพื่อมุ่งไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน อันเป็นเป้าหมายโดยรวมของนานาประเทศในระยะยาวต่อไป

สมมติฐานของการวิจัย

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดย TiO₂/PLA-composite film ที่ผลิตด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม สามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทเบนซีนได้ร้อยละ 40

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ส่วนที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนของ TiO₂/PLA-composite film ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

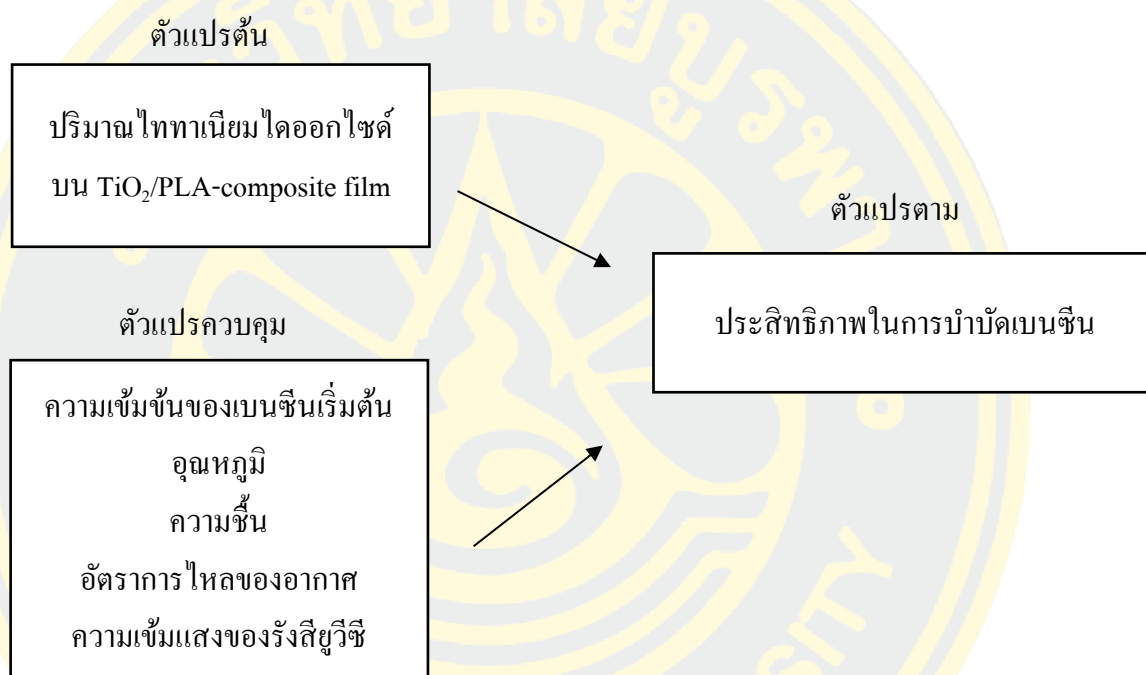
1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film
2. เพื่อศึกษาคูสมบัติทางกายภาพของ TiO₂/PLA-composite film ด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer: UV-VIS) และเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)

3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดย TiO₂/PLA-composite film

4. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดยใช้ TiO₂/PLA-composite film

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคโนโลยีบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่สามารถเป็นเครื่องฟอกอากาศใช้ในอาคาร
2. ได้แนวทางประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเพื่อลดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสถานประกอบการ และสามารถลดปริมาณการรับสัมผัสสารอินทรีย์ระเหยง่ายของผู้ปฏิบัติงานได้
3. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO₂/PLA-composite film ที่มีประสิทธิภาพ

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยสังเคราะห์ TiO_2/PLA -composite film ด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง โครงสร้างและองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนของ TiO_2/PLA -composite film ภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 785 ลิตร ด้วยเครื่องฟอกอากาศ ระหว่างเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563

นิยามศัพท์เฉพาะ

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) หมายถึง สารกึ่งตัวนำเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน มีสูตรโมเลกุลเป็น TiO_2 มีโครงสร้างเป็นอนาตาส (Anatase phase) มีแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ ประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า อะตอมไททาเนียม 1 อะตอม ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน 6 อะตอม (Berardo, 2015)

ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ หมายถึง ระดับความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักของฟิล์ม (W/ W%)

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid: PLA) หมายถึง พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ที่ผลิตจากโพลิแลคติก ภายหลังจากการใช้งานพลาสติกสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ พอลิแลคติกสามารถผลิตได้จากวัสดุตามธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือโม่พืชให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นจึงผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) อาศัยแบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้เป็นกรดแลคติก (Lactic acid) นำไปผ่านกระบวนการทางเคมี กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กระบวนการกลั่นในระบบสุญญากาศ และกระบวนการขับน้ำ (Dehydration) จึงได้เป็นพอลิแลคติก

ไททาเนียมไดออกไซด์/พอลิแลคติก (TiO₂/PLA-composite film) หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อาศัยพลังงานแสงในการเร่งปฏิกิริยา โดยประกอบไปด้วยไททาเนียมไดออกไซด์บนพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกในรูปของฟิล์ม

สถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง หมายถึง ความเข้มข้นเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (W/ W%) ของไททาเนียมไดออกไซด์ในส่วนผสมผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ด้วยเทคนิคเป่าฟิล์ม (Blown film)

คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง หมายถึง คุณสมบัติทางกายภาพของ TiO_2/PLA -composite film ได้แก่ การกระจายตัวของไททานเนียมไดออกไซด์บนพลาสติกพีแอลเอซึ่งประเมินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แถบช่องว่างพลังงานซึ่งประเมินด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบธาตุซึ่งประเมินด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน หมายถึง ร้อยละของเบนซีนที่ถูกบำบัดไปในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ หมายถึง คุ้มค่าในการบำบัดเบนซีนโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันด้วย TiO_2/PLA -composite film เทียบกับต้นทุนการบำบัดเบนซีน พิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ประสิทธิภาพในการบำบัด และความเข้มข้นของไททานเนียมไดออกไซด์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดยฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ (TiO₂/PLA-composite film) โดยทำการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite และศึกษาคุณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film ผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีเนื้อหาดังนี้

1. คุณภาพอากาศในอาคาร
2. สารอินทรีย์ระเหยง่าย
3. เบนซิน
4. ค่ามาตรฐานของเบนซิน
5. การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย
6. กระบวนการดูดซับ
7. กระบวนการสลายด้วยแสง
8. กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน
9. จลนศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน
10. การออกแบบเครื่องฟอกอากาศ

คุณภาพอากาศในอาคาร

คุณภาพอากาศในอาคาร หมายถึง สภาพที่อากาศภายในอาคารไม่มีสิ่งเจือปนหรือมีสิ่งเจือปนต่ำจนไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ สิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ทรัพย์สินและสิ่งแวดล้อมโดยรอบ สิ่งปนเปื้อนที่พบในอากาศได้บ่อย มีดังนี้

1. อนุภาคฝุ่น (Particle matter) เป็นได้ทั้งของแข็งและของเหลวที่มีขนาดเล็กจนลอยในอากาศได้ มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ เช่น หิน ดิน ทราย และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง การคมนาคม การก่อสร้าง โรงงานอุตสาหกรรม การจุดธูปเทียนและการสูบบุหรี่ อนุภาคเหล่านี้ส่งผลกับทางเดินหายใจ (Phung et al., 2018) แบ่งอนุภาคฝุ่นตามขนาดอนุภาคได้ 3 ประเภท ดังนี้

1.1 อนุภาคฝุ่นทั้งหมด (Total suspended particulate, TSP) มีขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน

1.2 อนุภาคฝุ่นที่ขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) (Siwarom et al., 2017)

1.3 อนุภาคฝุ่นที่ขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) (Phung et al., 2018)

2. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและไม่มีฤทธิ์ระคายเคือง ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เช่น การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ การหุงต้ม การสูบบุหรี่ การจุกจุกเทียนและการจุดตะเกียง เป็นต้น (Siwarom et al., 2017)

3. สารประกอบกลุ่มโพลีไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons) สารกลุ่มนี้มีมากกว่า 100 ชนิด (Zhu et al., 2011) เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันดิน (Coal tar) น้ำมันดิบ (Crude oil) น้ำมันเครื่องยนต์ (Gasoline) และการเผาขยะ เป็นต้น ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Sansom, Kirsch, Stone, McDonald, & Horney, 2018) สำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม สหรัฐ (United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA) ได้จัดกลุ่มสารประกอบโพลีไซคลิกแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนบางชนิดว่าอาจทำให้เกิดมะเร็ง (Probable human carcinogen) ที่เต้านม ปอด ทางเดินอาหารและกระเพาะปัสสาวะได้ (Armstrong, Hutchinson, Unwin, & Fletcher, 2004; Bosetti, Boffetta, & La Vecchia, 2007; Mastrangelo, Fadda, & Marzia, 1996; Mordukhovich et al., 2016; J. Zhang et al., 2016) เช่น benzo(A)anthracene, chrysene, benzo(A)pyrene, benzo(B)fluoranthene, benzo(K)fluoranthene, dibenz(A,h)anthracene, and indeno(1,2,3-cd)pyrene (National Toxicology Program (NTP), 2005)

4. ไนโตรเจนออกไซด์ (Nitrogen oxides) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxides) เรียกรวมได้ว่า NO_x (Siwarom et al., 2017) เป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Ezratty et al., 2014) เช่น เครื่องยนต์ การเผาขยะ การเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรมและพบจากอุตสาหกรรมผลิตกรดไนตริก ชุบโลหะและผลิตวัตถุระเบิด เป็นต้น (Ielpo et al., 2019) ไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุก 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มโอกาสเสียชีวิตจากโรคหัวใจและหลอดเลือด โรคเส้นเลือดสมองและโรคหัวใจขาดเลือดร้อยละ 1.89, 2.07 และ 1.95 ตามลำดับ (Luo et al., 2016) นอกจากนี้ NO_x ยังมีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound) เกิดเป็น โอโซน ในชั้นบรรยากาศซึ่งมีผลกระทบต่อสมรรถภาพปอด (Marty, Spurlock, & Barry, 2010)

5. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur oxides) (Siwarom et al., 2017) เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นฉุน เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม ถลุงโลหะ ผลิตกระดาษ ผลิตแบตเตอรี่ ผลิตแก้ว ถนอมอาหารในเบียร์ ไวน์และเนื้อ เป็นต้น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์มี

ฤทธิ์ระคายเคืองทางเดินหายใจ ทำให้เจ็บคอ ไอ กระตุ้นหอบหืด หายใจลำบาก หลอดลมอักเสบเรื้อรัง ปอดอักเสบ และปอดเกิดพังผืดได้ (Andersson et al., 2006)

6. โอโซน (Ozone) เป็นก๊าซสีน้ำตาลแดง มีกลิ่นฉุน เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างไนโตรเจนไดออกไซด์กับสารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือไฮโดรคาร์บอนภายใต้ความร้อนและแสงแดด (Abbatt & Wang, 2020; Siwarom et al., 2017) ทำให้พบได้มากบริเวณที่มีรถยนต์สัญจรมาก โอโซนใช้ในการเชื่อมโลหะ ฟอกสีอาหาร ฟอกสีสิ่งทอ และกระบวนการผลิตกระดาษ (Thurston, 2017) โอโซนสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่มีปริมาณน้อย เช่น พายุแลบ พายุผ่า เกิดจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล (Photochemical reactions) โอโซนสามารถเกิดได้จากยางไม้และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โอโซนที่พบในอาคารส่วนใหญ่มาจากภายนอกอาคาร โอโซนทำให้ปอดอักเสบ และปอดเป็นพังผืดได้ (Mumby, Chung, & Adcock, 2019)

7. สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds) สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตหรือการสังเคราะห์โดยมีจุดเดือดไม่เกิน 250 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (Curran & Strlič, 2015) พบสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้จากหลายแหล่ง เช่น ปฏิกิริยาผลิต การเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง ไม้ ถ่านหิน สี กาว ตัวทำละลาย รวมไปถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน สารอินทรีย์ระเหยง่ายถือเป็นมลพิษทางอากาศที่มีพิษต่อสุขภาพ (Hazardous air pollutants, HAPs) (Brantley, Thoma, & Eisele, 2015) มีฤทธิ์ระคายเคือง ทำให้แสบตา เจ็บคอ ไอ หายใจลำบาก คลื่นไส้ สารบางชนิดมีผลกดระบบประสาทส่วนกลาง ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (American Lung Association, 2018) มีผลต่อระบบสืบพันธุ์ ทำให้ทารกพิการแต่กำเนิด (Thurston, 2017)

8. สารปนเปื้อนทางชีวภาพ (Biological pollutants) (Siwarom et al., 2017) เช่น สปอร์รา กลุ่ม Penicillium, Aspergillus, Cladosporium และ Alternaria พบมากในอาคารที่มีความชื้นและน้ำรั่วซึม เชื้อแบคทีเรีย Legionella pneumophila มาจากบริเวณที่มีน้ำขัง เช่น น้ำพุ น้ำในระบบทำความเย็น (Paschke, Schaible, & Hein, 2019) พบว่าในบ้านพักมีเชื้อแบคทีเรียสูงเกินค่ามาตรฐานขององค์การนักสุขศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐแห่งอเมริกาที่ไม่ควรเกิน 500 Colony forming unit/m³ (American conference of governmental industrial hygienist: ACGIH) (Luksamijarulkul, Suknongbung, Vatanasomboon, & Sujirarat, 2017) สารปนเปื้อนทางชีวภาพกระตุ้นโรคปอด โรคภูมิแพ้และโรคทางระบบประสาทให้กำเริบ ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจและทางเดินอาหาร (Ghanizadeh & Godini, 2018)

9. เรดอน (Radon) เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี เช่น ยูเรเนียม-238 (Urenium-238) ซึ่งพบมากในดิน น้ำบาดาลและสิ่งก่อสร้าง (Frumkin & Samet, 2001) ทำให้เกิดมะเร็งปอด (Lantz, Mendez, & Philbert, 2013)

คุณภาพอากาศภายในอาคารที่เหมาะสม

คุณภาพอากาศในอาคารมีค่ามาตรฐานจากหลายองค์กร เช่น กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2000) มาตรฐานวิศวกรรม ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (ASHRAE, 2010) และมาตรฐานของประเทศสิงคโปร์ (SPRING Singapore) (Singapore Standards Council, 2016) โดยสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศ

Parameter	ประกาศ	WHO	ASHRAE	SPRING	หน่วย
	กรมอนามัย ปี พ.ศ. 2557	ปี ค.ศ. 2000	ปี ค.ศ. 2010	Singapore ปี ค.ศ. 2016	
คาร์บอนไดออกไซด์	สูงกว่าภายนอก ไม่เกิน 700	5,000	1,000	สูงกว่าภายนอก ไม่เกิน 700	ppm
คาร์บอนมอนอกไซด์	9	10	9	9	ppm
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	5	-	-	ppm
ไนโตรเจนไดออกไซด์	-	0.1	-	-	ppm
โอโซน	0.1	0.048	0.027	0.1	ppm
สารอินทรีย์ระเหยง่าย	3	-	-	3	ppm
ฟอร์มัลดีไฮด์	120	0.081	0.05	0.1	ppm
ความชื้นสัมพัทธ์	≤65	-	30-60	≤70	%
อุณหภูมิ	24-26	-	20-26	24-26	°C
ยีสต์และรา	500	500	-	500	CFU/m ³
PM 2.5	35	-	15	35	mcg/m ³
PM 10	50	-	50	50	mcg/m ³
อากาศเคลื่อนที่	-	-	-	0.1-0.3	m/s

สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สหภาพยุโรปนิยามว่า สารอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารประกอบคาร์บอนที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตหรือการสังเคราะห์โดยมีจุดเดือดไม่เกิน 250 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (Curran & StrliČ, 2015) หรือมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 50-260 องศาเซลเซียส แต่ไม่รวมถึงสารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides) (Berardi et al., 2013) คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ กรดคาร์บอนิก คาร์ไบด์และอลูมิเนียมคาร์ไบด์ (Tisserand & Young, 2014)

องค์การอนามัยโลกนิยามว่าสารอินทรีย์ระเหยง่าย หมายถึง สารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ 101.3 กิโลปาสกาล (Montero-Montoya, López-Vargas, & Arellano-Aguilar, 2018) สามารถจำแนกสารอินทรีย์ออกเป็นกลุ่มตามความสามารถในการระเหยดังตารางที่ 2 (Environmental Protection Agency, 2017)

ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

กลุ่ม	ชื่อย่อ	จุดเดือด	จำนวนอะตอมคาร์บอนต่อโมเลกุล
Very Volatile Organic Compound	VVOC	<0 – (50-100)	น้อยกว่า 6 อะตอม
Volatile Organic Compound	VOC	(50-100) - (240-260)	6-16 อะตอม
Semi Volatile Organic Compound	SVOC	(240-260) – (380-400)	มากกว่า 16 อะตอม

จากนิยามข้างต้นจะพบว่า สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากกว่า 1,000 ชนิดและอยู่ในสถานะก๊าซภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้องปกติ อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกให้ความสำคัญจะเปลี่ยนแปลงไปตามองค์กรต่าง ๆ ดังเช่นในประเทศออสเตรเลียมีรายชื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายตามประกาศของรัฐบาล ซึ่งเน้นที่ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ รวมถึงผลกระทบต่อพืช ยกตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่ายดังตารางที่ 3 (National Pollutant Inventory, 2009)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยง่าย

Substance	CAS Number	Substance	CAS Number
Acetaldehyde	75-07-0	Ethyl acetate	141-78-6
Acetic acid (Ethanoic acid)	64-19-7	Ethyl butyl ketone	106-35-4
Acetone	67-64-1	Ethylbenzene	100-41-4
Acetonitrile	75-05-8	Ethylene oxide	72-21-8
Acrolein	107-02-8	Formaldehyde	50-00-0
Acrylonitrile	107-13-1	Glutaraldehyde	111-30-8
Benzene	71-43-2	n- Hexane	110-54-3
1,3 – Butadiene	106-99-0	Methanol	67-56-1
1,2- Dichloroethane	107-06-2	Styrene	100-42-5
Dichloromethane	75-09-2	Tetrachloroethylene	127-18-4
Ethanol	64-17-5	Toluene	108-88-3
2- Ethoxyethanol	110-80-5	Vinyl Chloride	75-01-4
2- Ethoxyethanol acetate	111-15-9	Xylenes	1330-20-7

สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญทั้งในอาคารและนอกอาคาร แต่ความสำคัญและบริบทของสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะแตกต่างกัน เมื่อกล่าวถึงสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารจะมุ่งประเด็นไปที่ผลกระทบต่อสุขภาพ ส่วนสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายนอกอาคารจะเน้นถึงความสามารถของสารในการเกิดหมอกควันแบบโฟโตเคมี (Photochemical smog) ซึ่งทำให้มีโอโซนเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ที่มนุษย์อยู่อาศัยและทำให้เกิดภาวะโลกร้อนตามมา (Zheng et al., 2013) สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานได้ทั้งระยะสั้นระยะยาวและเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็ง (Thurston, 2017)

แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาเปื้อนของสิ่งมีชีวิต (Verheggen et al., 2017) ปุ๋ยหมักชีวภาพ (Y. Zhang et al., 2019) กระบวนการผลิตและการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง ไม้ ถ่านหิน สี กาว ตัวทำละลาย เครื่องสำอาง (Lamplugh et al., 2019) ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน ระบายจากวัสดุที่สร้างอาคาร สี สารขัดเงา วัสดุ

อุดรชัย ภู กาว พรหม พื้นไวนิล วัสดุทดแทนไม้ เครื่องหนัง เบาะ โฟม การสูบบุหรี่ ชักแห้ง การประกอบอาหาร ควันจากยานพาหนะ (Méausoone et al., 2019) อุตสาหกรรมที่พบสารอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น โรงกลั่นปิโตรเคมี โรงงานยางสังเคราะห์ โรงงานผลิตสี โรงงานกระดาษ โรงงานผลิตยวภัณฑ์ โรงงานพลาสติก โรงงานผลิตคอมพิวเตอร์ โรงกำจัดขยะและการเผาไหม้ของเครื่องจักร เป็นต้น จะเห็นได้ว่าไม่มีที่ใดไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Tuomi & Vainiotalo, 2014) โดยเฉพาะอย่างยิ่งควันจากยานพาหนะที่มีการจราจรติดขัด และโรงกลั่นปิโตรเคมีเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายปริมาณมากและต่อเนื่อง (Montero-Montoya et al., 2018) ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดแตกต่างกันไป (Rich, Samet, & Utell, 2015; Sanchez, Karnae, & John, 2008) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	แหล่งกำเนิด
แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) เช่น เบนซีน โทลูอิน	โรงกลั่นปิโตรเลียม (Cui, 2016) ตัวทำละลาย น้ำมันเชื้อเพลิง ทินเนอร์ อุตสาหกรรมสี (Zhou et al., 2019)
แอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon)	น้ำยาทำความสะอาด ตัวทำละลาย อุตสาหกรรมสี น้ำมันเชื้อเพลิง
เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride)	น้ำยาลบหมึก ตัวทำละลาย
ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม้อัด หมึกพิมพ์ โฟม วัสดุปิดฝาผนัง พรหม เฟอร์นิเจอร์ ควันบุหรี น้ำยาคองศพ
แอซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde)	น้ำยาปรับผ้านุ่ม กาว สารกำจัดกลิ่น
อะโครลีน (Acrolein)	ส่วนประกอบของไม้ ไอเสียจากการเผาไหม้ไม้ ผลิตภัณฑ์เส้นใย
เอมีน (Amines)	สารระเหยจากหม้อต้มไอน้ำ
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	สารตัวผสมน้ำยาลบคำผิด ตัวผสมน้ำมัน เชื้อเพลิง

ผลกระทบต่อสุขภาพของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระบบเลือดและกระตุ้นการอักเสบ (Cheng et al., 2019) เมื่อสัมผัสแล้วมักแสดงอาการที่ไม่จำเพาะเจาะจง (Norback, Michel, & Widstrom, 1990) เช่น ระคายเคืองดวงตา จมูกและคอ ปวดศีรษะ คันผิวหนัง หายใจไม่สะดวก คลื่นไส้ อาเจียน เลือดกำเดาไหล เหนื่อยเพลีย วิงเวียนศีรษะ (Homwutthiwong, 2017) ในระยะยาวทำให้สมรรถภาพปอดลดลง (Hesam et al., 2019; Saeedabadi & Nikpey, 2018) เพิ่มโอกาสเกิดโรคหลอดเลือดสมองชนิดสมองขาดเลือด (Ischemic Stroke) (H. W. Zhang et al., 2019) และสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดก่อให้เกิดมะเร็ง เช่น บิวทาไดอินที่ใช้ในโรงงานยางสังเคราะห์ทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Elizabeth Delzell et al., 1996; Sathiakumar, Tipre, Leader, Brill, & Delzell, 2019) มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ (Sathiakumar et al., 2019) และมะเร็งปอด (Sathiakumar, Brill, & Delzell, 2009) ฟอร์มาลดีไฮด์ทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว (Homwutthiwong, 2017) มะเร็งโพรงจมูก (Nasopharyngeal cancer) (Svenberg et al., 2013) สไตรีนเพิ่มโอกาสเสียชีวิตจากมะเร็งปอด (Bertke, Yiin, & Daniels, 2018) เป็นต้น

กลไกการเกิดพิษของสารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่ายดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางหายใจและผิวหนัง (Méausoone et al., 2019) เมื่อหายใจนำสารผ่านทางเดินหายใจส่วนบนซึ่งมีปลายเส้นประสาทสมองคู่ที่ 1 และ 5 มาเลี้ยงเชื่อมุทางเดินหายใจ เชื่อมุโพรงจมูก อันประกอบด้วยไอออนแชนแนล transient receptor potential (TRP) หากไอออนแชนแนลนี้ถูกกระตุ้นจะทำให้รู้สึกระคายเคืองทางเดินหายใจ ผ่านการกระตุ้นtrigeminal chemoreception เกิดความรู้สึกเจ็บ (Pain) ระคายเคืองจมูก (Nasal pungency) ระคายเคืองตา (Eye irritation) ลดอัตราการหายใจ (Cometto-Muñiz, Cain, & Abraham, 1998; Martinez & Eling, 2019) TRPA1 (Transient receptor potential ankyrin-repeat 1) เป็นกุญแจสำคัญในการควบคุมการหลังสารสื่อประสาทและควบคุมการอักเสบของเส้นประสาทซึ่งนำไปสู่การสร้างเสมหะ อาการคัดจมูก การจามและการไอ (Martinez & Eling, 2019)

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยศึกษาผลกระทบต่อเซลล์เยื่อทางเดินหายใจขนาดเล็ก (Small airway epithelial cells: SAEC) หลังจากสัมผัสพอลิเมอร์อะคริโลไนไตรท์บิวทาไดอินสไตรีนนาน 24 ชั่วโมง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (oxidative stress) เซลล์ตาย (Apoptosis) หลังสารก่อการอักเสบ (Pro-inflammatory cytokines and chemokines) ที่เซลล์เยื่อทางเดินหายใจ (Farcas et al., 2019)

จากงานวิจัยเพื่อดูการตอบสนองของเซลล์เยื่อปอดในห้องทดลองต่อสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นตัวแทนพบว่าเมื่อเซลล์สัมผัสสารระเหยอินทรีย์จะมีการแสดงออกของยีนที่เปลี่ยนแปลงไป ครอบคลุมการทำงานของเซลล์โดยเฉพาะการสร้างไขมันซึ่ง

เป็นส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิวในปอด (Surfactant) และการ programmed cell death, differentiation และ proliferation ถูกรบกวน (Gostner et al., 2016)

ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยง่าย

ในประเทศไทยไม่มีกฎหมายกำหนดค่ามาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Total volatile organic compound) สำหรับพื้นที่ในอาคาร แต่มีค่ามาตรฐานสำหรับสารเคมีเป็นรายชนิดตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง ชีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตราย ประกาศ ณ วันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ.2560 ได้กำหนดระดับความเข้มข้นของสารเคมีแต่ละชนิดไว้ เช่น กำหนดระดับความเข้มข้นของสารเบนซีนในอากาศเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติไม่เกิน 1 ส่วนในล้านส่วน และขีดความเข้มข้นของสารนี้สำหรับการสัมผัสในระยะเวลาสั้นๆ ไม่ให้เกิน 5 ส่วนในล้านส่วน ยกตัวอย่างดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ชีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตรายเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทำงานปกติ
แอสिटลดีไฮด์	200 ppm
กรดแอสिटิก	10 ppm
แอสिटอน	1000 ppm
แอสिटไนไทรล์	40 ppm
อะโครลีน	0.1 ppm
อะคริโลไนไทรล์	2 ppm
เบนซีน	1 ppm
1,3-บิวทาไดอิน	1 ppm
นอร์มอล-บิวทานอล	100 ppm

นอกจากนี้ประเทศไทยมีกฎหมายควบคุมระดับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อมตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 30 (พ.ศ.2550) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 124 ตอนพิเศษ 143ง วันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2550 รายละเอียดดังตารางที่ 6 และเพื่อป้องกันสุขภาพอนามัยของประชาชนจึงได้มีประกาศกรมควบคุมมลพิษ เรื่อง กำหนดค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ค่าเฝ้าระวังสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศในเวลา 1 ปี

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่าเฝ้าระวังไม่เกิน (ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
เบนซีน	1.7
ไวนิลคลอไรด์	10
1,2 - ไดคลอโรอีเทน	0.4
ไตรคลอโรเอทิลีน	23
ไดคลอโรมีเทน	22
1,2 - ไดคลอโรโพรเพน	4
เตตระคลอโรเอทิลีน	200
คลอโรฟอร์ม	0.43
1,3 - บิวทาไดอิน	0.33

ตารางที่ 7 มาตรฐานค่าเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศทั่วไปในเวลา 24 ชั่วโมง

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่าเฝ้าระวังไม่เกิน (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
แอซีทัลดีไฮด์	860
อะคริโลไนไตรล์	10
เบนซีน	7.6
เบนซิลคลอไรด์	12


ตารางที่ 7 (ต่อ)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ค่าเฝ้าระวังไม่เกิน (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1,3-บิวทาไดอิน	5.3
โบรโมมีเทน	190
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	150
คลอโรฟอร์ม	57
1,2-ไดโบรโมอีเทน	370
1,4-ไดคลอโรเบนซีน	1100
1,2-ไดคลอโรอีเทน	48
ไดคลอโรมีเทน	210
1,2-ไดคลอโรโพรเพน	82
1,4-ไดออกเซน	860
อะโครลีน	0.55
เตตระคลอโรเอทิลีน	400
1,1,2,2-เตตระคลอโรเอทิลีน	83

เบนซีน

เบนซีน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 78.1 เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยง่าย ไวไฟ สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อย ละลายได้ในเอซีโตน คลอโรฟอร์ม ไดเอทิลอีเทอร์และเอทานอล ละลายได้ดีในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ สามารถสรุปคุณสมบัติของเบนซีนได้ดังตารางที่ 8 (International Agency for Research on Cancer, 2018)

ตารางที่ 8 คุณสมบัติเบนซีน

คุณสมบัติ	รายละเอียด (International Agency for Research on Cancer, 2018)
ชื่อเคมี	Benzene
ชื่ออื่น	Benzol Benzole Cyclohexatriene
สูตรทางเคมี	C_6H_6
ชื่อวงศ์	แอโรแมติก
โครงสร้าง	
น้ำหนักโมเลกุล	78.1 กรัมต่อโมล
สถานะ	ของเหลว
สี	ใสไม่มีสี
ความหนาแน่น (กรัม/ มิลลิลิตร)	0.8786
ค่ามาตรฐานในการสัมผัสตลอด 8 ชั่วโมง	NIOSH REL
การทำงาน	: TWA 0.1 ส่วนในล้านส่วน OSHA PEL TWA 1 ส่วนในล้านส่วน
1 ส่วนในล้านส่วน	0.313 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เบนซีนพบได้ในน้ำมันดิบและได้จากอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ในอดีตใช้เป็นส่วนประกอบในหมึกที่ใช้ในโรงพิมพ์ ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับสารอินทรีย์ใช้ในการผลิตสารเคมีหลายชนิด เช่น ยา ยาง สารหล่อลื่น สี ยากำจัดศัตรูพืช มนุษย์สามารถรับสัมผัสเบนซีนได้ทางการหายใจ การรับประทานและทางผิวหนัง (International Agency for Research on Cancer, 2018; Loomis et al., 2017)

ระดับของเบนซีนในบรรยากาศ

เบนซีนพบได้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น โรงงานยางสังเคราะห์ (E. Delzell et al., 2006) ย้อมหนัง ถ่านหิน ลิกไนต์ ผลิตภัณฑ์ ยาง พลาสติก หมึกพิมพ์ ยา ยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ พลาสติก ขาฆ่าแมลงและงานบริการ (Park et al., 2015; Smith, 2010) ระดับของเบนซีนในโรงงาน สารเคมีและผลิตภัณฑ์เคมีอยู่ในช่วง 0.21-2.59 ส่วนในล้านส่วน อุตสาหกรรมขนส่งทางทะเล มีเบนซีนในบรรยากาศ 0.2-10 ส่วนในล้านส่วน (Smith, 2010) เบนซีนในบรรยากาศที่สูงทำให้ คนงานได้รับสัมผัสเบนซีนสูงไปด้วย พบว่าโรงงานผลิตยางในอิหร่าน ได้ตรวจระดับเบนซีนที่ คนงานได้รับสัมผัสสูงสุดที่ 5.06 ส่วนในล้านส่วน (Seyed Younes et al., 2015)

เบนซีนยังพบว่าเป็นปัญหาในสิ่งแวดล้อมโดยบริเวณใกล้เคียงนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อากาศมีความเข้มข้นของเบนซีนในบรรยากาศ 7.03 ± 0.31 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kampeerawipakorn et al., 2017) นอกจากนี้เบนซีนยังพบได้ในบ้านพักอาศัยได้ในช่วง 5-120 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Shrubsole, Dimitroulopoulou, Foxall, Gadeberg, & Doutsis, 2019) สะท้อนให้เห็นว่ามนุษย์มีความเสี่ยงสัมผัสเบนซีนได้ทุกสถานที่และเสี่ยงได้รับผลกระทบต่อ สุขภาพ

ผลกระทบเฉียบพลันของเบนซีน

- ระคายเคืองผิวหนัง ดวงตาและทางเดินหายใจเล็กน้อย (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2014)
- กดรระบบประสาททำให้คลื่นไส้ วิงเวียน ตามัว เดินเซ มึนงง สับสน หมดสติ (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2014)
- ทำให้หัวใจเกิดการเต้นผิดจังหวะได้ง่ายขึ้น (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2014)
- จากรายงานชันสูตรผู้เสียชีวิตหลังจากสัมผัสเบนซีนปริมาณสูงพบว่าการบาดเจ็บที่ ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจและสมอง (Avis & Hutton, 1993) พบลิ้มเลือดแข็งตัวในหัวใจและ เส้นเลือดขนาดใหญ่ อวัยวะภายในบวมและปอดบวมน้ำ ตรวจพบสารเบนซีนได้ในเลือด ปอด ตับ สมอง หัวใจและไต เป็นการยืนยันว่าเบนซีนสามารถกระจายไปได้ทั่วร่างกาย (Barbera, Bulla, & Romano, 1998)

ผลกระทบเรื้อรังของเบนซีน

- สำนักงานวิจัยมะเร็งระหว่างประเทศ (International Agency for Research on Cancer หรือ IARC) จัดกลุ่มเป็นสารก่อมะเร็ง (Tomatis, Xu, He, & Zhang, 2016)

- มีผลต่อระบบเลือด ได้แก่ กดการทำงานของไขกระดูก (Santiago et al., 2017) โรคโลหิตจางจากไขกระดูกฝ่อ (Aplastic anemia) มะเร็งเม็ดเลือดขาว (Leukemia) (Santiago et al., 2017) โรคไขกระดูกเสื่อม (Myelodysplastic syndrome: MDS) และมะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันแบบไมอีลอยด์ (Acute myeloid leukemia: AML) (Gross & Paustenbach, 2018)

- เปลี่ยนแปลงระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายซึ่งมีผลกับไต เกิดเป็นโรคไตผิดปกติในการขับกรด (renal tubular acidosis) ภาวะโพแทสเซียมในเลือดต่ำ (hypokalemia) ปัสสาวะมีเลือด (hematuria) และโปรตีนรั่วทางไต (proteinuria) (Pérez-Herrera et al., 2019)

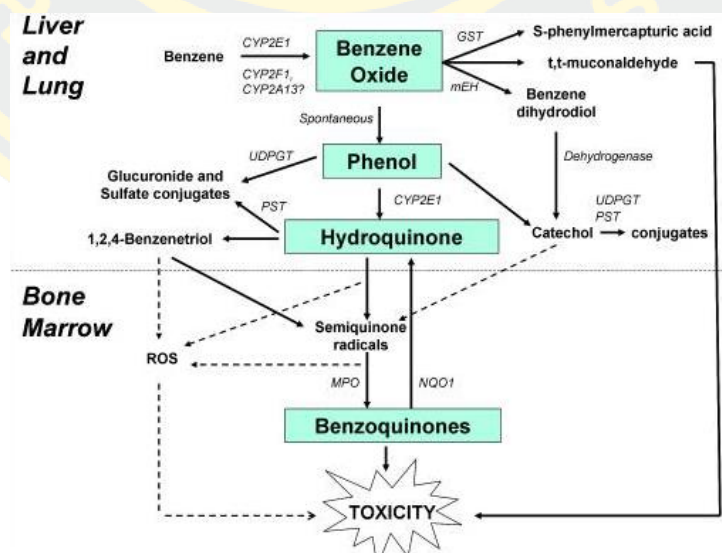
- ทำลายสารพันธุกรรมโดยรบกวนกลไกการซ่อมแซมดีเอ็นเอ (Impairment of DNA repair mechanisms) (Santiago et al., 2017)

- แพ้บูตร (Santiago et al., 2017)

- การรับสัมผัสเบนซีนในเด็กสัมพันธ์กับความผิดปกติของเม็ดเลือด การทำงานของตับ ระบบทางเดินหายใจและสมรรถภาพปอด (D'Andrea & Reddy, 2018)

กลไกการเกิดพิษของเบนซีน

เมื่อเบนซีนเข้าสู่ร่างกายจะถูกเอนไซม์หลายชนิด เช่น CYP2E1 และ CYP2F1 เปลี่ยนเบนซีนไปเป็นฟินอล ไฮโดรควิโนนและเบนโซควิโนน ตามลำดับ เบนซีนถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ตั้งแต่ที่ปอดและถูกเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ตับ จากนั้นทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Reactive oxygen species) ที่ไขกระดูก (McHale, Zhang, & Smith, 2012) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กลไกการเกิดพิษของเบนซีน

(McHale et al., 2012)

กรณีศึกษาผู้ปฏิบัติงานเจ็บป่วยจากการสัมผัสเบนซีน

ผู้ปฏิบัติงานในสถานีเติมน้ำมันจำนวน 62 ราย จากสถานีเติมน้ำมันจำนวน 98 แห่ง พบว่าได้รับสัมผัสเบนซีนจากการทำงาน 3.69 ± 1.88 ส่วนในล้านส่วน ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสารพันธุกรรม ได้แก่ DNA fragmentation และ Micronuclei แตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Salem, El-Garawani, Allam, El-Aal, & Hegazy, 2018)

ค่ามาตรฐานของเบนซีน

สำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยประเทศสหรัฐอเมริกา (Occupational Safety and Health Administration: OSHA) และประเทศไทยได้กำหนดระดับความเข้มข้นของเบนซีนในบรรยากาศตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง ขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตราย ประกาศ ณ วันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2560 ดังตารางที่ 9 จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมมีระดับเบนซีนสูงถึง 5 ส่วนในล้านส่วน (Seyed Younes et al., 2015) ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่อนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานทำงานได้เพียงช่วงสั้นๆ เท่านั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งลดระดับความเข้มข้นเบนซีนที่ 5 ส่วนในล้านส่วน

ตารางที่ 9 ระดับความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศพื้นที่ทำงาน

	ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน	OSHA
ระดับเบนซีนเฉลี่ยที่ 8 ชั่วโมง	1 ppm	1 ppm
ระดับเบนซีนสำหรับการสัมผัสในระยะเวลาไม่เกิน 15 นาที	5 ppm	5 ppm

การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

เทคนิคการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายภายในอาคารในปัจจุบันมีหลายแนวทาง ได้แก่ ด้านกายภาพ ด้านเคมีและด้านชีวภาพ (Bouchaala, 2012; Dai et al., 2018; Tang, 2016)

เทคโนโลยีกายภาพ

การดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) (Patil et al., 2019)

ดูดซับด้วยซีโอไลต์ (Zeolite based adsorption) (Y. Huang et al., 2016)

ถ่านชีวภาพหรือไบโอชาร์ (Biochar) (Shah & Li, 2019)

เทคโนโลยีชีวภาพ การใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation) (Torpy et al., 2018)

โดยในยุคแรกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้เริ่มต้นด้วยการดูดซับ จากนั้นจึงพัฒนาเป็นการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากกำจัดได้ดี ปลอดภัยและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ (Shah & Li, 2019) จากนั้นการบำบัดออกซิเดชันขั้นสูงได้รับความนิยมเนื่องจากประสิทธิภาพสูง มีตัวออกซิไดซ์รุนแรงพอที่จะทำลายมลพิษอย่างทั่วถึงและประหยัดพลังงาน (Utami, Rahman, & Sustini, 2019)

เทคโนโลยีเคมี

การใช้แสง (Photolysis) (Dai et al., 2018)

กระบวนการออกซิเดชัน เช่น การใช้โอโซน (Ozonation) (da Costa Filho et al., 2019)

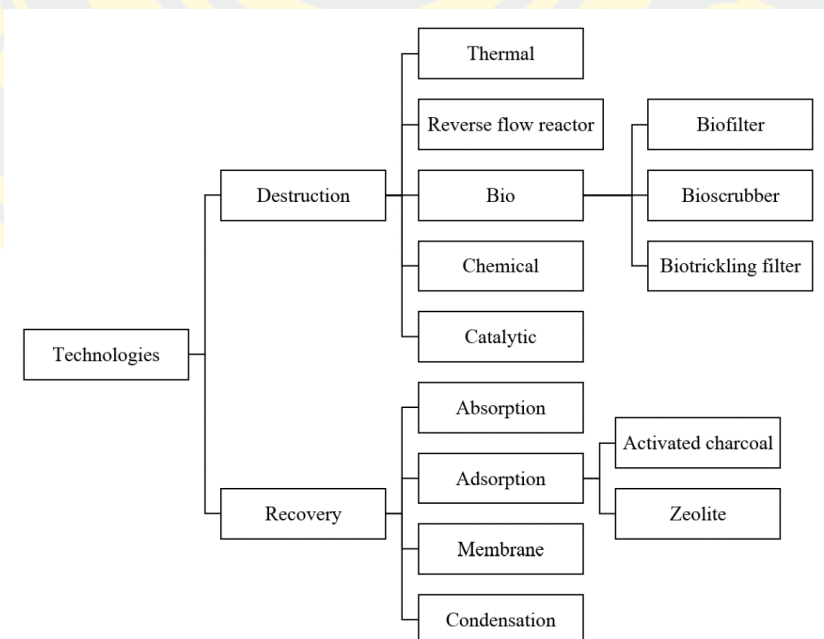
การบำบัดออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) เช่น

การใช้ความร้อนให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Shah & Li, 2019)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (He et al., 2019)

เฟนตัน (Fenton based) (Utami et al., 2019)

การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังภาพที่ 3 นอกจากนี้การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายยังมีอีกหลายวิธี ซึ่งข้อดีและข้อเสียได้แสดงดังตารางที่ 10



ภาพที่ 3 เทคโนโลยีในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

(Doble & Kumar, 2005)

ตารางที่ 10 วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย

วิธีการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย	หลักการ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ข้อดีและข้อเสีย
ดูดซับด้วยซีโอไลต์ (Zeolite based adsorption) (Y. Huang et al., 2016)	สารอินทรีย์ถูกดูดซับเข้าในซีโอไลต์	ซีโอไลต์ที่หมดสภาพ	สามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายแม้จะมีความเข้มข้นสัมพัทธ์สูง เกิดการคายซับได้ (Remission)
ดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon based adsorption) (Y. Huang et al., 2016; Patil et al., 2019)	สารอินทรีย์ถูกดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และทางเคมี (Chemical adsorption)	ถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพ	ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปคายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถ่านกัมมันต์ดีไฟไฟได้ หากนำไปใช้ดูดซับสารที่จุดเดือดสูงทำให้คายซับยากจึงนำกลับมาใช้ใหม่ได้น้อย ต้องควบคุมความชื้นให้เหมาะสมจึงจะทำงานได้ดี
การกรองด้วยเยื่อ (Membrane separation) (Y. Huang et al., 2016)	ฝุ่นละอองไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกรองได้	เยื่อที่เสื่อมสภาพ	ง่าย ไม่สลับซับซ้อน ใช้พลังงานน้อย เชื้อขาดความเสถียร กรองได้ไม่หมด
การกรองแบบชีวภาพ (Bio-filtration) (Y. Huang et al., 2016)	อากาศที่เป็นเชื้อสารอินทรีย์ระเหยง่ายไหลผ่านตัวกลางที่มีจุลินทรีย์ซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้	มวลชีวภาพ (Biomass)	ใช้พลังงานเพียงเล็กน้อยในการบำบัด อุปกรณ์ขนาดใหญ่ ใช้เวลาในการบำบัดนาน อุปกรณ์ดูแลง่าย

ตารางที่ 10 (ต่อ)

วิธีการบำบัดสารอินทรีย์	หลักการ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ข้อดีและข้อเสีย
การใช้พืชในการบำบัด (Phytoremediation) (Y. Huang et al., 2016; Torpy et al., 2018)	อากาศที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ระเหยง่ายไหลผ่านพืช	คาร์บอนไดออกไซด์ สารอินทรีย์และกรดอะมิโน	ราคาถูก ไม่มีมลพิษใหม่เกิดขึ้น เพิ่มความสวยงาม ไม่เหมาะสมกับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ความเข้มข้นสูง
ระบบการเผาไหม้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic combustion) (Bouchaala, 2012; Y. Huang et al., 2016; Shah & Li, 2019)	เผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย ร่วมกับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ อุณหภูมิมีต่ำ	คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ	บำบัดมลพิษได้หลากหลาย ประสิทธิภาพสูง ไม่เกิดมลพิษใหม่ ไม่เหมาะสมกับก๊าซที่มีฝุ่นหรือละออง
การดูดซับ (Absorption) (Y. Huang et al., 2016)	สารอินทรีย์ระเหยง่ายสัมผัสกับตัวดูดซับซึ่งเป็นของเหลว	น้ำเสีย	น้ำเสียที่ได้สามารถบำบัด นำกลับมาใช้ใหม่ จนคุ้มทุน ในการบำบัด ใช้ตัวดูดซับปริมาณมาก ปฏิริยาซับซ้อนและราคาสูง
โฟโตไลซิส (Photolysis) (Liu, Tseng, Wang, Dai, & Shih, 2019)	สารอินทรีย์ระเหยง่ายจะดูดซับ โฟตอนที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100-1,000 นาโนเมตร ทำให้สลายพันธะ	ระยะทางจากหลอดยูวีมีผลต่อ ความเข้มแสง	ง่าย ไม่สลับซับซ้อน บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย ได้อย่างรวดเร็ว 5.7-13.6

ตารางที่ 10 (ต่อ)

วิธีการบำบัดสารอินทรีย์	หลักการ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้	ข้อดีและข้อเสีย
การบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation) (da Costa Filho et al., 2019)	โอโซนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันสารอินทรีย์ ระเหยง่าย	คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ	เหมาะกับการกำจัดมลพิษสูง
กระบวนการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชัน (Photo catalytic Oxidation) (He et al., 2019; Tang, 2016)	อาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันให้สารอินทรีย์ ระเหยง่ายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดย ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ	บำบัดสารอินทรีย์ได้หลากหลายทำงาน ได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ประหยัดตัวเร่ง ปฏิกิริยาไม่เป็นพิษ อาจเปลี่ยนสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ ไม่เหมาะสมกับอากาศที่มีความชื้นสูง

กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) กระบวนการดูดซับเป็นการถ่ายเทมวลสารมาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง กระบวนการดูดซับยังเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน สารถูกดูดซับ (Adsorbate) และตัวดูดซับเกาะยึดติดกันได้ 2 ประเภท (D. C. Wang, Li, Li, Xia, & Zhang, 2010) ดังนี้

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) เกิดได้ดีในอุณหภูมิต่ำ ใช้พลังงานในการดูดซับต่ำ สามารถคายซับได้ง่าย มวลสารมาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) (D. C. Wang et al., 2010)

2. การดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับและตัวดูดซับยึดติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ทำให้ยึดติดกันแข็งแรง แต่ใช้พลังงานในการดูดซับสูง มวลสารมาเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) ตามตำแหน่งที่มีหมู่ฟังก์ชัน (D. C. Wang et al., 2010)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ ในสภาวะสมดุล เมื่อเขียนกราฟของความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้เส้นกราฟที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งหาได้จากการทดลองเท่านั้น จากนิยามไอโซเทอร์มของการดูดซับจึงสามารถบอกขีดความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ได้ถูกคิดค้นพัฒนาตามสมมติฐานที่แตกต่างกัน เช่น Langmuir Isotherm , Freundlich Isotherm และ Brunauer Emmet and Teller Isotherm (BET Isotherm) เป็นต้น (Lafi, Montasser, & Hafiane, 2018; Nimibofa, Ebelegi, & Donbebe, 2017)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น ปริมาณรูพรุน การกระจายของรูพรุน หมู่ฟังก์ชันที่ผิวตัวดูดซับ ลักษณะของสารถูกดูดซับ เช่น ขนาดโมเลกุล ความเป็นกรดด่าง การมีขี้และความสามารถในการละลาย เป็นต้น (Abbas, 2020)

กระบวนการสลายด้วยแสง

กระบวนการสลายด้วยแสง (Photolysis หรือ photodissociation หรือ photodecomposition) เป็นกระบวนการทางเคมีที่สารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์แตกสลายจากโฟตอน (Photon) ซึ่งไม่ได้

จำกัดแค่แสงที่ตามองเห็นแต่รวมถึงโฟตอนทุกชนิดที่มีพลังงานมากพอที่จะสลายพันธะเคมี เช่น แสง รังสียูวี รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น กระบวนการสลายด้วยแสงมักถูกเข้าใจสับสนกับ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารเคมีขึ้นตามธรรมชาติโดยสิ่งมีชีวิต กระบวนการสลายด้วยแสงมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 1



อัตราการเกิดปฏิกิริยาเขียนได้ดังสมการที่ 2

$$-d[X]/dt = d[Y]/dt = d[Z]/dt = k[X] \quad [2]$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาสลายด้วยแสง

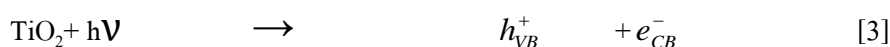
กระบวนการสลายด้วยแสงมีกลไกการเกิดตั้งแต่โมเลกุลสารดูดซับแสง ทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (electronically excited state) จากนั้น โมเลกุลของสารถูกเปลี่ยนไปหรือกลับสู่สภาวะปกติแต่ถ่ายทอดพลังงานต่อให้กับโมเลกุลอื่น (Speight, 2017)

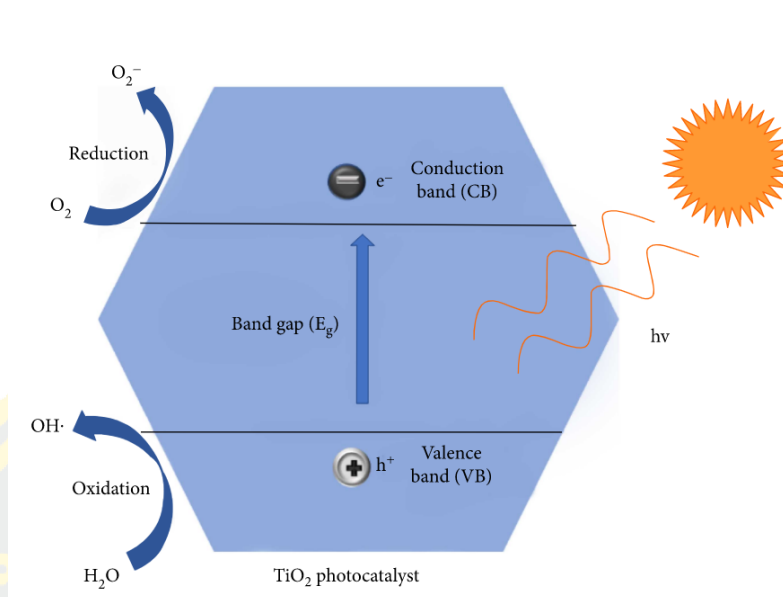
กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Photocatalytic oxidation) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานแสงเหมือนกระบวนการโฟโตไลซิส แต่มีตัวเร่งปฏิกิริยาดด้วยแสง (Photocatalyst) ที่ช่วยดูดซับพลังงานแสงแล้วเร่งให้เกิดการย่อยสลายของสารต่าง ๆ ได้รวดเร็วขึ้นได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กระบวนการนี้สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ เช่น สารอินทรีย์ระเหยง่าย และยังสามารถกำจัดเชื้อโรคได้อีกด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาดด้วยแสงที่ได้รับความนิยม มีหลายชนิด เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (Q. Chen et al., 2020) CuFeO_2 (Dai et al., 2018) Graphitic carbon nitrides ($\text{G-C}_3\text{N}_4$) (Jiadong Li et al., 2017) Indium Oxide (In_2O_3) (F. Zhang, Li, Zhao, Chen, & Zhang, 2020)

กลไกการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะดูดซับ (Adsorb) สารอินทรีย์ระเหยง่าย ขณะเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับแสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ของตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้อิเล็กตรอนของตัวเร่งปฏิกิริยาย้ายจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ไปสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conductive band) เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron and hole) ดังภาพที่ 4 และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 3 ดังนี้

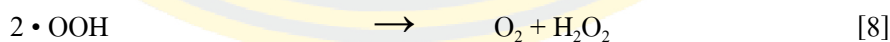
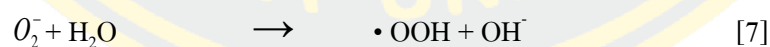




ภาพที่ 4 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

(Pawar et al., 2018)

โดยอิเล็กตรอนและโฮลสามารถกลับมาอยู่ในสถานะเดิมได้ (Electron and hole recombination) โฮลและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงและตัวรีดิวซ์ที่รุนแรงตามลำดับ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน สุดท้ายได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radicals: $\cdot\text{OH}$) ดังสมการที่ 4 ถึง 10



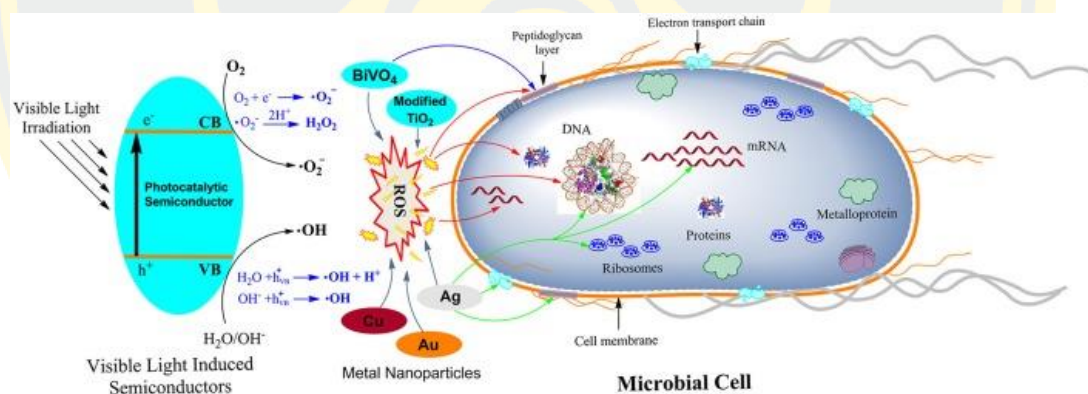
จากนั้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดูดซับไว้ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังสมการที่ 11



ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้เรียกว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Pahasup-anan, Suwannahong, Dechapanya, & Rangkupan, 2017)

ประโยชน์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

กำจัดเชื้อโรค (Anti-bacterial application) หลายงานวิจัยพบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ได้ (J. Huang et al., 2020; J. Li et al., 2017; Regmi, Kshetri, Kim, Pandey, & Lee, 2017) และยังสามารถกำจัดเชื้อรา โปรโตซัว ไวรัส และแบคทีเรียชนิดอื่นได้ (Regmi et al., 2018) เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันกระตุ้นให้เกิดตัวออกซิไดซ์ เช่น reactive oxygen species (ROS) ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) และออกซิเจนเรดิคัล ($\text{O}_2^{\cdot-}$) โดยเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาและจุลินทรีย์อยู่ใกล้กันจะสัมผัสกันด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic attraction) ความสามารถในการละลายในไขมัน (Hydrophobic interactions) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) และปฏิกิริยาระหว่างตัวรับและไลแกนด์ (Receptor-ligand interactions) จากนั้นมีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์โดยรบกวนหลายเมตาบอลิซึม ทำให้เซลล์เกิดภาวะถูกออกซิไดซ์เกินสมดุล (Oxidative stresses) เยื่อเลือกผ่านทำงานผิดปกติ (Membrane permeability imbalance) รูปร่างของเซลล์ผิดปกติ ขยับยั้งการทำงานของโปรตีนภายในเซลล์และทำลายสารพันธุกรรมของจุลินทรีย์ (Regmi et al., 2018) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย (Regmi et al., 2018)

กำจัดกลิ่น (Deodorizing application) สารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดสังกลิ่นรบกวนได้ เช่น ฟอรั่มัลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์และไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ตัวออกซิไดซ์ที่ได้จากกระบวนการจึงสามารถกำจัดบางกลิ่นได้ (Toloman et al., 2019)

การทำให้อากาศบริสุทธิ์ (Air purifying application) กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันใช้ในการลดและกำจัดมลพิษทางอากาศนอกเหนือจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น ก๊าซ

คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Caillol, 2011)

การทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning application) ควันจากท่อไอเสียรถยนต์มีส่วนประกอบของน้ำมันทำให้ผนังด้านนอกของอาคารสกปรก จึงมีการนำพัฒนาให้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับวัสดุก่อสร้าง เช่น ฟิล์มไททาเนียม มีคุณสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิต (Antistatic) ออกซิไดซ์รุนแรง (Super oxidative) และละลายในน้ำได้ดี (Hydrophilic) ทำให้ไอเสียรถยนต์ถูกออกซิไดซ์ฝุ่นที่สะสมบนผนังถูกล้างออกได้ง่ายด้วยน้ำฝน (Andaloro, Mazzucchelli, Lucchini, & Pedferri, 2016)

บำบัดน้ำเสีย กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสามารถบำบัดสารอินทรีย์

(Zou et al., 2020) สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Fernandes, Gągol, Makoś, Khan, & Boczkaj, 2019) และจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Yu, Zhou, Li, & Yan, 2020) จึงนิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Zou et al., 2020)

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมี 2 ชนิด ได้แก่

1. โลหะทรานซิชัน (Transition metal) เช่น ทองแดง นิกเกิลและโครเมียม เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น แถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 ระดับ ได้แก่ แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conductive band) โดยโลหะตัวนำจะมีแถบทั้งสองนี้ติดกัน แต่สารกึ่งตัวนำจะอยู่ห่างกัน ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานทั้งสองนี้เรียกว่า แถบช่องว่างพลังงานหรือแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานแสง ($h\nu$) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำไฟฟ้า ทำให้แถบวาเลนซ์เกิดโฮล (H^+) เคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบนำไฟฟ้าจะมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่อย่างอิสระทั่วแถบนำไฟฟ้า การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลของสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้นยากเนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) (Yan, Wang, Yao, & Yao, 2013) นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ได้รับความนิยม มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังนี้

- ไททาเนียมไดออกไซด์ ใช้ในโซลาร์เซลล์ การบำบัดมลพิษ และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยแสง (Photocatalysis) (Nam, Lim, Ko, & Lee, 2019) ใช้เป็นตัวตรวจวัดความชื้น วัดไอระเหยของสารอินทรีย์และก๊าซ (Nakata & Fujishima, 2012) ราคาถูก เสถียรทั้งทางกายภาพและทางเคมีไม่เป็นพิษ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Nam et al., 2019)

- สังกะสีออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalyst) ขั้วโฟโตอิเล็กโทโรด (Photoelectrodes) ยาต้านจุลชีพ (Antibacterial agents) เซนเซอร์ตรวจก๊าซ (Gas sensors) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) โซลาร์เซลล์ (Jing Wang, Chen, Xiang, & Komarneni, 2018) มีพื้นที่ผิวมาก ดูดซับได้ดี (Hashim, Alkaim, Mahdi, & Omran Alkhayatt, 2019) มีการเรียงตัวไม่สมบูรณ์ (Lattice imperfection) มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ (J. Huang et al., 2020) ยังดูดซับแสงได้ไม่มากเพียงพอ นำไฟฟ้าได้ไม่ดีและ poor charge transport (Jing Wang et al., 2018)

- แคลเมียมซัลไฟด์ ใช้ในการตรวจจับแสง (Photodetectors) ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง (Photocatalyst) ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diodes) เครื่องตรวจวัดก๊าซ (Gas detectors) และโซลาร์เซลล์ (Jindal & Sharma, 2020) ใช้เป็นเม็ดสีผสมในสี พลาสติก สิ่งทอ เซรามิกและแก้ว สามารถตรวจจับควันและรังสี มีผลกระทบต่อสุขภาพทำให้ระคายเคืองตา ผิวหนังและทางเดินหายใจ ทำให้หายใจไม่สะดวก เจ็บหน้าอก ปอดบวม น้ำ ทาลายไต โปรตีนรั่วทางไต (National Center for Biotechnology Information, 2019)

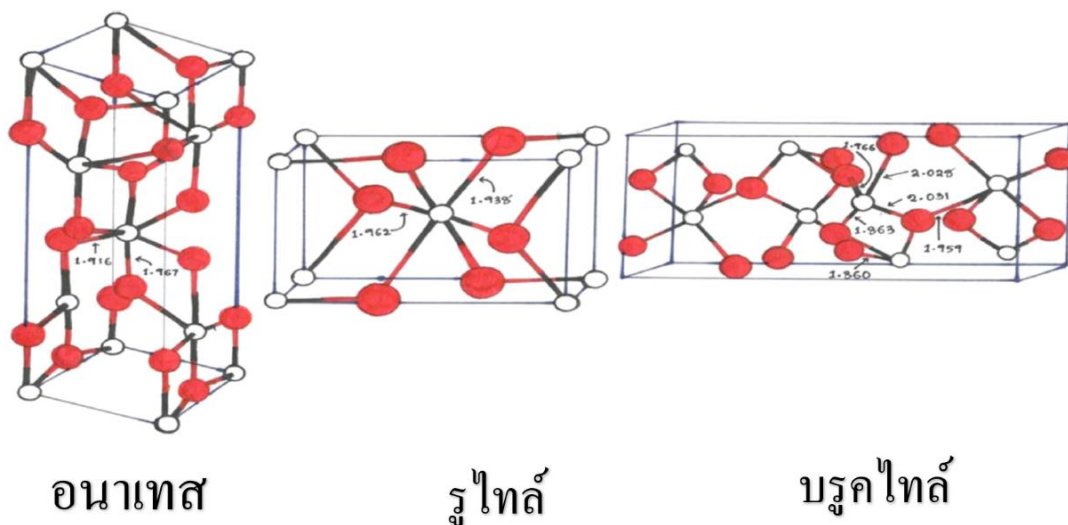
- ทองแดง มีราคาสูง ต้องอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น $[Cu^{II}(dmp)_2Cl]Cl$ เพื่อลดต้นทุน (Engl & Reiser, 2019)

- นิกเกิล ทนทานการกัดกร่อน ทนต่ออนุมูลอิสระ จึงนำมาผสมในอัลลอยด์ สแตนเลส ใช้ผลิตเหรียญ เครื่องประดับ แบตเตอรี่ วัสดุอุดฟัน ฟันปลอม สะพานฟัน ที่ครอบฟัน และตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตาม นิกเกิลเพียงเล็กน้อยสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาภูมิแพ้ชนิดที่ 4 (Type IV hypersensitivity reactions) และกระตุ้นการตอบสนองด้วยทีเซลล์ (Cell-mediated by T-lymphocytes) (National Center for Biotechnology Information, 2004)

ไททานเนียมไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีหลายงานวิจัยพบว่าไททานเนียมไดออกไซด์มีความเหมาะสมและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Lee, Yoon, Ahn, Park, & Jeon, 2019) เช่น บำบัดน้ำเสีย บำบัดมลพิษในอากาศ บำบัดสารกำจัดศัตรูพืช ช่วยกำจัดกลิ่นในอากาศ ใช้ในการผลิตกระจกข้างของรถยนต์ ฝ้าม่าน สี หมึกพิมพ์ ทำโซลาร์เซลล์ ยารักษาโรค อุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องสำอาง ครีมกันแดด และผสมในพลาสติกห่อหุ้มอาหาร เป็นต้น (Nakata & Fujishima, 2012) ด้วยคุณสมบัติของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ไม่เป็นพิษ ราคาถูก ค่อนข้างต่ำในการผลิต มีความเสถียรสูงทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ทนกรดต่างได้ดี ทำให้นำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และไททานเนียมไดออกไซด์สามารถป้องกันการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดี (Pahasup-anan et al., 2017) โดยไททานเนียมไดออกไซด์มีแถบช่องว่างพลังงานที่ 3.2 อิเล็กตรอน โวลต์

ไททานเนียมไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามรูปแบบผลึก ได้แก่ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไทล์ (Brookite) (Acharya & Parida, 2020) ดังภาพที่ 6 พบว่ารูปแบบอนาเทสได้รับความนิยมที่สุดสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน เนื่องจากเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด และมีความสม่ำเสมอในการดูดซับรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ทำให้สร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้ (Nakata & Fujishima, 2012)



ภาพที่ 6 รูปแบบผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์

(Acharya & Parida, 2020)

การตรึงไททานเนียมไดออกไซด์

ไททานเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบผงเมื่อนำมาใช้ในงานจึงต้องมีการตรึงบนวัสดุต่าง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ลอยไปกับอากาศ จึงสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับ ไททานเนียมไดออกไซด์ การยึดตรึงไททานเนียมไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพนั้นไททานเนียมไดออกไซด์จะต้องไม่หลุดง่าย มีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกับมลพิษ การตรึงมีหลายวิธี (K. Suwannahong et al., 2012) สรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การตรึงไททานเนียมไดออกไซด์

เทคนิคการตรึง (Immobilization Technique)	วัสดุที่ยึดตรึง (Substrate coated)
การจุ่มเคลือบ (Dip Coating)	แก้ว (Glass) ควอตซ์ (Quartz) หินภูเขาไฟ (Pumice stone) ใยแก้วนำแสง (Optical fibers)
กระบวนการโซลเจล (Sol gel) (Pant, Park, & Park, 2019)	แก้ว (Glass) อิฐแดง (Red brick)
การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition)	อลูมินา (Alumina) ซิลิกาเจล (Silica gel)
สเป็คเตอริง (Sputtering)	อิฐแดง (Red brick) ปูนซีเมนต์ขาว (White cement)
เป่าฟิล์ม (Blown film)	พลาสติก (Plastic)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การตรึงไททานเนียมไดออกไซด์แต่ละวิธีส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงตารางที่ 12 จึงควรเลือกวิธีตรึงที่เหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ วัสดุหลายชนิดถูกนำมาใช้ในการตรึง โดยมีการตรึงไททานเนียมไดออกไซด์บนพลาสติกได้รับความนิยมเนื่องจากแสงสามารถส่องผ่านพลาสติกได้ มีความทนทาน ราคาถูก และหาได้ง่าย พลาสติกส่วนใหญ่ผลิตจากปิโตรเคมี เช่น โพลีเอทิลีน (K. Suwannahong et al., 2012) โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) (Pavasupree, Dubas, & Rangkupan, 2015) โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) (Mishra & Mukhopadhyay, 2019) และไนลอน (Pahasup-anan et al., 2017) เป็นต้น

พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงมีงานวิจัยที่ผสมพลาสติกจากปิโตรเลียมและพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอเข้าด้วยกัน (Tu-morn et al., 2019) แต่ยังคงก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมถึงยังมีงานวิจัยที่ใช้พลาสติกชีวภาพอีกหลายชนิด (Kreetachat et al., 2013) งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาให้ผลิตพลาสติกชีวภาพทำจากพืชชนิดพีแอลเอเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และลดความซับซ้อนในการผลิต เนื่องจากพลาสติกพีแอลเอผลิตจากการหมักซากพืช เช่น ข้าวโพด ฟาง และมันสำปะหลัง จึงทำให้สามารถสลายตัวได้ตามธรรมชาติ (Gironi & Piemonte, 2011) จากการทบทวนวรรณกรรมการตรึงไททานเนียมไดออกไซด์บนตัวกลางชนิดต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ถูกยัดตรึงด้วยเทคนิคต่าง ๆ

เทคนิคการตรึง	คุณสมบัติทางกายภาพของไททานเนียมไดออกไซด์
การจุ่มเคลือบ (Jun Wang & Bai, 2015)	นำแก้วที่ผ่านการทำความสะอาดจุ่มลงในสารละลายของไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์ที่ผสมเอทานอลและยกขึ้นด้วยความเร็ว 1,000 $\mu\text{m/s}$ 1,500 $\mu\text{m/s}$ และ 2,000 $\mu\text{m/s}$ จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 300°C นาน 30 นาที และ 500°C นาน 60 นาที ตามลำดับ จากการตรวจด้วย UV-VIS พบว่ามีการดูดกลืนแสงตั้งแต่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร
กระบวนการ โซลเจล (Liang et al., 2018)	ใช้เอซีทิลแอซีโตนผสมกับเตตระโบรไมด์ไททานเนตผ่านกระบวนการ calcination ที่ 100-300°C ตรวจ SEM พบว่าไททานเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวไม่ดี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400-500°C มีการกระจายตัวดี ไททานเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นผลึกอนาเทส สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 400 นาโนเมตร มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.15 eV และสามารถบำบัดเมทิลลิ้นบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ
การตกผลึกด้วยไอเคมี (chemical vapor deposition) (De Filpo et al., 2018)	พ่นไททานเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ลงบนพลาสติกโพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene difluoride) ตรวจด้วย SEM พบว่าไททานเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ไม่ครอบคลุมทั่วผิวพลาสติก มีการอุดรูพรุนของพลาสติก มีการแตกร่อนหลังจากพ่นเสร็จและมีการเกาะกลุ่มกันอีกด้วย
สปัตเตอร์ริง (Sputtering) (Rachel, Subrahmanyam, & Boule, 2002)	ใช้พลาสติกที่ความดัน 0.2 พาสกาล อุณหภูมิไม่เกิน 70°C ในการเคลือบผิววัสดุ ได้แก่ อิฐแดง ปูนซีเมนต์ขาวและแก้ว ด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ จากนั้นผ่านกระบวนการ calcination ที่ 470°C นาน 5 ชั่วโมง ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นแบบผลึกอนาเทส ไททานเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีพื้นที่ผิวต่ำ รูพรุนน้อยทำให้ดูดซับได้ไม่ดี
เป่าฟิล์ม (Blown film) (Kreetachat et al., 2013)	พลาสติกพีแอลเอ พีบีเอทีและพีบีเอสผสมกับไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ calcination ที่ 500°C ผ่านกระบวนการเป่าฟิล์มหนา 40 μm พบว่าไททานเนียมไดออกไซด์เป็นผลึกอนาเทส มีแถบช่องว่างพลังงาน 3.23 eV ความร้อนจากการเป่าฟิล์มทำให้ไททานเนียมไดออกไซด์เกาะกลุ่มกันได้

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายของไททานเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงในรูปแบบต่างๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวกลาง	วิธีการตรึง	ความเข้มแสง	สารอินทรีย์ระเหยง่าย	ผลการศึกษา	อ้างอิง
ไททานเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก	โพลีเอทิลีน	เป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 150-180 ^o c	ไม่ระบุ	ไดคลอโรมีเทน	10%TiO ₂ /LDPE บำบัดได้ ร้อยละ 78	(K. Suwannahong et al., 2012)
ไททานเนียมไดออกไซด์ 0.1 กรัม	ยางธรรมชาติ เพิ่มชั้นร้อยละ 60 ปริมาณ 5 มิลลิเมตร	Strewn sheet	12 วัตต์	อินดีโกคาร์บอน	บำบัดได้ร้อยละ 90-95	(Sriwong, Wongnawa, & Patarapaiboolchai, 2012)
ไททานเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก	PLA/ PBAT/ PBS	โซลเจด	4.2 mw/cm ²	โทลูอีน	10%TiO ₂ /PLA/ PBAT/ PBS บำบัดโทลูอีน ได้สูงสุด ร้อยละ 52	(Kreetachai et al., 2013)
ไททานเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	PLA ผสม maleic anhydride copolymer	เป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 100-160 ^o c	4 mw/cm ²	ไดคลอโรมีเทน 100 ppm	10%TiO ₂ /PLA บำบัดไดคลอโรมีเทนได้สูงสุด ร้อยละ 63	(Tharasawatipat, 2015)

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวกลาง	วิธีการตรึง	ความเข้มแสง	สารอินทรีย์ ระเหยง่าย	ผลการศึกษา	อ้างอิง
ไททานเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 3, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก	โพลีเอทิลีน	เป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 150-180 °c	ยูวีซี 2.7 mw/cm ⁻²	แอซีโทน 435 ± 20 ppm	10%TiO ₂ / LDPE บำบัด แอซีโทน ได้สูงสุดร้อยละ 75 ที่ 140 นาที	(K. Suwannahong, Sanya Sirivithayapakorn, Pongsak Noophan, Wipada Sanongraj, 2014)
ไททานเนียมไดออกไซด์เคลือบบนพลาสติกพีวีซี	พีวีซี	โซลเจด	แสงแดดและ ยูวีซี 1.0-2.1 mw/cm ⁻²	โทลูอีน เบนซีน	บำบัดเบนซีนและ โทลูอีน ได้ร้อยละ 50 และ 68 ตามลำดับ	(Tejasvi, Sharma, & Upadhyay, 2015)
ไททานเนียมไดออกไซด์	พลาสติก	ทาโพลีเมอร์ด้วยเทคนิค doctor blade technique จิ้งฟันไททานเนียมไดออกไซด์	แสงแดด	เมทิลีนบลู	บำบัดไดรียล 49-99	(Utami et al., 2019)

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวกลาง	วิธีการเตรียม	ความเข้มแสง	สารอินทรีย์ ระเหยง่าย	ผลการศึกษา	อ้างอิง
ไททานเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก	PLA/PB	เป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 110-140° c	ยูวีซี 254 นาโนเมตร 4.2 mw/cm ⁻²	ไดคลอโรเบนซีน 100 ppm	10%TiO ₂ / PLA/PBAT/PBS มีประสิทธิภาพบำบัดสูงสุด	(Kowit, Rotruedee, Torpong, Mayurin, & Surachai, 2019)
	แก้ว	โชนเจล ร่วมกับ doctor blade technique	ยูวีซี 253.7 นาโนเมตร 27 mw/cm ⁻²	เบนซีน 100 ppm	ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนได้ร้อยละ 75 ซึ่งสูงกว่าการดูดซับและกระบวนการโฟโตไลซิส 4.5 และ 6.4 เท่า ตามลำดับ	(Muangmora, Kemacheevakul, & Chuangchote, 2019)
	PLA	เป่าฟิล์มที่อุณหภูมิ 100-160° c	ยูวีซี 1.96-5.24 mw/cm ⁻²	เบนซีน	10%TiO ₂ /PLA บำบัดเบนซีนได้ร้อยละ 59	(Tharasawatpipat & Kreetachat, 2019)

กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีกระบวนการเกิดตามลำดับ ดังนี้ (Assadi, Palau, Bouzaza, & Wolbert, 2013; Meng & He, 2015)

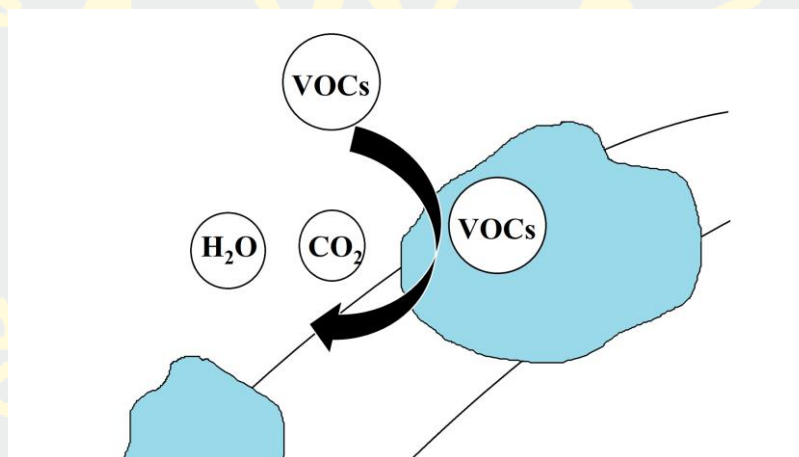
สารอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้คือไททานเนียมไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย

เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

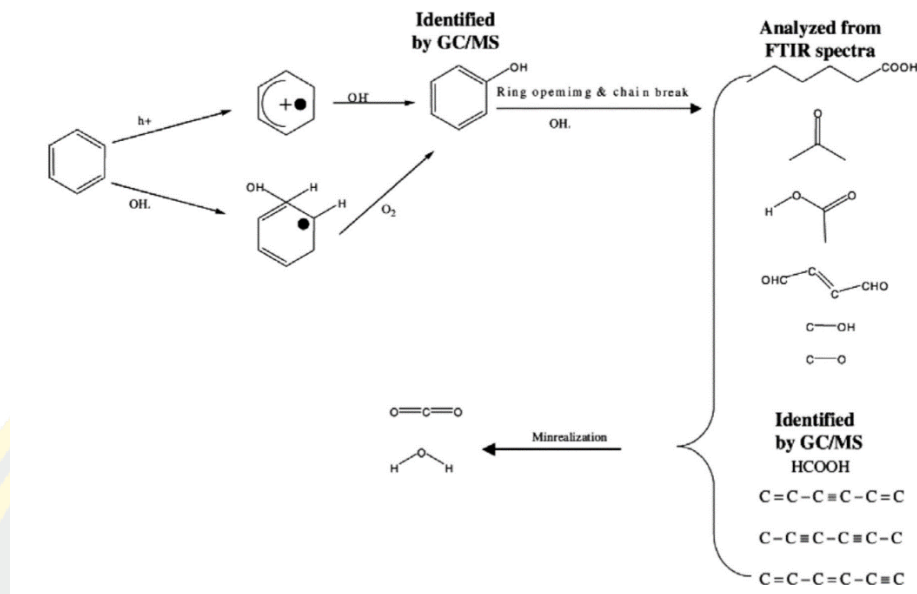
ผลิตภัณฑ์ถูกคายซับออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเคลื่อนที่เข้าสู่อากาศ หรือน้ำที่ทำการบำบัด ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กลไกการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Assadi et al., 2013)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสามารถบำบัดสารได้หลายชนิด สำหรับการบำบัดเบนซีนมีงานวิจัยพบว่าเบนซีนจะถูกเปลี่ยนเป็นฟีนอล (Phenol) มากที่สุดซึ่งเป็นสารมัธยันตร์ (Intermediate) จากนั้นจึงถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ งานวิจัยนี้ตรวจยืนยันด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatography Flame Ionization Detector: GC-FID) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) (Boyjoo, Sun, Liu, Pareek, & Wang, 2016) การบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กลไกการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

(Boyjoo et al., 2016)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันด้วยไททานเนียมไดออกไซด์

1. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงเกิดการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มมากขึ้นและรับแสงที่กระตุ้นได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากเกินไปอาจจับตัวเป็นก้อน ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง ประสิทธิภาพในการบำบัดจึงต่ำลงได้ (Fischer et al., 2017)

2. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ต้องการบำบัดที่เพิ่มขึ้นจะมีอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่มีความเข้มข้นมากเกินไป จะทำให้อัตราการบำบัดลดลง เนื่องจากอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายสัมพันธ์กับปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นบริเวณตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นช่วงแรกที่เพิ่มความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายจึงมีสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณสูงมากจะบดบังแสง และดูดซับแสงก่อนตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง อัตราการบำบัดจึงลดลง (Haghighatmamaghani, Haghighat, & Lee, 2019)

3. ความเข้มแสง มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกบำบัดได้ลดลงตามความเข้มแสงที่น้อยลง ซึ่งความเข้มแสงจะลดลงสัมพันธ์กับระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงที่เพิ่มขึ้น (Shayegan, Lee, & Haghighat, 2018)

4. โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส รูไทล์และบรูคไทล์ โครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole recombination) ในอัตราที่ต่ำกว่าผลึกรูไทล์ เนื่องจากผลึกอนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานมากกว่าผลึกรูไทล์ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยพบว่า หากใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ทั้งอนาเทสและรูไทล์ร่วมกันในสัดส่วน 3 ต่อ 7 มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาได้สูงกว่าใช้ผลึกเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง (Fischer et al., 2017)

5. อัตราการไหลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาได้หลากหลายแบบ ในกรณีที่สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีความเข้มข้นคงที่ การเพิ่มอัตราการไหลของสารอินทรีย์ระเหยง่ายผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้นโดยเฉพาะขั้นตอนการถ่ายเทมวลก๊าซ (Gas-phase mass transfer) ในช่วง diffusion-controlling phase แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการไหลสูงกว่า 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าหากอัตราการไหลสูงมากแล้วนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Surface reaction) เป็นหลัก แต่ไม่ขึ้นกับช่วงการถ่ายเทมวลก๊าซ (Gas-phase mass transfer) (Shayegan et al., 2018)

อัตราการไหลของก๊าซต่อจลนศาสตร์ในการบำบัด (Removal kinetics) ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยที่ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยง่ายคงที่ (Wang et al., 1999; Wittmann et al., 2005) กรณีแรกที่อัตราการไหลของก๊าซต่ำ พบว่าอัตราการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นถูกจำกัดโดยการถ่ายโอนมวลสาร (Gas-phase mass transfer) ไปยังพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา กรณีที่สองเมื่ออัตราการไหลของก๊าซเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่ง พบว่าอัตราการไหลไม่ส่งผลต่อจลนศาสตร์การบำบัด (Removal kinetics) ของสารอินทรีย์ระเหยง่าย สะท้อนให้เห็นว่าจลนศาสตร์ปฏิกิริยาของพื้นผิว (Surface reaction kinetics) เป็นปัจจัยที่จำกัดอัตราการไหล นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วง gas residence time ที่สั้นเกินไปที่ก๊าซเคลื่อนที่ไปสู่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (Gas phase to the catalyst surface) อัตราการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหล (Shayegan et al., 2018)

6. ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาค้ำยกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นก่อนบำบัด โดยน้ำและไฮดรอกซิลเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน หากมีความชื้นมากเกินไปจะเกิดหยดน้ำที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและเร่งให้อิเล็กตรอนและโฮลกลับมารวมตัวกัน (Electron-hole recombination) ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน อีกทั้งน้ำจะแย่งดูดซับที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแทนที่สารอินทรีย์ระเหยง่าย ความชื้นจึงมีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Shayegan et al., 2018) สามารถสรุปงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน ได้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 วรรณกรรมที่มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาและอ้างอิง	กระบวนการศึกษา	ผลการศึกษา
ไททานเนียมไดออกไซด์หนา 11 ไมครอน ครึ่งไททานเนียมบนวัสดุด้วยการเผาให้ติดกับ แผ่นฟิล์ม (Chang & Seo, 2014)	บำบัดเบนซีน 295 ppm ฟอร์มาลดีไฮด์ 480 ppm ความชื้นสัมพัทธ์ 40%–60% ศึกษาประสิทธิภาพเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแสง ติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 มิลลิเมตร ยาว 520 มิลลิเมตร ล้อมรอบหลอดไฟยูวีซีทีมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร กำลัง 20 วัตต์	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate k) ของเบนซีน และฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 9.35×10^{-2} นาที และ 3.46×10^{-2} นาที ตามลำดับ
ไททานเนียมไดออกไซด์และทังสเตนออกไซด์ครึ่ง บนอลูมิเนียม honeycomb monoliths ขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ลึก 2.5 เซนติเมตร (Hodgson, Destailats, Sullivan, & Fisk, 2007)	บำบัดสารอินทรีย์ 27 ชนิด หลอดยูวีซีทีกำลัง 18 วัตต์ ความเข้มข้นแสง 6-6.5 มิลลิวัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร อัตราการไหลของอากาศ 165-580 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ความชื้นสัมพัทธ์ 42%–65% อุณหภูมิ 19.5-25 °C	ตัวเร่งปฏิกิริยาดำยแสงสามารถบำบัดสารอินทรีย์ ระเหยง่ายได้โดยอัตราการไหลที่สูง และชนิดของ สารมีผลต่อการบำบัดจะทำให้ประสิทธิภาพลดลง เรียงตามลำดับสารอินทรีย์ที่บำบัดได้น้อยไปหา มาก ดังนี้แอลกอฮอล์ ไกลคอลเอเทอร์ แอลดีไฮด์ คีโตน แอโรแมติก อัลเคน ฮาโลเจนเตตเต็ดเอดิเฟ ติก ไฮโดรคาร์บอน

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ตัวเร่งปฏิกิริยาและอ้างอิง	กระบวนการศึกษา	ผลการศึกษา
โททานเนียมไดออกไซด์ที่แผ่นกรองอากาศ (Yu. et al., 2006)	บำบัดโทลูอินและฟอร์มัลดีไฮด์ ลดดัชนีชี้ความขุ่น 254 นาโนเมตร กำลัง 4 วัตต์ อัตราการไหลของอากาศ 177-532 เมตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 30, 50 และ 70	ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 30 50 และ 70 อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์และโทลูอินเท่ากับ 0.421-0.433 ต่อชั่วโมง และ 0.34-0.381 ต่อชั่วโมง เพื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 30 เป็น 70 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.85 และ 12.1 ตามลำดับ ความเร็วลมในช่วง 177-532 เมตรต่อชั่วโมง เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลง
โททานเนียมไดออกไซด์เคลือบบนไฟเบอร์กลาส (fiberglass fibers) และโททานเนียมไดออกไซด์เคลือบบนเส้นใยคาร์บอน (carbon cloth fibers) (Zhong, Haghghat, Lee, & Lakdawala, 2013)	บำบัดโทลูอิน ไซลีน เฮกเซน ออกเทน และเมทิลเอทิล คีโตน 250, 500 และ 1000 ppb บิวทานอล 800 ppb และ แอซีโตน 500 ppb หลอดยูวีซีและหลอด VUV (vacuum ultraviolet) ความเข้มแสงที่ 16-43 วัตต์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของอากาศ 41-255 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (face velocity 0.21-0.76 m/s) ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 10-60	ประสิทธิภาพการบำบัดสูงเมื่อความเข้มข้นสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำ อัตราการไหลของอากาศและความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ต่ำสามารถบำบัดได้ดีกว่า ความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นบำบัดได้มากขึ้น

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ตัวเร่งปฏิกิริยาและอ้างอิง	กระบวนการศึกษา	ผลการศึกษา
ไททานเนียมไดออกไซด์และเซอร์โคเนียม (Ren, Wang, Chen, & Chen, 2014)	กระบวนการศึกษา บำบัดเบนซีน 80, 160, 240, 320, 400 และ 480 มิลลิกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร หลอดยูวีซีความยาวคลื่น 254 nm กำลัง 8 วัตต์ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60-90 อุณหภูมิ 30, 90, 120, 150 °C	ผลการศึกษา ความเข้มข้นของเบนซีนที่เพิ่มขึ้นทำให้บำบัด เบนซีนได้ช้าลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้บำบัดเบน ซีนได้ลดลง ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้บำบัด เบนซีนได้เพิ่มขึ้น

จลนศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการทำปฏิกิริยาเคมีของสารต่าง ๆ ทั้งในด้านปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาปฏิกิริยาเคมี โดยสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี และช่วยการประเมินสถานะที่เหมาะสมของการออกแบบเครื่องฟอกอากาศ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ ความชื้น ความเข้มแสง และความเข้มข้นของออกซิเจน (Meng & He, 2015)

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ ประกอบด้วยกระบวนการดังนี้ (Zhong & Haghghat, 2015)

1. การพา (advection) อากาศพาสารอินทรีย์ระเหยง่ายมาสู่ตัวเร่งปฏิกิริยา
2. การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายไปสู่บนพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. การแพร่ (molecular diffusion) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ช่องว่างระหว่างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. การดูดซับ (Adsorption) ของสารอินทรีย์ระเหยง่ายบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา
5. ปฏิกิริยาเคมีการใช้แสง (Photochemical reaction) เกิดขึ้นบนพื้นที่ผิว
6. การคายซับ (Desorption) ของผลิตภัณฑ์จากพื้นที่ผิว
7. การถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) ของผลิตภัณฑ์จากพื้นที่ผิวไปสู่ภายนอกโมเลกุล

ชนิดของปฏิกิริยาเคมี

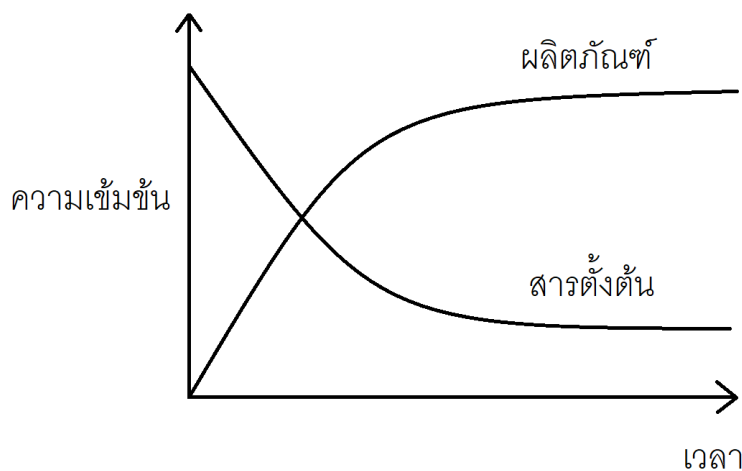
ปฏิกิริยาเคมีสามารถแบ่งตามวัฏภาค (phase) ของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์อยู่ในวัฏภาคเดียวกันทั้งหมด เรียกว่าปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reaction) เช่น ของเหลวทำปฏิกิริยากับของเหลวได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์อยู่วัฏภาคต่างกัน เรียกว่า ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reaction) เช่น ของแข็งทำปฏิกิริยากับของเหลวได้ก๊าซ (Viriyapanya, 2002)

อัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate law) (Viriyapanya, 2002)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นค่าที่บอกความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี



จากสมการที่ 12 สารตั้งต้น A และ B ทำปฏิกิริยากัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสาร C ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปพบว่าสารตั้งต้นทั้งสองมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ผลิตภัณฑ์ C เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าปริมาณของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มาเขียนกราฟเทียบกับเวลา จะมีลักษณะกราฟดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์กับเวลา

อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถหาได้จากความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังสมการที่ 13

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} &= \frac{\text{ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไป}}{\text{เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป}} \\ &= d[C] / dt \end{aligned} \quad [13]$$

หรือหาอัตราการเกิดปฏิกิริยายังสามารถหาได้จากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังสมการที่ 14

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} &= \frac{\text{ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไป}}{\text{เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป}} \\ &= -d[A] / dt = -d[B] / dt \end{aligned} \quad [14]$$

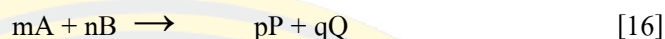
จากสมการที่ 13 และ 14 จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นความชันของกราฟในภาพที่ 9 โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรกจะสูงและลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งสามารถเขียนในรูปของคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} & \propto [A][B] \\ \text{หรือ} \quad \text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา} & = k[A][B] \\ \text{หรือ} \quad r & = k[A][B] \end{aligned} \quad [15]$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate constant) จะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสารตั้งต้นทุกชนิดมีความเข้มข้นเท่ากับหนึ่งหน่วย

กฎอัตรา (rate law) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี



จากสมการที่ 16 จะเขียนกฎอัตราได้ดังสมการที่ 17 (rate law)

$$r = k [A]^m [B]^n \quad [17]$$

เมื่อ m คือ อันดับของปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับสาร A เป็นหลัก

n คือ อันดับของปฏิกิริยาเมื่อเทียบกับสาร B เป็นหลัก

$m + n$ คือ อันดับรวมของปฏิกิริยา

โดยค่า m และ n นั้น ได้จากการทดลองเท่านั้น

หาก $m + n$ เท่ากับ 0 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero-order reaction)

$m + n$ เท่ากับ 1 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction)

$m + n$ เท่ากับ 2 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสอง (second-order reaction)

$m + n$ เท่ากับ 3 เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสาม (third-order reaction)

$m + n$ เท่ากับ $3/2$ เรียกว่า ปฏิกิริยาอันดับสามส่วนสอง (three-halves order reaction)

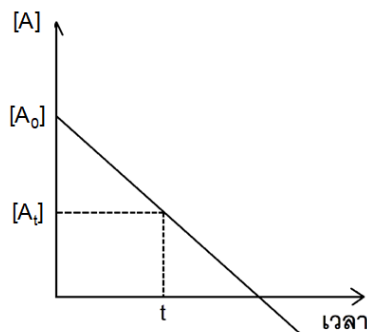
ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (Zero-order reaction) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ขึ้นกับสารตั้งต้น

การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นจึงไม่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลง

กฎอัตรา $-d[A]/dt = k [A] = k \quad [18]$

เมื่ออินทิเกรตจะได้ดังสมการที่ 19 $[A_t] = [A_0] - k_0t \quad [19]$

เขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้น A และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับศูนย์

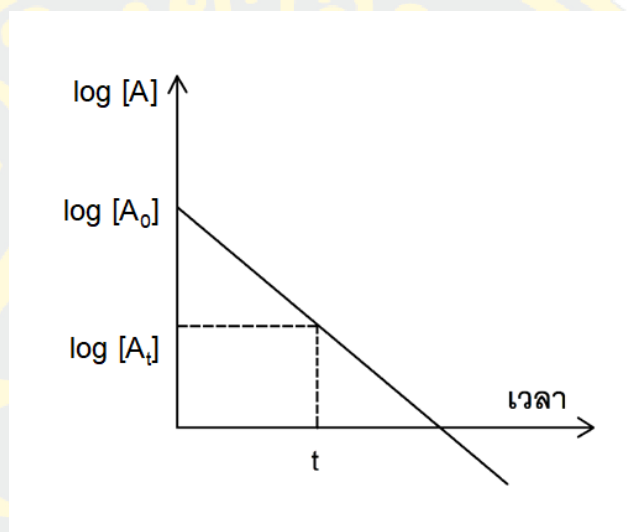
ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order reaction) อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับสารตั้งต้นเพียงตัวเดียว เขียนเป็นกฎอัตราได้ดังสมการที่ 20

$$r = -d[A]/dt = k[A] \quad [20]$$

เมื่ออินทิเกรตที่เวลา 0 ถึงเวลา t และสารตั้งต้นมีความเข้มข้นเป็น A_0 และ A จะได้ดังสมการที่ 21

$$\log A = \log[A_0] - kt/2.303 \quad [21]$$

เขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log A$ และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

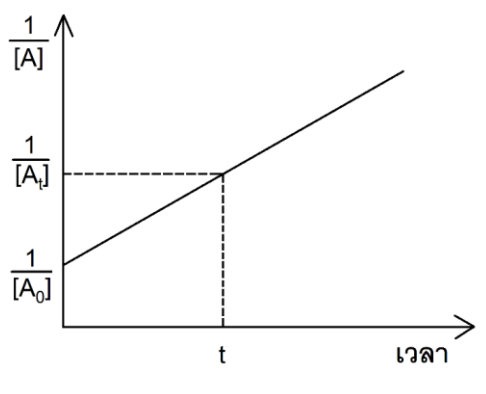
ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order reaction) อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับสารตั้งต้น โดยมีอันดับรวมของปฏิกิริยาเท่ากับ 2 เขียนเป็นกฎอัตราได้ดังสมการที่ 22

$$r = k[A][B] \quad [22]$$

เมื่ออินทิเกรตที่เวลา 0 ถึงเวลา t และสารตั้งต้นมีความเข้มข้นเป็น A_0 และ A จะได้ดังสมการที่ 23

$$1/A = 1/A_0 - kt \quad [23]$$

เขียนเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/[A]$ และเวลา สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง

โมเดลแลงเมียร์ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood model) เป็น โมเดลที่ใช้อธิบาย จลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ที่มีโมเลกุลถูกดูดซับอยู่บน พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยา พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งการดูดซับที่จำกัด สามารถดูด ซับได้เพียงชั้นเดียว (monolayer) การดูดซับนี้สามารถผันกลับได้ (Khezrianjoo & Revanasiddappa, 2012) และเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดเป็น สมการที่ใช้กันแพร่หลายในการบอกอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Gholami, Nassehinia, Jonidi-Jafari, Nasser, & Esrafil, 2014) ดังนี้

$$r = -dC/dt = kKC/(1+kC) \quad [24]$$

เมื่อ r คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (mg/L-min)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร (mg/L)

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (L/min)

K คือ ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ (L/mg)

โดยที่การดูดซับและการสลายไปของเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันขึ้นกับชนิด ความเข้มข้นของสารมลพิษ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา ความสามารถในการดูดซับสารมลพิษ โดยค่าคงที่ สมดุลการดูดซับจะมีค่าต่ำมาก และระดับความเข้มข้นของมลพิษที่น้อยทำให้สมการเข้าได้กับ pseudo-first-order model (Ateia, Alalm, Awfa, Johnson, & Yoshimura, 2020) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\ln(C_t/C_0) = kKt = -k_{app}t \quad [25]$$

เมื่อ C_t คือ ความเข้มข้นของสาร ณ เวลา t (mg/L)

K_{app} คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (L/mg)

จากสมการที่ 25 อาจเขียนได้ดังสมการที่ 26 (Ollis, 2018)

$$-\ln C/C_0 = K_{app}t + b \quad [26]$$

เมื่อทำการอินทิเกรตจะได้ดังสมการที่ 27

$$t = (C_0 - C) + (\ln C_0 - \ln C)/K_{app} \quad [27]$$

นอกจากสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน จากการทบทวนงานวิจัยยังพบว่า มีอีกหลายสมการที่สามารถอธิบายได้เช่นกัน (K. Suwannahong et al., 2012) ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

มลพิษ	สมการที่ใช้	ปัจจัยที่ศึกษา
สารอินทรีย์ ระเหยง่าย	สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด วูดสัน	การนำพา การแพร่ของสาร (Simultaneous convection-diffusion) และการกระจายของรังสียูวี
ไตรคลอโรเอทีลีน (Trichloroethylene)	สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด วูดสัน	ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษ ความชื้น
ฟอร์มัลดีไฮด์	สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด	ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษ
โทลูอิน	สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด	ตัวเร่งปฏิกิริยา และความชื้น
บิวทาไดอิน	สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด	ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษและ ความชื้น
ไอโซโพรพานอล แอซีโตน เมทานอล	ประยุกต์สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด (Modified Langmuir-Hinshelwood)	ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวออกซิไดซ์ และ อุณหภูมิ
แอซีโตน	ประยุกต์สมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด	ความเข้มแสง ความเข้มข้นเริ่มต้น ของมลพิษ ความชื้น อัตราการไหล ของอากาศ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

การออกแบบเครื่องฟอกอากาศสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

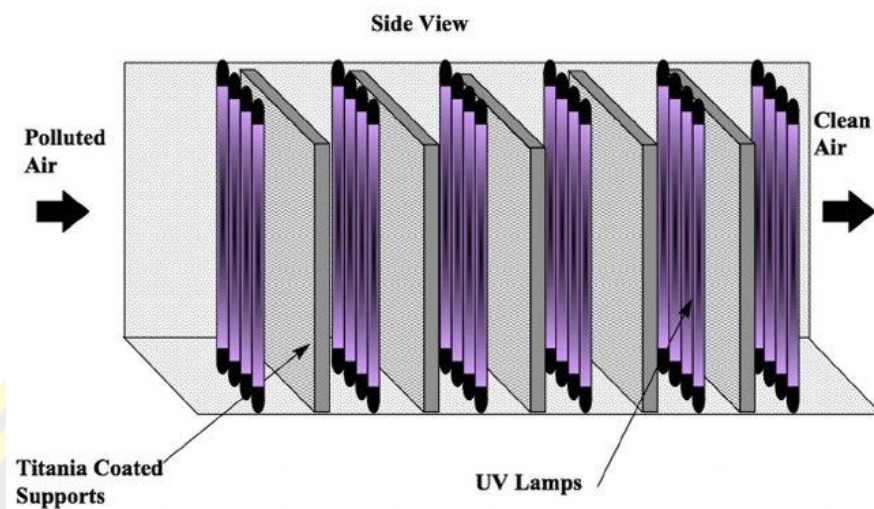
เครื่องฟอกอากาศประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ แหล่งกำเนิดแสงซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เป็นหลอดรังสียูวีซี เครื่องฟอกอากาศที่บรรจุแผงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและช่องทางผ่านของอากาศเรียกรวมว่า โครงสร้างเครื่องฟอกอากาศ (Reaction structure) โดยมีหลักการว่าอัตราการไหลของอากาศผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ต่ำ ความเข้มแสงที่สูงและตกกระทบบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยตรง และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มาก ปัจจัยเหล่านี้จะทำให้บำบัดมลพิษได้ดี (Mo, Zhang, Xu, Lamson, & Zhao, 2009)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน ได้แก่ ความชื้น ความเข้มแสง และความเข้มข้นของออกซิเจน (Meng & He, 2015) จึงนำปัจจัยดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องฟอกอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

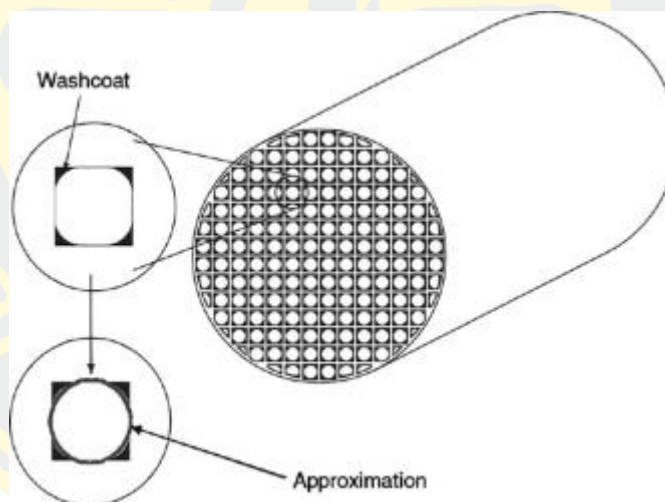
แหล่งกำเนิดแสง (Light sources)

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันนั้น เครื่องฟอกอากาศและแหล่งกำเนิดแสงมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย โดยเครื่องฟอกอากาศควรจะสามารถรับปริมาตรของอากาศได้ดี ความดันตก (Pressure drop) ต่ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สัมผัสแสงและสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้อย่างเพียงพอ ประเภทของเครื่องฟอกอากาศสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีหลายประเภท เช่น Honeycomb monolith, fluided-bed และ Annular เป็นต้น (Mo et al., 2009)

เครื่องฟอกอากาศแบบ **honeycomb monolith** มีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง เป็นแผง แบ่งออกเป็นหลายชั้น มีทั้งแบบหลายช่อง และช่องเดี่ยว หากมองภาพตัดขวางภายในของช่องจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมหรือวงกลม ซึ่งใช้สำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยติดอยู่ที่ผนังของช่อง แผง ดังภาพที่ 13 และ 14



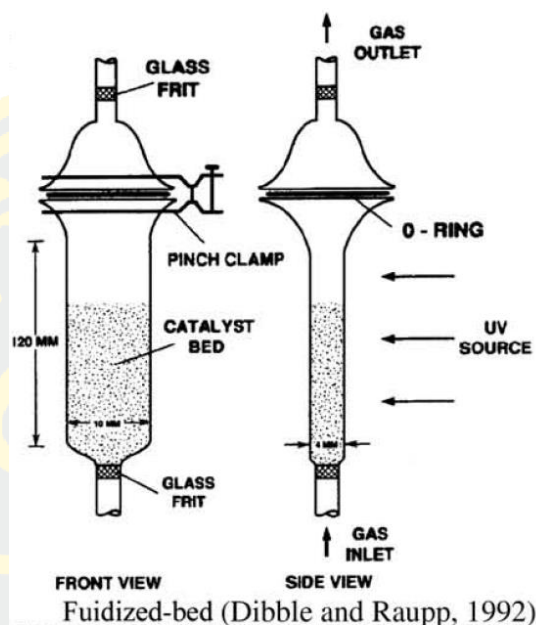
ภาพที่ 13 เครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith
(Meng & He, 2015)



ภาพที่ 14 ภาพตัดขวางภายในของเครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith
(Mei, Li, Liu, & Ji, 2006)

ข้อดีของเครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith คือ ความดันตก (Pressure drop) ต่ำ และมีพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างสูงกับปริมาตร โดยเป็นสัดส่วนโดยตรง ส่วนใหญ่ใช้ในการบำบัดควันเสียจากรถยนต์ และช่วยลดการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ของโรงงานผลิตไฟฟ้า (Meng & He, 2015)

เครื่องฟอกอากาศแบบ Fluidized bed reactor มีตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบรรจุอยู่ภายใน เหมาะกับการบำบัดมลพิษที่มีอัตราการไหลของอากาศสูง ดังภาพที่ 15

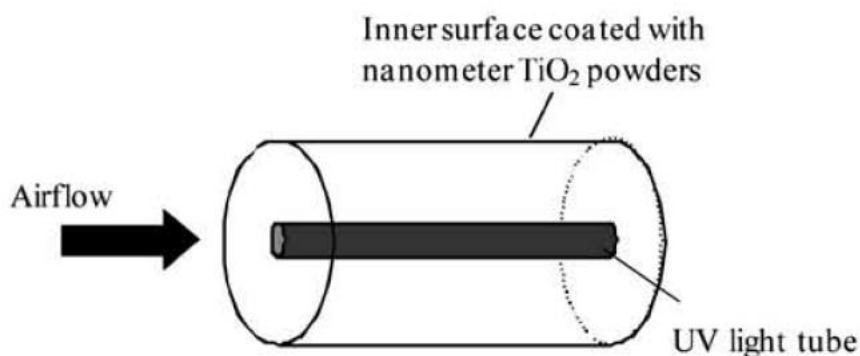


ภาพที่ 15 เครื่องฟอกอากาศแบบ Fluidized bed reactor

(Mo et al., 2009)

เครื่องฟอกอากาศแบบ Annular มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะถูกเคลือบที่ผนังด้านใน ส่วนผนังภายนอกจะมีแหล่งกำเนิดแสงที่มีระดับความเข้มแสงสม่ำเสมอ และส่องอย่างทั่วถึงทั้งผนัง ดังภาพที่ 16 ส่วนวัสดุที่เคลือบบนผิวในผนังของถังปฏิกรณ์ต้องสามารถให้แสงส่องผ่านได้ดี ข้อดีของถังปฏิกรณ์นี้ คือสามารถรองรับอัตราการไหลของอากาศได้ดี และเพื่อให้แน่ใจว่าตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกดูดซับเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี (Mo et al., 2009)

อย่างไรก็ตามเครื่องฟอกอากาศแต่ละแบบต่างมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป โดยเครื่องฟอกอากาศแบบ Annular ซึ่งมีข้อดีคือ แสงตกกระทบตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง ดูแลได้ง่าย (Tharasawatpipat, 2015) แต่หากเป็นเครื่องฟอกอากาศแบบ honeycomb monolith ทำให้แสงตกกระทบตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทั่วถึง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงได้ โดยเครื่องฟอกอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงตามแบบ annular เครื่องฟอกอากาศมีขนาดกว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร ความเร็วลมคัดแปลงต่ำสุด 0.240 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 4 ลิตรต่อวินาที



ภาพที่ 16 เครื่องฟอกอากาศแบบ Annular
(Mo et al., 2009)

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (eco-efficiency) คือ เครื่องมือในการศึกษาวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการจัดการให้การผลิตสินค้าและบริการมีศักยภาพเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง มีการดำเนินการที่สำคัญสำหรับการจัดการในสถานประกอบการเพื่อให้ไปถึงเป้าหมายของความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ 4 ประเด็นหลัก ได้แก่ พัฒนาระบบกระบวนการทางวิศวกรรม (re-engineer processes) เพื่อลดการใช้พลังงาน การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ (revalorize by-products) การทบทวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ (redesign products) และทบทวนการตลาด (rethink markets)

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเป็นตัวชี้วัดที่บ่งบอกถึงการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างยั่งยืนตามมาตรฐาน ISO 14045 (environmental management: Eco-efficiency assessment of product systems) ซึ่งเป็นความพยายามในการดูแลทั้งเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในเวลาเดียวกัน (Changwichan, Silalertruksa, & Gheewala, 2018) วิธีการที่ช่วยให้การผลิตสินค้าและบริการมีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจมากขึ้น มีดังนี้

1. ใช้ทรัพยากรในการผลิตลดลง
2. ใช้พลังงานในการผลิตลดลง
3. ปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมลดลง
4. เพิ่มการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่
5. เพิ่มการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน

6. เพิ่มอายุการใช้งานของสินค้า

7. เพิ่มคุณภาพของสินค้าและบริการ

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเป็นดัชนีชี้วัดความสัมพันธ์ด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมที่มุ่งไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development) อันเป็นเป้าหมายระยะยาวของหลายประเทศ

ประโยชน์ที่ได้จากการประเมินความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-efficiency)

1. ด้านเศรษฐศาสตร์

1.1 ลดต้นทุนผลิตทั้งด้านพลังงานและทรัพยากร

1.2 ใช้วัตถุดิบอย่างคุ้มค่า

1.3 นำไปสู่การพัฒนาการผลิต เพิ่มระดับการแข่งขันทางธุรกิจ

1.4 สามารถนำผลการประเมินในแต่ละช่วงเวลามาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นได้

ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์

1.5 สร้างภาพลักษณ์ให้แก่สินค้าและองค์กร

1.6 นำมาใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนนโยบายการผลิตได้

2. ด้านสิ่งแวดล้อม

2.1 ลดการปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งการลดใช้ทรัพยากรและวัตถุดิบ

2.2 ก่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

การประเมินความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

พิจารณาได้จากสัดส่วนของมูลค่าผลิตภัณฑ์และบริการเปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้าน โดยสามารถประเมินได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ} = \frac{\text{มูลค่าผลิตภัณฑ์หรือบริการ}}{\text{ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์หรือบริการ}}$$

มูลค่าผลิตภัณฑ์หรือการบริการ (product or service value) หมายถึง ปริมาณของสินค้าและบริการที่ผลิตและจัดหาให้แก่ลูกค้า ปริมาณยอดขายรวม กำไรเบื้องต้น และมูลค่าเพิ่ม เป็นต้น

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental influence) หมายถึง ปริมาณการใช้วัตถุดิบ ปริมาณการใช้พลังงาน ปริมาณการใช้น้ำ ปริมาณขยะที่นำไปฝังกลบ และปริมาณขยะที่นำไปเผา เป็นต้น (Nuengruthai Panichavalit., 2009)

ในการศึกษานี้ได้ศึกษากำลังไฟฟ้าที่ได้ใช้ในการบำบัดเบนซีน ประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีน และปริมาณความเข้มข้นของโททาเนียมไดออกไซด์ เขียนได้ดังสมการที่ 28

$$\text{Eco-efficiency} = P/E \quad [28]$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 24 ชั่วโมง
E คือ ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

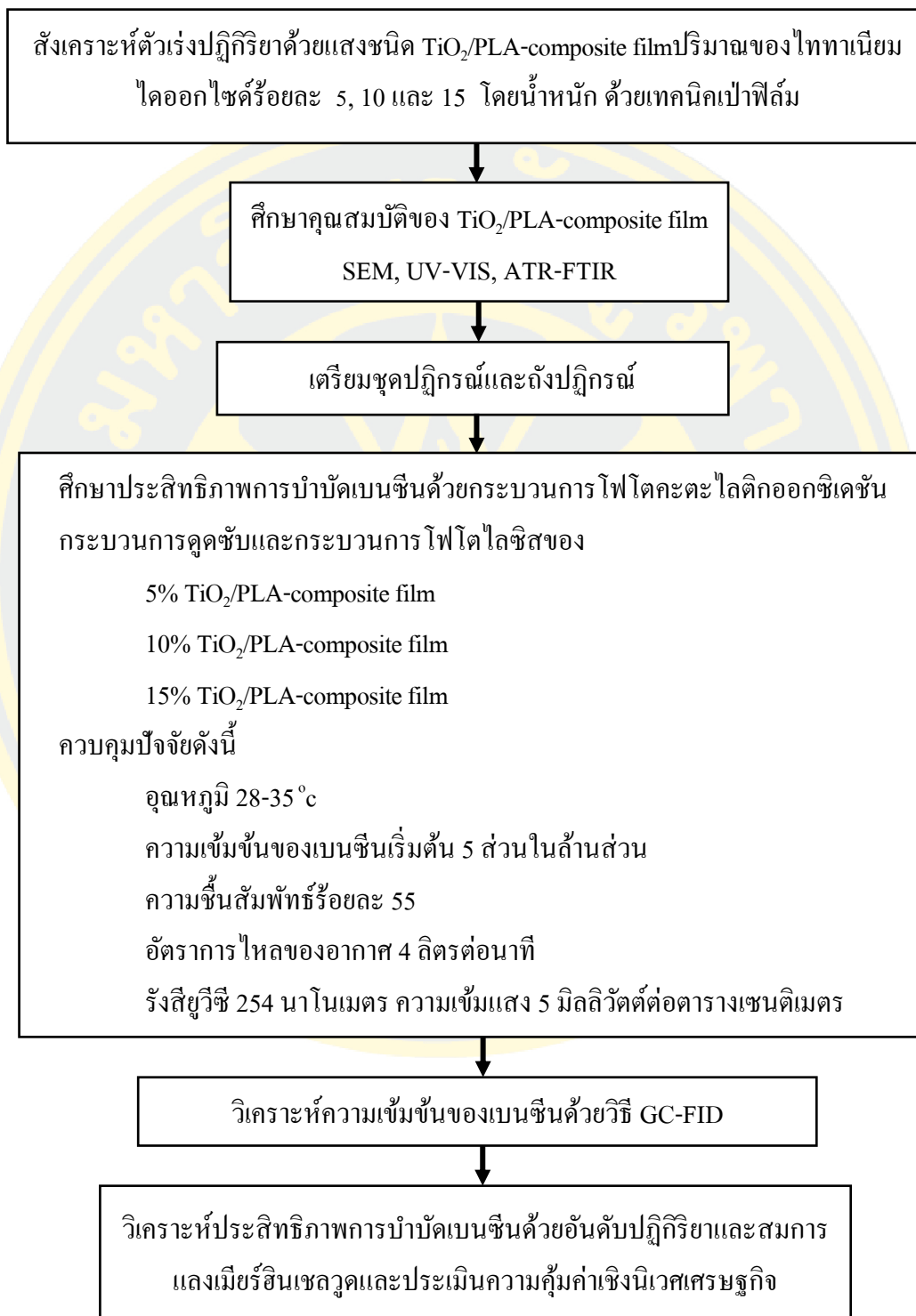
งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยไททาเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ (TiO₂/PLA-composite film) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film และศึกษาคุณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film

รูปแบบของการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องทดลอง ได้แบ่งงานวิจัยนี้ออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. สังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม
2. ศึกษาคุณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film โดยวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis Spectrophotometer: UV-VIS) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและองค์ประกอบธาตุของ TiO₂/PLA-composite film ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR)
3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดย TiO₂/PLA-composite film
4. ศึกษาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซีนด้วย TiO₂/PLA-composite film

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

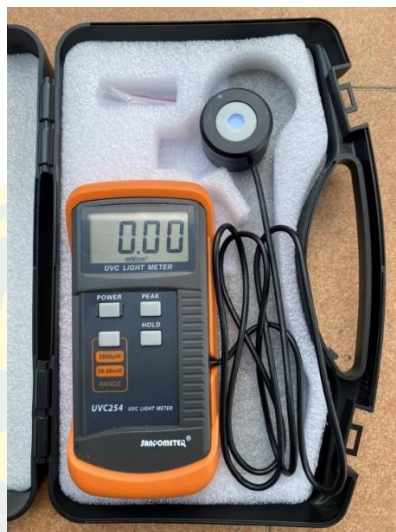
1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (twin screw extruder) ยี่ห้อ Lab Tech, LTE16-40
 2. เครื่องเป่าฟิล์ม ยี่ห้อ Lab tech, LE20-30/C & LF-250
 3. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง
 4. เครื่องวัดความหนา (Thickness meter) ยี่ห้อ Mitutoyo, Japan
 5. ถังปฏิกรณ์ขนาด 785 ลิตร มีการติดตั้งพัดลม
 6. เครื่องฉีดพ่นเบนซีน
 7. ถังปฏิกรณ์ตัดแปลงจากเครื่องฟอกอากาศยี่ห้อ Bonaire BAP-625 series
 8. หลอดไฟรังสียูวีซีทีที่ปล่อยความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
 9. เทอร์โมไฮโกรมิเตอร์ (Thermohygrometer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 410
 10. เครื่องวัดความเข้มแสงยูวีซีที (UVC meter)
 11. เครื่องวัดความเร็วลม (Wind speed meter) ยี่ห้อ KIMO รุ่น VT100
 12. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy: ATR-FTIR) ยี่ห้อ Perkin elmer Frontier
 13. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ยี่ห้อ LEO 1455VP
 14. เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer: UV-VIS) ยี่ห้อ Analytik Jena SPECORD 210 PLUS
 15. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography – Flame Ionization Detector: GC-FID) ยี่ห้อ Shimadzu, Japan
 16. กระบอกฉีดยาสำหรับเก็บตัวอย่างเบนซีน (gas tight syringe) ขนาด 1 มิลลิลิตร
 17. เกจวัดความดัน
 18. เครื่องโฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization detector) รุ่น ppbRAE 3000
- เครื่องมือดังกล่าวข้างต้นได้ผ่านการสอบเทียบความถูกต้องตามมาตรฐาน



ภาพที่ 18 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่



ภาพที่ 19 เครื่องเป่าฟิล์ม



ภาพที่ 20 เครื่องวัดความเข้มแสงยูวีซี



ภาพที่ 21 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR)



ภาพที่ 22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพที่ 23 เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS)



ภาพที่ 24 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ (GC-FID)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ผงไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส (TiO_2 powder, cosmetic grade)
2. โพลีแลคติก food grade จากบริษัท Nature work
3. เบนซีน (Benzene) (Merck, Analytical grade)

จริยธรรมการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำนักงานอธิการบดี กองบริหารการวิจัยและนวัตกรรม เมื่อวันที่ 10 มีนาคม พ.ศ. 2563

การสังเคราะห์ TiO_2/PLA -composite film ด้วยวิธีเป่าฟิล์ม

งานวิจัยนี้สังเคราะห์ TiO_2/PLA -composite film โดยใช้กรดโพลีแลคติกเป็นมอนอเมอร์ในการผลิต เนื่องจากย่อยสลายได้ง่าย ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม และใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลึกแบบอนาเทส นำวัตถุดิบทั้งสองมาผสมกัน และผลิตเป็นฟิล์มด้วยวิธีเป่าฟิล์ม (Blown film) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผลึกอนาเทส (TiO_2 cosmetic grade) ที่ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

2. ผสมไททานเนียมไดออกไซด์กับกรดโพลีแลคติกในอัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) ที่ อุณหภูมิ 100-190 °c ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

3. จากนั้นนำมาเป่า (Blown film technique) ให้ได้ความหนา 30 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 100-190°C ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 200 รอบต่อนาที (K. Suwannahong, 2012)

4. ทำกระบวนการข้างต้นซ้ำโดยใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 และทำการสังเคราะห์พลาสติกโพลีแลคติกที่ไม่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์สำหรับการทดลองควบคุม

5. พิจารณาสภาพที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film จากปริมาณ ไททานเนียมไดออกไซด์ที่สามารถใช้ในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ว่าได้ฟิล์มพลาสติก เป็นแผ่นบาง 30 ไมครอน

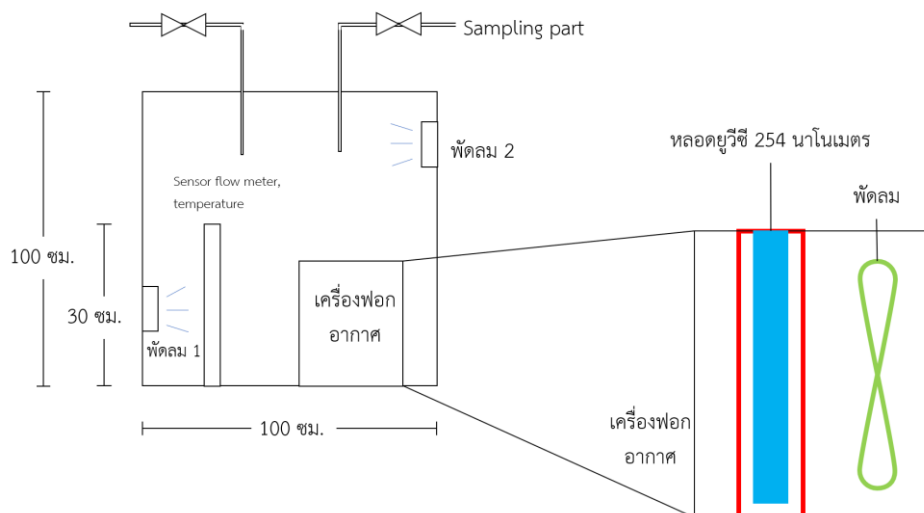
เตรียมเครื่องฟอกอากาศและตั้งปฏิกรณ์

เครื่องฟอกอากาศยี่ห้อ Bionaire BAP-625 series ขนาด กว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 25 มีความเร็วลม 4 ลิตรต่อนาที (Tharasawatpipat, 2015) นำไปตั้งในถังปฏิกรณ์ดังภาพที่ 26 และ 27 งานวิจัยนี้ดัดแปลงภายในเครื่องฟอกอากาศให้เป็นแบบ annular reactor ดังภาพที่ 25-27 มีลักษณะดังนี้

1. ภายในติดตั้งแผ่น TiO₂/PLA-composite film เป็นทรงกระบอก ดังภาพที่ 25
2. ติดตั้งหลอดรังสียูวีที่ปล่อยความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมี TiO₂/PLA-composite film อยู่ล้อมรอบ ดังภาพที่ 26
3. ช่องเปิดปิดบริเวณหลอดรังสียูวีใช้แผ่นยางกันซึมป้องกันการรั่วซึม
4. เครื่องฟอกอากาศมีพัดลมเพื่อดูดอากาศจากถังปฏิกรณ์เข้าสู่เครื่อง
5. ภายในถังปฏิกรณ์ได้ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม วัดอุณหภูมิและวัดความชื้น
6. ภายหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ครบได้ทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของถังปฏิกรณ์ โดยตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซขณะเปิดเครื่องโดยการอัดแรงดันลมที่ติดตั้งมาตรวัดแรงดันไว้ ด้านบนถัง จากนั้นติดตามแรงดันในถังปฏิกรณ์



ภาพที่ 25 ภายในเครื่องฟอกอากาศ

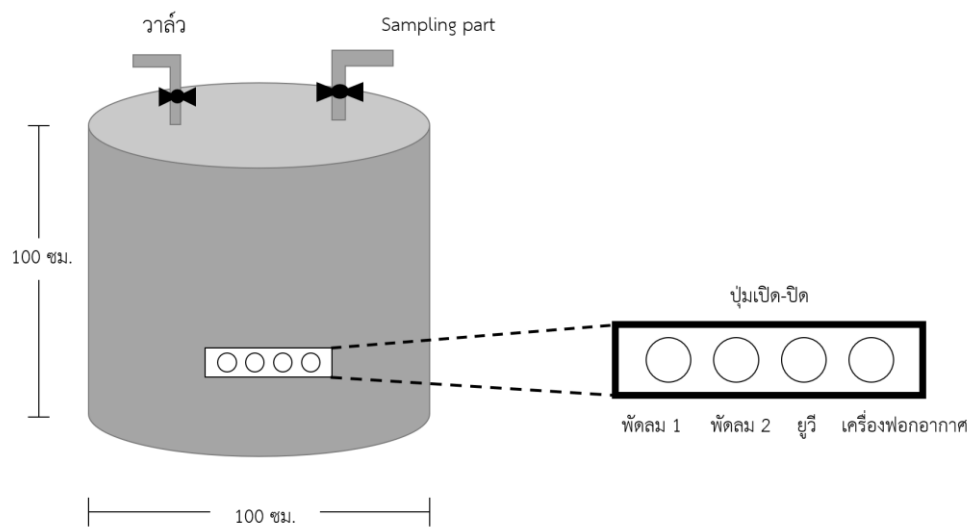


ภาพที่ 26 เครื่องฟอกอากาศภายในถังปฏิกรณ์

(Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019)



ภาพที่ 27 ภายในเครื่องฟอกอากาศ



ภาพที่ 28 ถังปฏิกรณ์ภายนอก

(Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019)



ภาพที่ 29 ถังปฏิกรณ์และแผงควบคุม



ภาพที่ 30 ภายในถังปฏิกรณ์

ศึกษาคุณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ TiO₂/PLA-composite film จากทั้ง 3 วิธี ประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) จะปล่อยลำแสงอิเล็กตรอนไปยังพื้นผิวของฟิล์มและนำมาสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ทำให้ทราบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวฟิล์ม กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถขยายภาพได้ที่กำลังขยาย 100, 200, 500 และ 1000 เท่า เครื่อง SEM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องยี่ห้อ LEO 1455VP

2. การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด TiO₂/PLA-composite film ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis Spectrophotometer: UV-VIS) เครื่องสามารถนำข้อมูลการดูดกลืนแสงของสารต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาปริมาณของสารนั้น ซึ่งอาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสารในช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวีและแสงที่ตามองเห็นมีค่าประมาณ 190-1,100 นาโนเมตร เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีความสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer and Lambert law) งานวิจัยนี้ใช้เครื่องยี่ห้อ Analytik Jena SPECORD 210 PLUS ที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แถบพลังงาน

3. การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) ยี่ห้อ Perkin elmer Frontier

เครื่องจะปล่อยอินฟราเรดส่องไปยังฟิล์มที่ทำการตรวจวัดผ่านคริสตัลในเครื่อง ฟิล์มและคริสตัลมีความหนาแน่นแตกต่างกัน มีดัชนีหักเหแตกต่างกัน ทำให้คลื่นอินฟราเรดที่ตกกระทบจะถูกสะท้อนและหักเห โดยเครื่องจะแสดงผลพลังงานที่สะท้อนออกมาในรูปสเปกตรัม อีกทั้งจะเกิดแทรกซันชันของการสั่นหรือการหมุนของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลในฟิล์ม ทำให้ทราบพันธะภายในโมเลกุล

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน

1. สภาพที่ควบคุมในการทดลอง

1.1 เตรียมถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นระบบปิดขนาด 785 ลิตร ดังภาพที่ 28 ที่ผ่านการตรวจสอบการรั่วไหลแล้ว

1.2 มีการติดตั้งพัดลมเพื่อหมุนเวียนอากาศในถังปฏิกรณ์ที่อัตราเร็ว 300 ลิตรต่อนาที

1.3 ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไว้ที่ร้อยละ 55

1.4 อุณหภูมิห้อง 28-35 องศาเซลเซียส

2. การตรวจระดับเบนซีนด้วยเครื่อง GC-FID

- 2.1 ทำการสอบเทียบเครื่อง GC-FID โดยใช้ก๊าซเบนซีนมาตรฐาน
- 2.2 เก็บอากาศในถังปฏิกรณ์ด้วย gas tight syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร
- 2.3 ฉีดอากาศเข้า capillary column ของเครื่อง GC-FID
- 2.4 ทำการวิเคราะห์ระดับเบนซีนที่ฉีดก๊าซที่อุณหภูมิ (injector temperature) 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่คอลัมน์เริ่มต้น 50-110 องศาเซลเซียส ปรับอุณหภูมิด้วยอัตราเร็ว 40 องศาเซลเซียสต่อนาที

3. การทดลองควบคุมการดูดซับและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

- 3.1 เตรียมเครื่องฟอกอากาศที่ประกอบด้วย 5%TiO₂/PLA-composite film
- 3.2 บรรจุเครื่องฟอกอากาศใส่ในถังปฏิกรณ์ที่ผ่านการตรวจสอบการรั่วไหล
- 3.3 ภายในถังปฏิกรณ์ควบคุมสถานะหมุนเวียนอากาศที่อัตราเร็ว 300 ลิตรต่อนาที ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิดังที่กล่าวข้างต้นในข้อ 1
- 3.6 ทำการฉีดเบนซีนให้เป็นละอองจำนวน 1 ครั้ง
- 3.7 วัดติดตามระดับความเข้มข้นของเบนซีนด้วยเครื่อง GC-FID) ทุก 1 ชั่วโมง จนถึงจุดสมดุลของการดูดซับ
- 3.8 เปิดหลอดรังสียูวีสำหรับเพื่อเริ่มกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน
- 3.8 ทำการทดลองนี้ซ้ำกับเครื่องฟอกอากาศที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก

4. การทดลองควบคุมกระบวนการโฟโตไลซิส

- 4.1 เตรียมเครื่องฟอกอากาศซึ่งประกอบด้วยพลาสติกพีแอลเอซึ่งไม่มีไททานเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ
- 4.2 บรรจุเครื่องฟอกอากาศใส่ในถังปฏิกรณ์ซึ่งเป็นถังระบบปิดขนาด 785 ลิตร
- 4.3 ภายในถังปฏิกรณ์ควบคุมสถานะหมุนเวียนอากาศที่อัตราเร็ว 300 ลิตรต่อนาที ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิดังที่กล่าวข้างต้นในข้อ 1
- 4.4 ทำการฉีดเบนซีนให้เป็นละอองจำนวน 1 ครั้ง
- 4.5 วัดติดตามระดับความเข้มข้นของเบนซีนจนกว่าจะถึงจุดสมดุลของการแพร่ด้วยเครื่องโฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization detector) รุ่น ppbRAE 3000 จากนั้นวัดยืนยันด้วยเครื่อง GC-FID
- 4.6 เปิดหลอดไฟรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

4.7 วัดติดตามระดับความเข้มข้นของเบนซีนด้วยเครื่อง GC-FID ทุก 1 ชั่วโมง นาน 24 ชั่วโมง สรุปการทดลองทั้งหมดได้ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน

การทดลองที่	ตัวแปรที่ทดลอง			
	5%w/ w TiO ₂ /	10%w/ w TiO ₂ /	15%w/ w TiO ₂ /	UVC 254
	PLA	PLA	PLA	nm
1	-	-	-	✓
2	✓	-	-	-
3	-	✓	-	-
4	-	-	✓	-
5	✓	-	-	✓
6	-	✓	-	✓
7	-	-	✓	✓

การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง มีการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองดังนี้

1. ผลการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

ประเมินผลการทดลองจากการได้แผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง เนื่องจากหากผสมไม่ถูกสัดส่วนจะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ รวมถึงใช้ผลการศึกษาคูณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film ที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ปริมาณแตกต่างกันมาเปรียบเทียบคุณสมบัติ จะทำให้ทราบได้ว่าสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ที่อัตราส่วนใดได้ฟิล์มที่มีลักษณะเหมาะสม

2. ศึกษาคุณสมบัติของTiO₂/PLA-composite film โดยแต่ละคุณสมบัติใช้อุปกรณ์แตกต่างกันทำให้แปลผลต่างกัน ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) จะทราบผลการวิเคราะห์เป็นภาพ 3 มิติ ประเมินการกระจายของไททานเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์ม และประเมินปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่อยู่บนผิวฟิล์มและนำแต่ละภาพของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะเกาะตัวของไททานเนียมไดออกไซด์

2.2 การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis Spectrophotometer: UV-VIS) จะบอกค่าดูดกลืนแสงของ TiO₂/PLA-composite film เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีความสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer and Lambert law) จึงบอกค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ของไททาเนียมไดออกไซด์ได้ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์

2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) เครื่องจะแสดงผลออกมาในรูปแบบสเปกตรัม นำค่าที่ได้มาเทียบว่าเป็นชนิดของธาตุ และประเภทพันธะภายในโมเลกุล

3. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน

ใช้ค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มข้นของเบนซีน และร้อยละของเบนซีนที่ถูกบำบัดไปในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อบอกประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 29

$$\% \text{ removal} = (\text{Co}-\text{C})/\text{Co} \times 100 \quad [29]$$

เมื่อ % removal คือ ประสิทธิภาพของการบำบัด

Co คือ ความเข้มข้นของสารเริ่มต้น (ส่วนในล้านส่วน)

C คือ ความเข้มข้นของสาร ณ เวลาต่าง ๆ ที่ทดสอบ (ส่วนในล้านส่วน)

ใช้สมการแลงเมียร์อินเซลวูดในการบอกประสิทธิภาพการบำบัด จากสมการดังกล่าวจะได้ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันและค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับซึ่งใช้บอกอัตราเร็วของปฏิกิริยา

4. ศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

นำค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ตลอดการบำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วย TiO₂/PLA-composite film ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในแต่ละความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ เขียนดังสมการที่ 28

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องทดลอง เพื่อสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ จากนั้นจึงศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดย TiO₂/PLA-composite film จึงแบ่งงานวิจัยนี้ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

จากการทดลองสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film ผู้วิจัยได้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดผลึกอนาเทสและโพลีแลคติก ผสมร่วมกันในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวนอนคู่ (twin screw extruder) ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ที่ความหนา 30 ไมครอน ที่อุณหภูมิในช่วง 100-190°C ความเร็วรอบของสกรูที่ 200 รอบต่อนาที ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม (blown film) เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าที่สังเคราะห์พลาสติก PLA/LDPE ในสัดส่วน 10:90 ที่ผสมไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เทคนิคเป่าฟิล์มใช้อุณหภูมิที่ 140, 150, 160 และ 180 องศาเซลเซียส แต่ใช้ความเร็วรอบของสกรูเพียง 35 รอบต่อนาที (Tu-morn et al., 2019) เนื่องจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) มีความเหนียว ยืดหยุ่น ทนแรงฉีกขาดได้ดี (Sastri, 2014) ส่วนโพลีแลคติกมีลักษณะไม่ทนความร้อน ความทนทานต่ำ ความเหนียวต่ำ (Hamad, Kaseem, Ayyoob, Joo, & Deri, 2018) งานวิจัยฉบับนี้จึงใช้ความเร็วรอบสูงกว่าตามความเหนียวที่น้อยลงของโพลีแลคติก และใช้อุณหภูมิต่ำสุดในการเป่าฟิล์มน้อยกว่า PLA/LDPE ตามจุดหลอมเหลวที่ต่ำของโพลีแลคติก

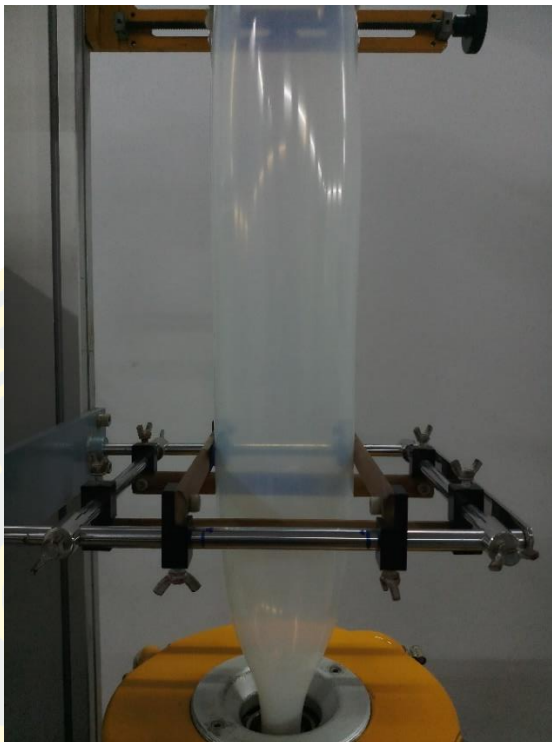
ตัวอย่างการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ดังภาพที่ 31 และ 32 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์มีลักษณะดังภาพที่ 33 และ 34



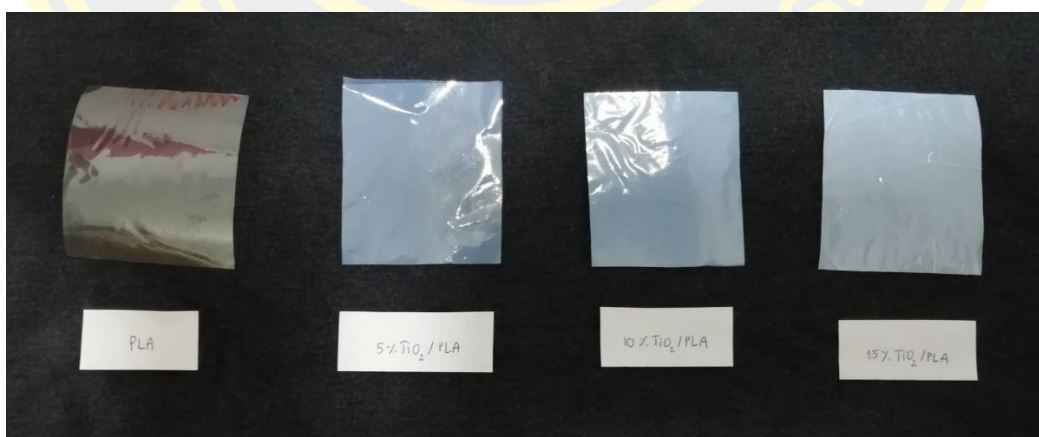
ภาพที่ 31 ตัวอย่างการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



ภาพที่ 32 ตัวอย่างการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



ภาพที่ 33 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์ได้ขณะผ่านเครื่องเป่าฟิล์ม



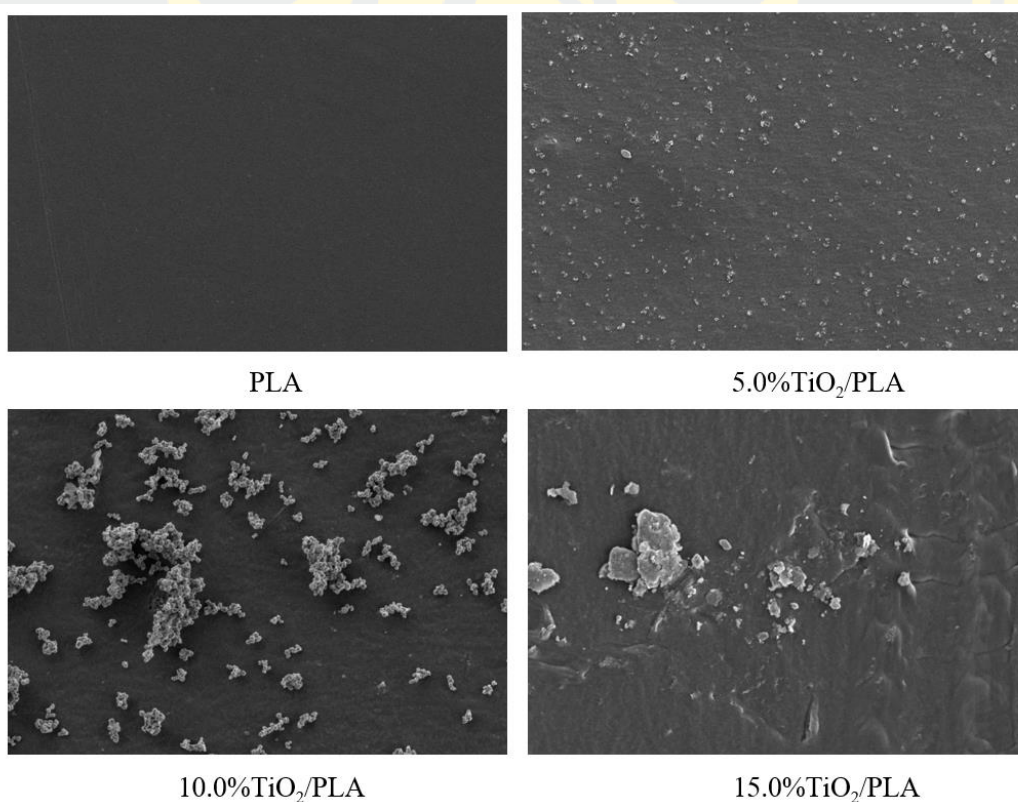
ภาพที่ 34 TiO_2/PLA -composite film ที่สังเคราะห์ได้

ส่วนที่ 2 คุณสมบัติของ TiO₂/PLA-composite film

ตัวเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง TiO₂/PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้จากไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกอนาเทสและโพลีแลคติก ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) และขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม (blown film) เมื่อนำฟิล์มดังกล่าวมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน ได้ผลการศึกษาดังนี้

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

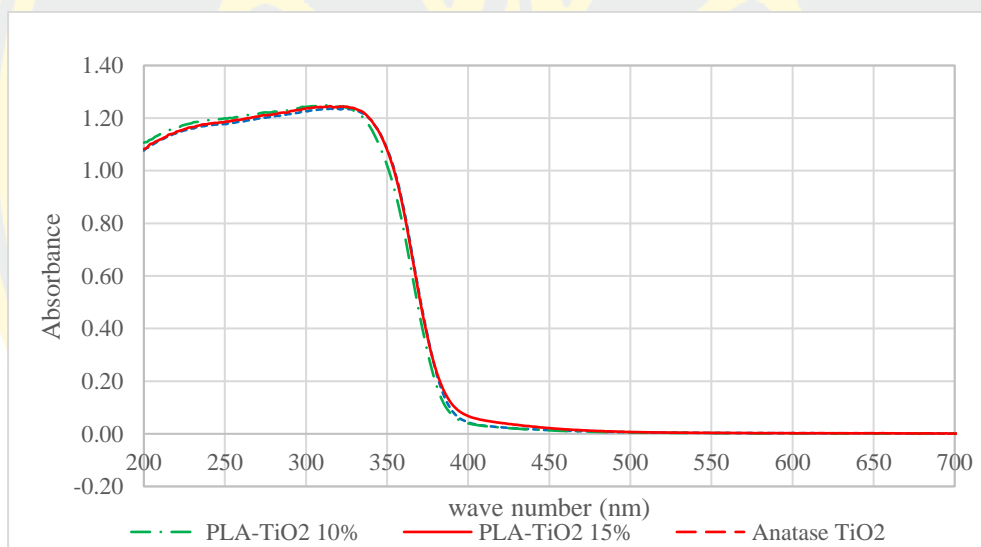
การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, LEO 1455VP) พบว่าการกระจายของไททาเนียมไดออกไซด์บนแผ่นฟิล์มที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก เป็นดังภาพที่ 35 ซึ่งพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ผิวของฟิล์มเป็นอย่างดี ส่วนฟิล์มที่ไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีการเกาะกลุ่มของไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้การกระจายตัวที่ดีของไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเพิ่มสูงขึ้นได้



ภาพที่ 35 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM ของ TiO₂/PLA-composite film

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดไททาเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Analytik Jena SPECORD 210 PLUS) ที่ความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร ได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 36 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 นาโนเมตร เมื่อคำนวณหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap; Eg) ของฟิล์มที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 พบว่ามีค่าในช่วง 3.14, 3.18 และ 3.22 อิเล็กตรอน โวลต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Kreetachat et al., 2013) ซึ่งเหมาะสมมีแถบช่องว่างพลังงานเหมาะสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โดยค่าแถบช่องว่างพลังงานนี้จะช่วยป้องกันการเกิด recombination ดังตารางที่ 17



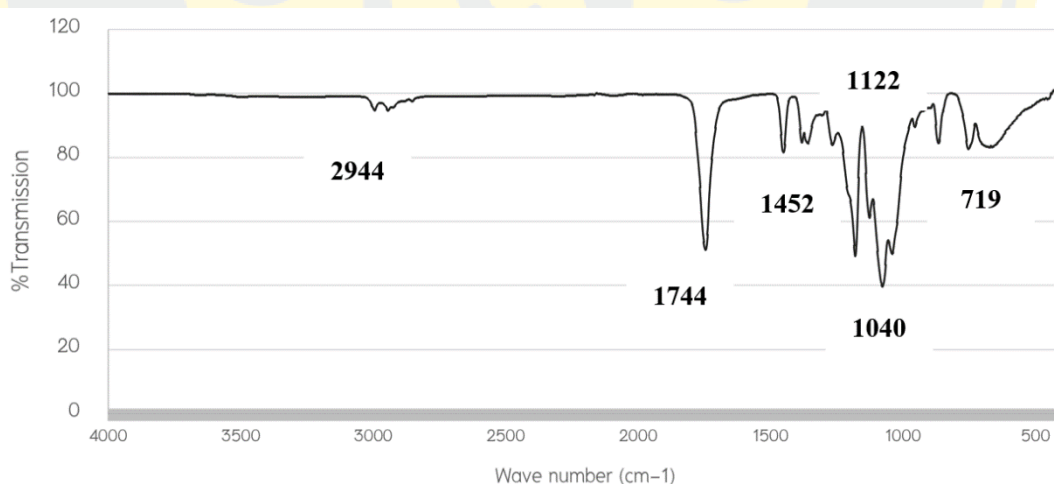
ภาพที่ 36 ช่วงการดูดกลืนแสงของ TiO_2/PLA -composite film

ตารางที่ 17 ค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO₂/PLA composite film

ร้อยละโดยน้ำหนักของไททานเนียมไดออกไซด์	แถบช่องว่างพลังงาน (eV)
5	3.22
10	3.18
15	3.14

การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบ

การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) เพื่อบอกหมู่ฟังก์ชันในตัวเร่งปฏิกิริยาอาศัยการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วทำให้พันธะเคมีเกิดการสั่นแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบโดยมีผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ผลการตรวจด้วยเทคนิค ATR-FTIR

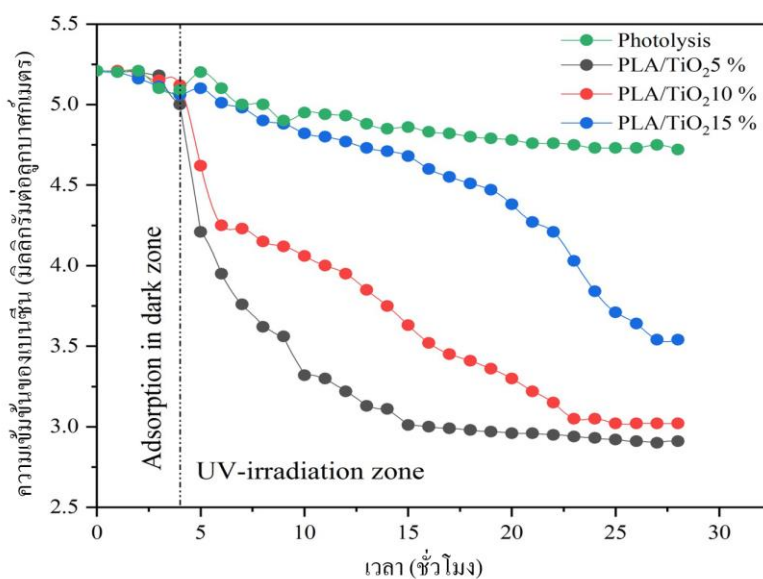
จากภาพที่ 34 แสดงให้เห็นถึงพันธะใน TiO₂/PLA-composite film ซึ่งประกอบไปด้วย H-C=O: C-H ในแอลิแฟติกไฮโดรคาร์บอน และอัลดีไฮด์จากค่าช่วง 2,850-3000 cm⁻¹ และ 2,830-2,695 cm⁻¹ ตามลำดับ พันธะ C-C ในแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนค่าช่วง 1,400-1,500 cm⁻¹ และพบว่าค่าช่วง 719 cm⁻¹ ในกราฟมีขนาดใหญ่มากที่สุดซึ่งพบจากอนาเทสไททานเนียมไดออกไซด์ (K.

Suwannahong et al., 2012) ค่า $1,040\text{ cm}^{-1}$ เป็นพันธะ COH ค่า $1,122\text{ cm}^{-1}$ พันธะ C-O (Q. Wang et al., 2017) ค่า $1,744\text{ cm}^{-1}$ พันธะ C=O และพันธะ C=O ของอัลดีไฮด์พบค่าช่วง $1740\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ (Schulz & Baranska, 2009)

ส่วนที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน

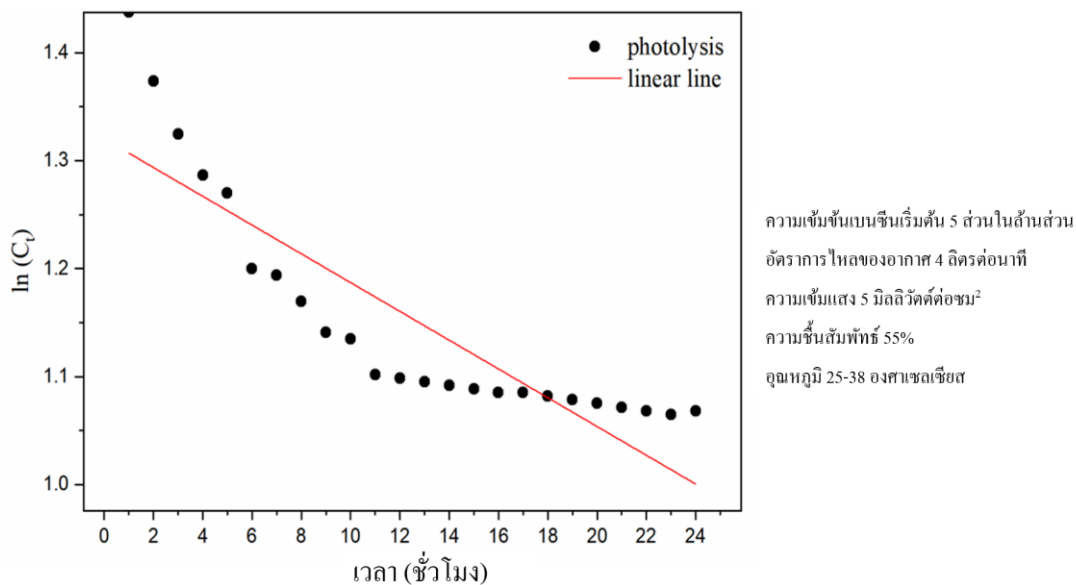
ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส

การทดลองบำบัดสารเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส ใช้เบนซีนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 ± 0.5 ส่วนในล้านส่วน ภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุเครื่องฟอกอากาศขนาดกว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร ที่มีหลอดรังสียูวีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีความเร็วลม 4 ลิตรต่อนาที และติดตั้งพลาสติกพีแอลเอที่ไม่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์ ใช้อัตราการไหลของอากาศในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 300 ลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างเบนซีนทุก 1 ชั่วโมง วิเคราะห์ผลการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส ได้ดังภาพที่ 38 และ 39



ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน
อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตรต่อนาที
ความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อซม²
ความชื้นสัมพัทธ์ 55%
อุณหภูมิ 25-38 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 38 ระดับความเข้มข้นของเบนซีนขณะบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C_t$ กับเวลาในกระบวนการโฟโตไลซิส

จากภาพที่ 38 พบว่าเบนซีนถูกบำบัดได้หลายกระบวนการ ทั้งกระบวนการดูดซับ กระบวนการโฟโตไลซิส และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเบนซีนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถูกบำบัดด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นบน TiO_2/PLA -composite film สามารถลดปริมาณเบนซีนได้เพียงเล็กน้อยเนื่องจากไททานเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการดูดซับไม่สูงนัก และสามารถบำบัดเบนซีนได้ดีกว่ากระบวนการโฟโตไลซิส เนื่องจากกระบวนการโฟโตไลซิสอาศัยพลังงานจากรังสียูวีโดยตรงในการสลายพันธะของเบนซีน ส่วนกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานแสงเหมือนกระบวนการโฟโตไลซิส แต่มีตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) ที่ช่วยดูดซับพลังงานแสงแล้วเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว

กระบวนการโฟโตไลซิสสามารถบำบัดเบนซีนเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งดังแสดงในภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่าเบนซีนจะถูกบำบัดได้เร็วขึ้นได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง

ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดย TiO_2/PLA -composite film

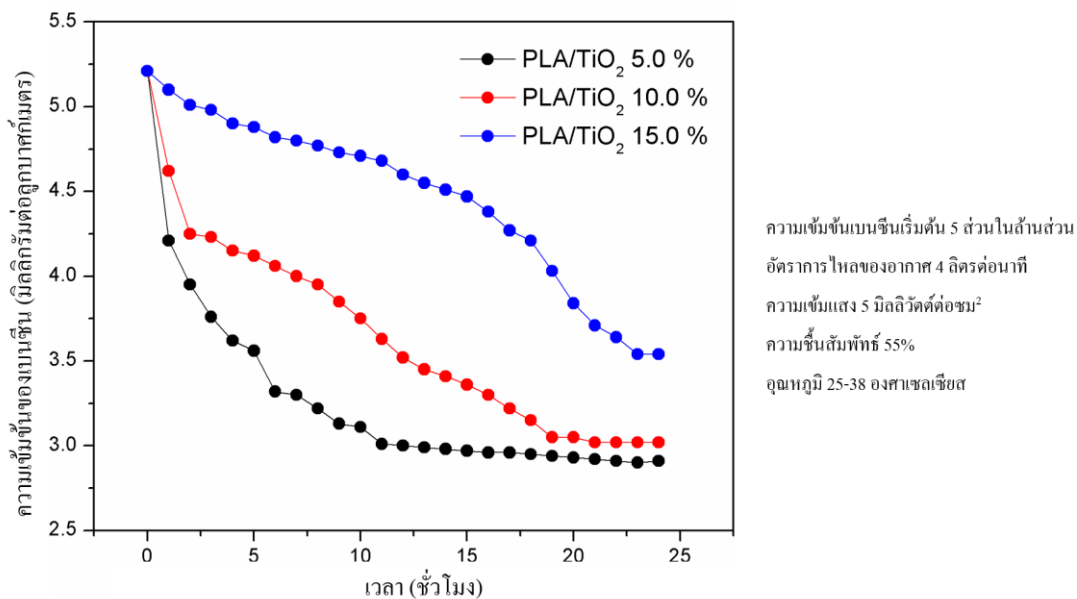
การทดลองบำบัดสารเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน ใช้เบนซีนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 ± 0.5 ส่วนในล้านส่วน ภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุเครื่องฟอกอากาศขนาด

กว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร เครื่องฟอกอากาศมีหลอดรังสียูวีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ติดตั้งโดยมีความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีความเร็วลมคัดแปร่งต่ำสุด 0.240 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 4 ลิตรต่ออนาที ใช้อัตราการไหลของอากาศในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 300 ลิตรต่ออนาที เก็บตัวอย่างเบนซีนทุก 1 ชั่วโมง เป็นระยะเวลาานาน 24 ชั่วโมง วิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันในสภาวะการทดลองดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 สภาวะที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดสารเบนซีน

สภาวะ	ค่าที่ทำการทดลอง
ความชื้นสัมพัทธ์	55%
ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น	5 ส่วนในล้านส่วน
อัตราการไหลของอากาศ	4 ลิตรต่ออนาที
ความเข้มแสง	5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิ	28-35 องศาเซลเซียส
ร้อยละโดยน้ำหนักของไททานเนียมไดออกไซด์	5, 10 และ 15

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่ใช้ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่ต่างกัน การหาประสิทธิภาพของการบำบัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14



ภาพที่ 40 ระดับความเข้มข้นของเบนซินที่บำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

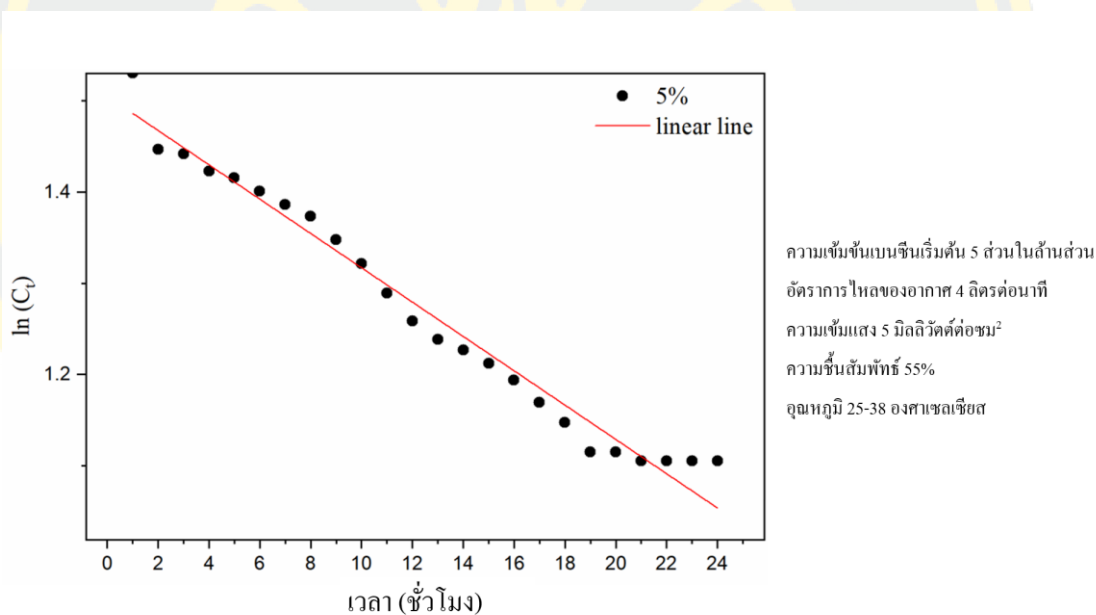
จากภาพที่ 40 พบว่าการบำบัดเบนซินความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5 ± 0.5 ส่วนในล้านส่วนภายในถังปฏิกรณ์ขนาด 785 ลิตร ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดย TiO₂/PLA-composite film ที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซินเท่ากับร้อยละ 44, 42 และ 32 ตามลำดับ ดังตารางที่ 19 เนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยแสงทำให้อัตราเร็วในการบำบัดเบนซินสูงกว่ากระบวนการโฟโตไลซิส

ตารางที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซินที่ 24 ชั่วโมง

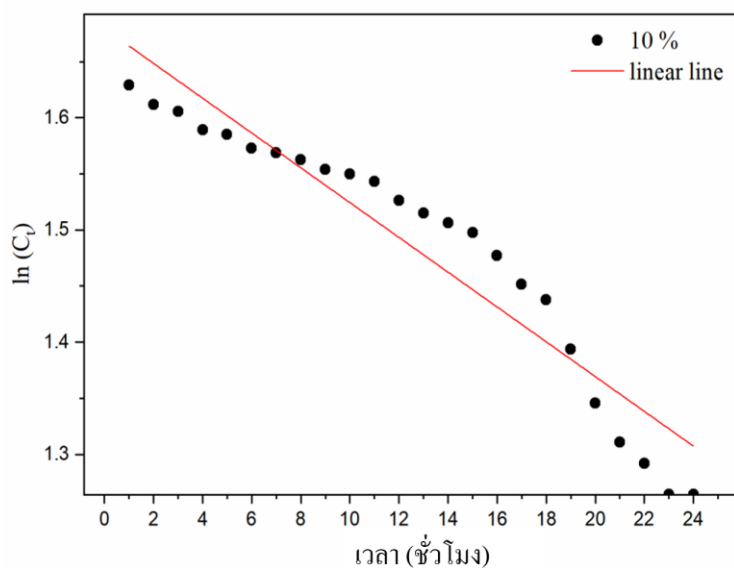
วิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซินที่ 24 ชั่วโมง
กระบวนการโฟโตไลซิส	ร้อยละ 9
กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	
5%TiO ₂ /PLA-composite film	ร้อยละ 44
10%TiO ₂ /PLA-composite film	ร้อยละ 42
15%TiO ₂ /PLA-composite film	ร้อยละ 32

จลนศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Kinetic of Photocatalytic Oxidation)

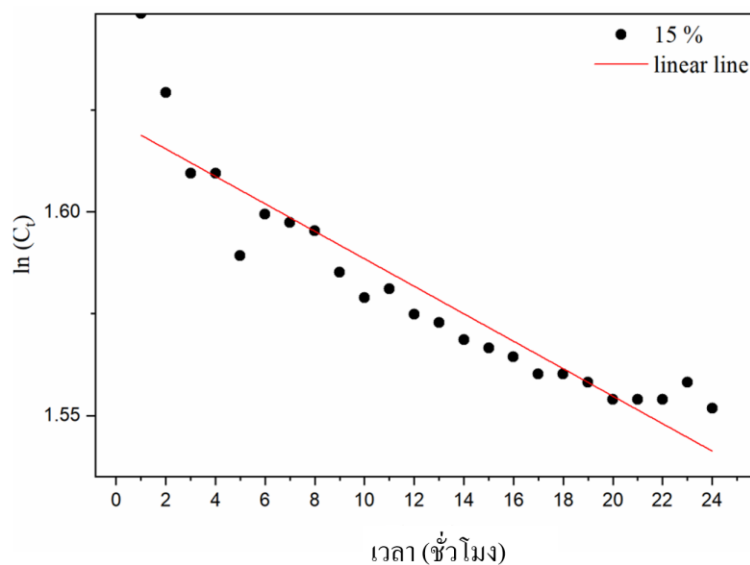
จากการทดลองบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันภายในถังปฏิกรณ์ระบบปิดปริมาตร 785 ลูกบาศก์เมตร ความคุมอัตราเร็วการไหลของอากาศ ความชื้นและอุณหภูมิให้คงที่ ผลการศึกษาพบว่า การบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการ โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสามารถอธิบายโดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first order reaction) ดังภาพที่ 41-43 กล่าวคืออัตราการบำบัดเบนซีนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนสูงสุดและจะมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไททาเนียมไดออกไซด์ แต่การทดลองนี้พบว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก มีการเกาะกลุ่มกันของไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนจึงลดลง



ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln C_t$ กับ t เมื่อบำบัดด้วย 5%TiO₂/PLA-composite film



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Ct$ กับ t เมื่อบำบัดด้วย 10%TiO₂/PLA-composite film



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Ct$ กับ t เมื่อบำบัดด้วย 15%TiO₂/PLA-composite film

อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชันเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาดังตารางที่ 20 จะเห็นว่า 5%TiO₂/PLA-composite film สามารถลดเบนซีนได้เร็วที่สุด

ตารางที่ 20 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดเบนซีน

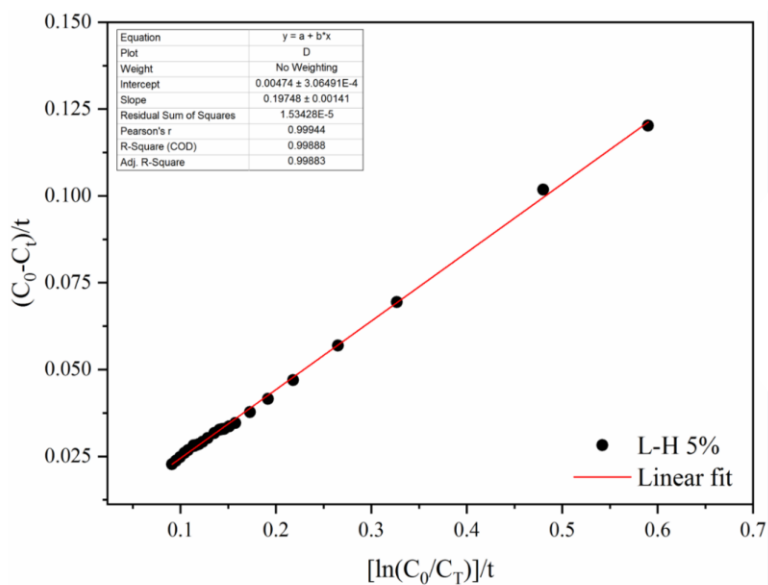
วิธีการบำบัด	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง
กระบวนการโฟโตไลซิส	-0.0133
กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน	
5%TiO ₂ /PLA-composite film	-0.0188
10%TiO ₂ /PLA-composite film	-0.0155
15%TiO ₂ /PLA-composite film	-0.0033

เนื่องจากกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีหลายขั้นตอนจึงมีการใช้แบบจำลองสมการของแลงเมียร์ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood: LH) เพื่อประเมินความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาให้แม่นยำมากขึ้น โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R² ของแต่ละปัจจัยพบว่ามีความระหว่าง 0.9288 ถึง 0.9996 และเป็นไปตามแบบจำลองของสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด ซึ่งจะพบค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แทนด้วย k และค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (K) แสดงในตารางที่ 21

ค่า K ของ 5%TiO₂/PLA-composite film มีค่า 0.1975 และมีค่า k เท่ากับ 0.0047 ซึ่งมากที่สุดดังตารางที่ 21 สอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนที่ร้อยละ 44 และคุณสมบัติทางกายภาพที่พบว่ามีไททานเนียมไดออกไซด์กระจายตัวดีที่สุด โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าได้กับหลักการของสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดแสดงดังภาพที่ 44-46

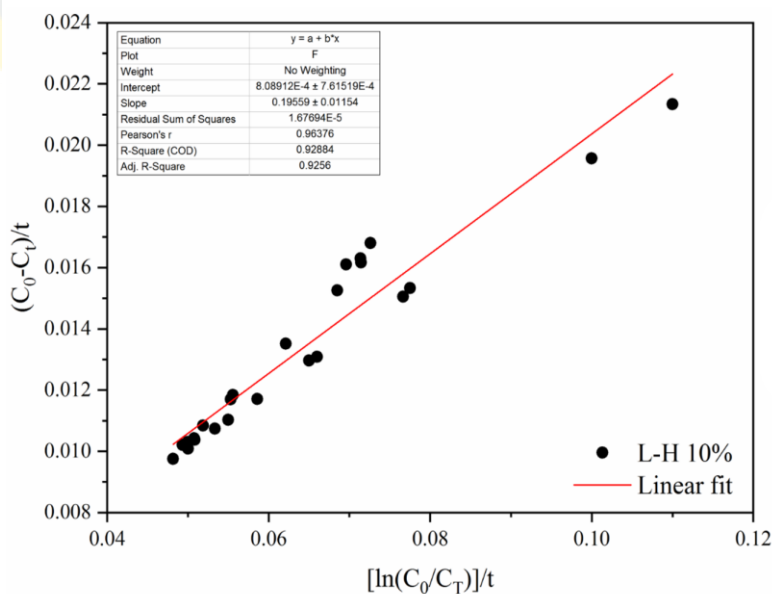
ตารางที่ 21 ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาจากการคำนวณด้วยสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด

ความเข้มข้น ของ เบนซีนเริ่มต้น	TiO ₂ /PLA-composite film								
	5%TiO ₂ /PLA			10%TiO ₂ /PLA			15%TiO ₂ /PLA		
	K	k	R ²	K	k	R ²	K	k	R ²
5.21	0.1975	0.0047	0.9988	0.1956	0.0008	0.9288	0.1940	0.0001	0.9996



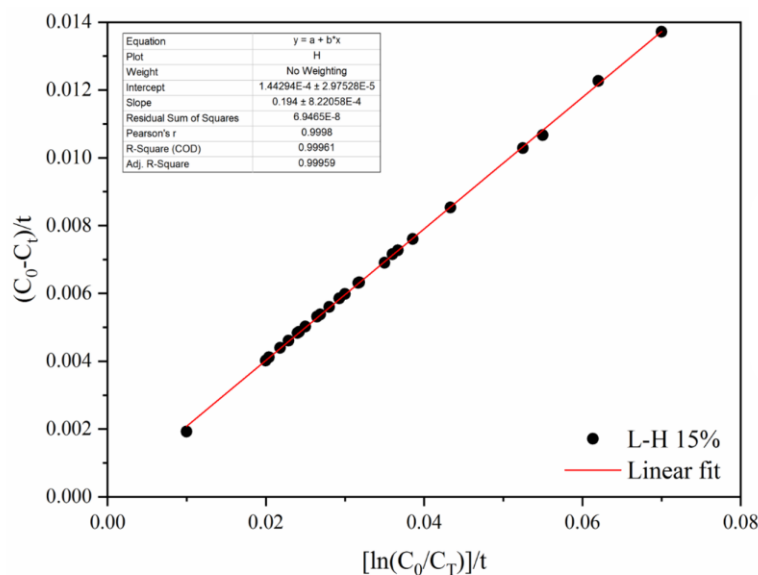
ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน
อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตรต่อนาที
ความชื้นแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อซม²
ความชื้นสัมพัทธ์ 55%
อุณหภูมิ 25-38 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0/C_t)]/t$ เมื่อบำบัดด้วย 5%TiO₂/PLA-composite film



ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน
อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตรต่อนาที
ความชื้นแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อซม²
ความชื้นสัมพัทธ์ 55%
อุณหภูมิ 25-38 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0/C_t)]/t$ เมื่อบำบัดด้วย 10%TiO₂/PLA-composite film



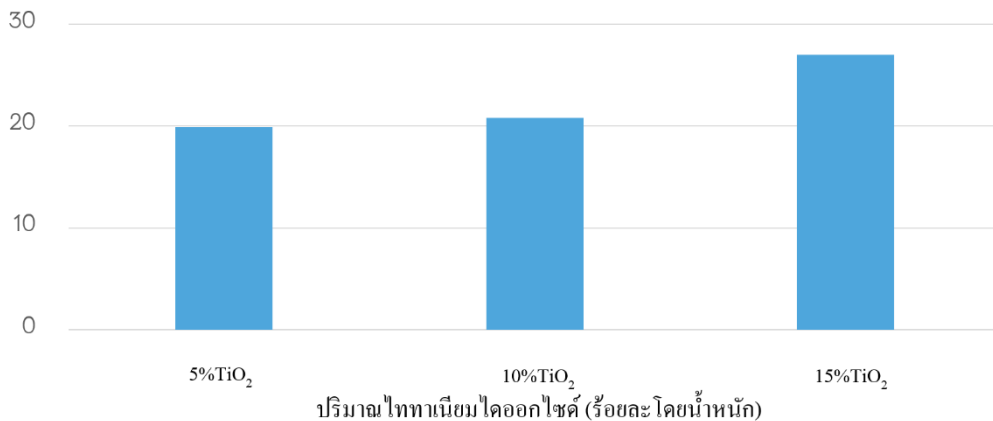
ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน
 อัตราการไหลของอากาศ 4 ลิตรต่อนาที
 ความชื้นแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อซม²
 ความชื้นสัมพัทธ์ 55%
 อุณหภูมิ 25-38 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0/C_t)]/t$ เมื่อบำบัดด้วย 15%TiO₂/PLA-composite film

ส่วนที่ 4 ศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่ใช้ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดเท่ากับร้อยละ 44, 42 และ 32 ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเบนซีน 24 ชั่วโมง คำนวณได้จากหลอดรังสียูวีที่ 18 วัตต์ และเครื่องฟอกอากาศ 35 วัตต์ เปิดนาน 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1,272 วัตต์ โดยความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ดังภาพที่ 47 พบว่าที่ 5%TiO₂/PLA-composite film มีประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจดีที่สุด

ความถี่ค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ
(วัดต่อประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน)



ภาพที่ 47 ความถี่ค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจของTiO₂/PLA-composite film

จะพบว่า TiO₂/PLA composite film ที่ไททานเนียมไดออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพความถี่ค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ ดังนั้น TiO₂/PLA composite film ที่ไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้บำบัดเบนซีน

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงชนิด TiO_2/PLA -composite film ใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ตรีงบนพลาสติกชีวภาพซึ่งทำจากกรดโพลีแลคติกด้วยเทคนิคเป่าขึ้นรูป (blown film technique) ทำการศึกษาปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนเมื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอยู่ที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 และ 10 แต่งานวิจัยดังกล่าวใช้พลาสติกหลายชนิดและยังมีส่วนผสมของพลาสติกที่มาจากปิโตรเคมีหรือมีส่วนประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาขยะตามมา (Kowit et al., 2019; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019) งานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปฟิล์ม โดยไม่ใช้ maleic anhydride copolymer ซึ่งเป็น โพลีเมอร์ที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และยังลดจำนวนชนิดของวัตถุดิบในการผลิตได้

เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าไททานเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ฟิล์มเป็นอย่างดีสอดคล้องงานวิจัยก่อนหน้านี้ (K. Suwannahong, Sanya Sirivithayapakorn, Pongsak Noophan, Wipada Sanongraj, 2014; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019) ไททานเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวดีทำให้มีพื้นที่ผิวรับแสงได้ดี ทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันได้ดี แต่พบว่ามีเกาะตัวเป็นก้อนที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ซึ่งอาจเป็นผลได้จากปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปรวมถึงความร้อนในขณะการเป่าฟิล์มทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน (Kreetachat et al., 2013; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019)

แถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap; E_g) ของตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่ใช้เครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Vis Spectrophotometer: UV-VIS) ศึกษาพบว่ามีความยาวในช่วง 3.14-3.22 อิเล็กตรอน โวลต์ เป็นช่วงที่เหมาะสมในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันไม่เกิด recombination และช่วยยืนยันว่ามีไททานเนียมไดออกไซด์แบบผลึก อนาเทสในตัวเร่งปฏิกิริยา (Haider, Jameel, & Al-Hussaini, 2019) ดังนั้นกระบวนการการตรีง

ไททานเนียมไดออกไซด์ลงบนพลาสติกโพลีแลคติกด้วยเทคนิคเป่าฟิล์ม ไม่มีผลต่อคุณสมบัติในคุณกลืนแสงของฟิล์มไททานเนียมไดออกไซด์และไททานเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส ทำให้พบว่า TiO_2/PLA -composite film มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ (K. Suwannahong, 2012) และมีค่าแถบช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้อีกด้วย (Kreetachat et al., 2013; Tharasawatpipat & Kreetachat., 2019)

จากการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันและองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรสโคปีช่วยยืนยันว่าไททานเนียมไดออกไซด์ยังคงอยู่ในแผ่นฟิล์มโดยไม่ได้เปลี่ยนโครงสร้างไป (Y. Zhang, Xu, Li, Ge, & Bian, 2018) และฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างของพลาสติกโพลีแลคติกโดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปหลังการสังเคราะห์ซึ่งผ่านความร้อนและเติมไททานเนียมไดออกไซด์ (Savioli Lopes M., 2014)

ตัวเร่งปฏิกิริยาคือแสงที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่ความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นพัทธ์ร้อยละ 55 อุณหภูมิ 28-35 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร นาน 24 ชั่วโมง สามารถบำบัดเบนซีนได้ร้อยละ 44, 42 และ 32 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยพลังงานแสงในการสลายพันธะเท่านั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนเพียงร้อยละ 9 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือแสง TiO_2/PLA -composite film ทำให้มีประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนเพิ่มสูงขึ้น

ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งของกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันแล้วพบว่า $5\%TiO_2/PLA$ -composite film มีค่าสูงที่สุด ส่วน $15\%TiO_2/PLA$ -composite film มีค่าคงที่ต่ำกว่ากระบวนการโฟโตไลซิสอาจเกิดได้จากฟิล์มมีไททานเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้บังรังสียูวี ส่วนกระบวนการโฟโตไลซิสนั้นรังสียูวีสามารถส่งพลังงานทั้งหมดไปยังเบนซีนทั่วทั้งเครื่องฟอกอากาศ

แม้ว่า TiO_2/PLA -composite film จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีน แต่จากสถานะการทดลองที่ควบคุมความเข้มแสง อุณหภูมิ ความชื้นและอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ TiO_2/PLA -composite film สามารถลดระดับเบนซีนจากความเข้มข้น 5 ส่วนในล้านส่วน เหลือเป็นความเข้มข้น 3 ส่วนในล้านส่วน ในเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งหากเป็นสถานการณ์ที่มีผู้ปฏิบัติงานอยู่ทำให้เสี่ยงต่อการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพตามมา การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายจึงต้องมีการปรับสภาวะต่าง ๆ ข้างต้นให้เหมาะสมต่อไปเพื่อป้องกันปัญหาต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน อาทิเช่น เพิ่มความเข้มแสงของรังสียูวีที่ตกกระทบบนผิว TiO_2/PLA -composite film เป็นต้น

ไททานเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีการกระจายตัวได้ดีและเกาะกลุ่มน้อยกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 15 โดยน้ำหนัก จึงมีพื้นที่ผิวที่จะเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายกับงานวิจัยอื่นด้วยค่าคงที่อัตราการปฏิกิริยาตามโมเดลของแลงเมียร์ฮินเชลวูดพบว่าในงานวิจัยนี้มีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสูงสุดที่ 0.1975 ต่อนาที ซึ่งสูงกว่างานวิจัยที่ใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ครึ่งบน โพลีเอทิลีนมีค่าคงที่เท่ากับ 0.0032 และ 0.0062 ในฟิล์มที่มีความเข้มข้นไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 และ 10 ตามลำดับ (K. Suwannahong et al., 2012)

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่คำนวณด้วยสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรืออาจจะกล่าวได้ว่าความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ไททานเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนได้ใกล้เคียงกัน

ศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซีนพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีไททานเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจสูงสุด กล่าวคือ ใช้ไฟฟ้าน้อยที่สุดแต่สามารถบำบัดเบนซีนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังใช้ไททานเนียมไดออกไซด์น้อยที่สุดในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องฟอกอากาศได้จริง

TiO₂/PLA-composite film สามารถบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอันเป็นหนึ่งในมาตรการควบคุมสิ่งคุกคามทางเคมีตามหลักของสุขศาสตร์อุตสาหกรรม โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ประหยัด และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. TiO₂/PLA-composite film ไปใช้ในสถานประกอบการ อาคารและที่พักอาศัย โดยหาความสัมพันธ์กับสุขภาพของมนุษย์
2. ศึกษาสารบอนด์ออกไซด์ สารมัธยันต์ (intermediates) ที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาอายุการใช้งานของ TiO₂/PLA-composite film

บรรณานุกรม

- Abbas, M. (2020). Experimental investigation of activated carbon prepared from apricot stones material (ASM) adsorbent for removal of malachite green (MG) from aqueous solution. *Adsorption Science & Technology*, 0263617420904476. doi:10.1177/0263617420904476
- Abbatt, J. P. D., & Wang, C. (2020). The atmospheric chemistry of indoor environments. *Environmental Science: Processes & Impacts*. doi:10.1039/C9EM00386J
- Acharya, R., & Parida, K. (2020). A review on TiO₂/g-C₃N₄ visible-light- responsive photocatalysts for sustainable energy generation and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103896. doi:10.1016/j.jece.2020.103896
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2014, October 21). Medical Management Guidelines for Benzene. Retrieved from <https://www.atsdr.cdc.gov/mmg/mmg.asp?id=35&tid=14>
- American Lung Association. (2018). Volatile Organic Compounds. *Indoor Air Pollutants and Health*. Retrieved from www.lung.org/our-initiatives/healthy-air/indoor/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds.html
- Andaloro, A., Mazzucchelli, E., Lucchini, A., & Pedefferri, M. P. (2016). Photocatalytic self-cleaning coatings for building facade maintenance. Performance analysis through a case-study application. *Journal of Facade Design and Engineering*, 4, 1-15. doi:10.3233/FDE-160054
- Andersson, E., Knutsson, A., Hagberg, S., Nilsson, T., Karlsson, B., Alfredsson, L., & Toren, K. (2006). Incidence of asthma among workers exposed to sulphur dioxide and other irritant gases. *Eur Respir J*, 27(4), 720-725. doi:10.1183/09031936.06.00034305
- Armstrong, B., Hutchinson, E., Unwin, J., & Fletcher, T. (2004). Lung cancer risk after exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review and meta-analysis. *Environmental health perspectives*, 112(9), 970-978. doi:10.1289/ehp.6895
- ASHRAE. (2010). *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Assadi, A. A., Palau, J., Bouzaza, A., & Wolbert, D. (2013). Modeling of a continuous photocatalytic reactor for isovaleraldehyde oxidation: Effect of different operating

- parameters and chemical degradation pathway. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(7), 1307-1316. doi:10.1016/j.cherd.2013.02.020
- Ateia, M., Alalm, M. G., Awfa, D., Johnson, M. S., & Yoshimura, C. (2020). Modeling the degradation and disinfection of water pollutants by photocatalysts and composites: A critical review. *Science of The Total Environment*, 698, 134197. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134197
- Avis, S., & Hutton, C. (1993). Acute Benzene Poisoning: A Report of Three Fatalities. *Journal of Forensic Sciences*, 38(3), 599-602. doi:10.1520/JFS13444J
- Barbera, N., Bulla, G., & Romano, G. (1998). A fatal case of benzene poisoning. *Journal of Forensic Sciences*, 43(6), 1250-1251.
- Berardi, S., Bemporad, E., Beccaloni, E., Scaini, F., Gregio, M., & Gianmaria, F. (2013). Contaminated sites: assessment of volatile organic compounds (VOCs) in outdoor and indoor air. *Environmental engineering and management journal*, 12, 261-264.
- Berardo, E. (2015). *Modelling the Excited State Properties of TiO2 Nanoparticles*.
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Bacchus, H., Bernstein, I. L., Fritz, P., Horner, E., . . . Tarlo, S. M. (2008). The health effects of nonindustrial indoor air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121(3), 585-591. doi:10.1016/j.jaci.2007.10.045
- Bertke, S. J., Yiin, J. H., & Daniels, R. D. (2018). Cancer mortality update with an exposure response analysis among styrene-exposed workers in the reinforced plastics boatbuilding industry. *American Journal of Industrial Medicine*, 61(7), 566-571. doi:10.1002/ajim.22853
- Bhusnure, D. O. (2018). Chemical hazards and safety management in pharmaceutical industry. *Journal of Pharmacy Research*, 12.
- Bosetti, C., Boffetta, P., & La Vecchia, C. (2007). Occupational exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons, and respiratory and urinary tract cancers: a quantitative review to 2005. *Ann Oncol*, 18(3), 431-446. doi:10.1093/annonc/mdl172
- Bouchaala. (2012). VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS REMOVAL METHODS: A REVIEW. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 8, 220-229. doi:10.3844/ajbbbsp.2012.220.229
- Bojoo, Y., Sun, H., Liu, J., Pareek, V., & Wang, S. (2016). A Review on Photocatalysis for Air Treatment: From Catalyst Development to Reactor Design. *Chemical Engineering Journal*.

doi:10.1016/j.cej.2016.06.090

- Brantley, H. L., Thoma, E. D., & Eisele, A. P. (2015). Assessment of volatile organic compound and hazardous air pollutant emissions from oil and natural gas well pads using mobile remote and on-site direct measurements. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(9), 1072-1082. doi:10.1080/10962247.2015.1056888
- Brauer, M., & Vedal, S. (1999). Health effects of photochemical smog: seasonal and acute lung function change in outdoor workers. *Journal of Environmental Medicine*, 1(3), 163-170. doi:10.1002/1099-1301(199907/09)1:3<163::AID-JEM27>3.0.CO;2-R
- Caillol, S. (2011). Fighting global warming: The potential of photocatalysis against CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, tropospheric O₃, BC and other major contributors to climate change. *Journal of Photochemistry and Photobiology C-photochemistry Reviews - J PHOTOCHEM PHOTOBIOLOG C-PHOTO*, 12, 1-19. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2011.05.002
- Chang, H., & Seo, M. (2014). Photocatalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde and Benzene using TiO₂ Particulate Films Prepared by the Flame Aerosol Reactor. *Environmental Engineering Research*, 19(3), 215-221. doi:10.4491/eer.2014.022
- Changwichan, K., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2018). Eco-Efficiency Assessment of Bioplastics Production Systems and End-of-Life Options. *Sustainability*, 10(4), 952.
- Chen, Q., Wang, H., Wang, C., Guan, R., Duan, R., Fang, Y., & Hu, X. (2020). Activation of molecular oxygen in selectively photocatalytic organic conversion upon defective TiO₂ nanosheets with boosted separation of charge carriers. *Applied Catalysis B: Environmental*, 262, 118258. doi:10.1016/j.apcatb.2019.118258
- Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959. doi:10.1021/cr0500535
- Chen, Y., & Dionysiou, D. (2006). TiO₂ photocatalytic films on stainless steel: The role of Degussa P-25 in modified sol-gel methods. *Applied Catalysis B: Environmental*, 62, 255-264. doi:10.1016/j.apcatb.2005.07.017
- Cheng, S., Zhang, J., Wang, Y., Zhang, D., Teng, G., Chang-Chien, G.-P., . . . Yan, P. (2019). Global Research Trends in Health Effects of Volatile Organic Compounds during the Last 16 Years: A Bibliometric Analysis. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(8), 1834-1843.

doi:10.4209/aaqr.2019.06.0327

- Cometto-Muñiz, J., Cain, W., & Abraham, M. (1998). Nasal pungency and odor of homologous aldehydes and carboxylic acids. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 118, 180-188. doi:10.1007/s002210050270
- Cui, H. (2016). Source profile of volatile organic compounds(VOCs) of a petrochemical industry in the Yangtze River Delta,China. 54, 121-126. doi:10.3303/CET1654021
- Curran, K., & StrliČ, M. (2015). Polymers and volatiles: Using VOC analysis for the conservation of plastic and rubber objects. *Studies in Conservation*, 60(1), 1-14. doi:10.1179/2047058413Y.0000000125
- D'Andrea, M. A., & Reddy, G. K. (2018). Health Risks Associated With Benzene Exposure in Children: A Systematic Review. *Global pediatric health*, 5, 2333794X18789275-12333794X18789275. doi:10.1177/2333794X18789275
- da Costa Filho, B. M., Silva, G. V., Boaventura, R. A. R., Dias, M. M., Lopes, J. C. B., & Vilar, V. J. P. (2019). Ozonation and ozone-enhanced photocatalysis for VOC removal from air streams: Process optimization, synergy and mechanism assessment. *Science of The Total Environment*, 687, 1357-1368. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.365
- Dai, C., Tian, X., Nie, Y., Lin, H.-M., Yang, C., Han, B., & Wang, Y. (2018). Surface Facet of CuFeO₂ Nanocatalyst: A Key Parameter for H₂O₂ Activation in Fenton-Like Reaction and Organic Pollutant Degradation. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6518-6525. doi:10.1021/acs.est.8b01448
- De Filpo, G., Pantuso, E., Armentano, K., Formoso, P., Di Profio, G., Poerio, T., . . . Nicoletta, F. P. (2018). Chemical Vapor Deposition of Photocatalyst Nanoparticles on PVDF Membranes for Advanced Oxidation Processes. *Membranes*, 8(3). doi:10.3390/membranes8030035
- Delzell, E., Sathiakumar, N., Graff, J., Macaluso, M., Maldonado, G., & Matthews, R. (2006). An updated study of mortality among North American synthetic rubber industry workers. *Res Rep Health Eff Inst*(132), 1-63; discussion 65-74.
- Delzell, E., Sathiakumar, N., Hovinga, M., Macaluso, M., Julian, J., Larson, R., . . . Muir, D. C. F. (1996). A follow-up study of synthetic rubber workers. *Toxicology*, 113(1), 182-189. doi:10.1016/0300-483X(96)03443-9
- Djellabi, R., Ali, J., Zhao, X., Saber, A. N., & Yang, B. (2020). CuO NPs incorporated into electron-

- rich TCTA@PVP photoactive polymer for the photocatalytic oxidation of dyes and bacteria inactivation. *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101238.
doi:10.1016/j.jwpe.2020.101238
- Doble, M., & Kumar, A. (2005). Biotreatment of industrial effluents. In *Biotreatment of Industrial Effluents* (pp. 302). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Engl, S., & Reiser, O. (2019). Making Copper Photocatalysis Even More Robust and Economic: Photoredox Catalysis with [CuII(dmp)2Cl]Cl. *European Journal of Organic Chemistry*, n/a(n/a). doi:10.1002/ejoc.201900839
- Environmental Protection Agency. (2017). Indoor Air Quality (IAQ). *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. Retrieved from www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds
- Ezratty, V., Guillosoy, G., Neukirch, C., Dehoux, M., Koscielny, S., Bonay, M., . . . Aubier, M. (2014). Repeated Nitrogen Dioxide Exposures and Eosinophilic Airway Inflammation in Asthmatics: A Randomized Crossover Study. *Environmental health perspectives*, 122(8), 850-855. doi:10.1289/ehp.1307240
- Farcas, M. T., Stefaniak, A. B., Knepp, A. K., Bowers, L., Mandler, W. K., Kashon, M., . . . Qian, Y. (2019). Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC) filaments three-dimensional (3-D) printer emissions-induced cell toxicity. *Toxicology Letters*, 317, 1-12. doi:10.1016/j.toxlet.2019.09.013
- Fernandes, A., Gałgoł, M., Makoś, P., Khan, J. A., & Boczkaj, G. (2019). Integrated photocatalytic advanced oxidation system (TiO₂/UV/O₃/H₂O₂) for degradation of volatile organic compounds. *Separation and Purification Technology*, 224, 1-14. doi:10.1016/j.seppur.2019.05.012
- Fischer, K., Gawel, A., Rosen, D., Krause, M., Abdul Latif, A., Griebel, J., . . . Schulze, A. (2017). Low-Temperature Synthesis of Anatase/Rutile/Brookite TiO₂ Nanoparticles on a Polymer Membrane for Photocatalysis. *Catalysts*, 7(7). doi:10.3390/catal7070209
- Frumkin, H., & Samet, J. M. (2001). Radon. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 51(6), 337-344. doi:10.3322/canjclin.51.6.337
- Ghanizadeh, F., & Godini, H. (2018). A review of the chemical and biological pollutants in indoor air in hospitals and assessing their effects on the health of patients, staff and visitors.

Reviews on Environmental Health, 33. doi:10.1515/reveh-2018-0011

- Gholami, M., Nassehinia, H. R., Jonidi-Jafari, A., Nasser, S., & Esrafil, A. (2014). Comparison of Benzene & Toluene removal from synthetic polluted air with use of Nano photocatalytic TiO₂/ZNO process. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 45. doi:10.1186/2052-336X-12-45
- Gironi, F., & Piemonte, V. (2011). Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30(3), 459-468. doi:10.1002/ep.10490
- Gostner, J. M., Zeisler, J., Alam, M. T., Gruber, P., Fuchs, D., Becker, K., . . . Überall, F. (2016). Cellular reactions to long-term volatile organic compound (VOC) exposures. *Scientific Reports*, 6, 37842-37842. doi:10.1038/srep37842
- Gross, S. A., & Paustenbach, D. J. (2018). Shanghai Health Study (2001–2009): What was learned about benzene health effects? *Critical Reviews in Toxicology*, 48(3), 217-251. doi:10.1080/10408444.2017.1401581
- Haghighatmamaghani, A., Haghighat, F., & Lee, C.-S. (2019). Performance of various commercial TiO₂ in photocatalytic degradation of a mixture of indoor air pollutants: Effect of photocatalyst and operating parameters. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(5), 600-614. doi:10.1080/23744731.2018.1556051
- Haider, A. J., Jameel, Z. N., & Al-Hussaini, I. H. M. (2019). Review on: Titanium Dioxide Applications. *Energy Procedia*, 157, 17-29. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.159
- Hamad, K., Kaseem, M., Ayyoob, M., Joo, J., & Deri, F. (2018). Polylactic acid blends: The future of green, light and tough. *Progress in Polymer Science*, 85, 7-11. doi:10.1016/j.progpolymsci.2018.07.001
- Hänel, A., Moreń, P., Zaleska-Medynska, A., & Jan, H. (2010). Photocatalytic activity Of TiO₂ immobilized on glass beads. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 45, 49-56.
- Hashim, F. S., Alkaim, A. F., Mahdi, S. M., & Omran Alkhayatt, A. H. (2019). Photocatalytic degradation of GRL dye from aqueous solutions in the presence of ZnO/Fe₂O₃ nanocomposites. *Composites Communications*, 16, 111-116. doi:10.1016/j.coco.2019.09.008
- He, C., Cheng, J., Zhang, X., Douthwaite, M., Pattison, S., & Hao, Z. (2019). Recent Advances in

the Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds: A Review Based on Pollutant Sorts and Sources. *Chemical Reviews*, 119(7), 4471-4568.

doi:10.1021/acs.chemrev.8b00408

Hesam, M., Shakerkhatibi, M., Samadi, M. T., Poorolajal, J., Rahmani, A., & Rafieemehr, H. (2019). Long-term exposure to outdoor VOCs and lung function in urban adults: a cross-sectional study in Tabriz an industrialized city in the northwest of Iran. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1-17.

doi:10.1080/10807039.2019.1587289

Hodgson, A. T., Destailats, H., Sullivan, D. P., & Fisk, W. J. (2007). Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air cleaning applications. *Indoor Air*, 17(4), 305-316.

doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00479.x

Homwutthiwong, K., Ongwandee, M. (2017). Investigation of Formaldehyde in Gross Anatomy Laboratory: Area-Based and Exposure Levels, Ventilation, Health Risk and Clinical Symptoms. *Applied Environmental Research*, 39(3), 77-90. doi:10.35762/AER.2017.39.3.8

Huang, J., Huang, G., An, C., Xin, X., Chen, X., Zhao, Y., . . . Xiong, W. (2020). Exploring the use of ceramic disk filter coated with Ag/ZnO nanocomposites as an innovative approach for removing *Escherichia coli* from household drinking water. *Chemosphere*, 245, 125545.

doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125545

Huang, Y., Ho, S. S., Lu, Y., Niu, R., Xu, L., Cao, J., & Lee, S. (2016). Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect.

Molecules, 21(1), 56. doi:10.3390/molecules21010056

Ielpo, P., Mangia, C., Marra, G. P., Comite, V., Rizza, U., Uricchio, V. F., & Fermo, P. (2019).

Outdoor spatial distribution and indoor levels of NO₂ and SO₂ in a high environmental risk site of the South Italy. *Science of The Total Environment*, 648, 787-797.

doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.159

International Agency for Research on Cancer. (2018). *Benzene*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.

Jindal, S., & Sharma, P. (2020). Optical and magnetic properties of Dy³⁺ doped CdS dilute magnetic semiconductor nanoparticles. *Materials Science in Semiconductor Processing*,

108. doi:10.1016/j.mssp.2019.104884

- Joshi, S. M. (2008). The sick building syndrome. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 12(2), 61-64. doi:10.4103/0019-5278.43262
- Kampeerawipakorn, O., Navasumrit, P., Settachan, D., Promvijit, J., Hunsonti, P., Parnlob, V., . . . Ruchirawat, M. (2017). Health risk evaluation in a population exposed to chemical releases from a petrochemical complex in Thailand. *Environmental Research*, 152, 207-213. doi:10.1016/j.envres.2016.10.004
- Khezrianjoo, S., & Revanasiddappa, H. D. (2012). Langmuir-Hinshelwood kinetic expression for the photocatalytic degradation of metanil yellow aqueous solutions by ZnO catalyst. *Chemical Sciences Journal*.
- Kim, J., Kim, H., Lim, D., Lee, Y.-K., & Kim, J. H. (2016). Effects of Indoor Air Pollutants on Atopic Dermatitis. *Int J Environ Res Public Health*, 13(12), 1220. doi:10.3390/ijerph13121220
- Kowit, S., Rotruedee, C., Torpong, K., Mayurin, L., & Surachai, W. (2019). application of photocatalytic oxidation preces using synthesized tTiO₂-anatase in PLA/PBAT/PBS composite film for VOCs degradation.
- Kreetachat, T. (2015). Removal of VOCs by photocatalytic oxidation using nano-TiO₂/PLA biocomposite. *Journal of Environmental Biology*, 36, 617-624.
- Kreetachat, T., Kruenate, J., & Suwannahong, K. (2013). Preparation of TiO₂/Bio-Composite Film by Sol-Gel Method in VOCs Photocatalytic Degradation Process. *Applied Mechanics and Materials*, 390, 552-556. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.390.552
- Lafi, R., Montasser, I., & Hafiane, A. (2018). Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration. *Adsorption Science & Technology*, 37(1-2), 160-181. doi:10.1177/0263617418819227
- Lamplugh, A., Harries, M., Xiang, F., Trinh, J., Hecobian, A., & Montoya, L. D. (2019). Occupational exposure to volatile organic compounds and health risks in Colorado nail salons. *Environmental Pollution*, 249, 518-526. doi:10.1016/j.envpol.2019.03.086
- Lantz, P. M., Mendez, D., & Philbert, M. A. (2013). Radon, smoking, and lung cancer: the need to refocus radon control policy. *American journal of public health*, 103(3), 443-447. doi:10.2105/AJPH.2012.300926

- Lee, K., Yoon, H., Ahn, C., Park, J., & Jeon, S. (2019). Strategies to improve the photocatalytic activity of TiO₂: 3D nanostructuring and heterostructuring with graphitic carbon nanomaterials. *Nanoscale*, *11*(15), 7025-7040. doi:10.1039/C9NR01260E
- Lejeune, N. R. C. U. C. o. C. D. W. a. C. (2009). *Systemic Exposures to Volatile Organic Compounds and Factors Influencing Susceptibility to Their Effects*: National Academies Press.
- Li, J., Yin, Y., Liu, E., Ma, Y., Wan, J., Fan, J., & Hu, X. (2017). In situ growing Bi₂MoO₆ on g-C₃N₄ nanosheets with enhanced photocatalytic hydrogen evolution and disinfection of bacteria under visible light irradiation. *J Hazard Mater*, *321*, 183-192. doi:10.1016/j.jhazmat.2016.09.008
- Li, J., Zhang, X., Raziq, F., Wang, J., Liu, C., Liu, Y., . . . Jing, L. (2017). Improved photocatalytic activities of g-C₃N₄ nanosheets by effectively trapping holes with halogen-induced surface polarization and 2,4-dichlorophenol decomposition mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental*, *218*, 60-67. doi:10.1016/j.apcatb.2017.06.038
- Liang, Y., Sun, S., Deng, T., Ding, H., Chen, W., & Chen, Y. (2018). The Preparation of TiO₂ Film by the Sol-Gel Method and Evaluation of Its Self-Cleaning Property. *Materials (Basel, Switzerland)*, *11*(3), 450. doi:10.3390/ma11030450
- Lin, Y.-H., Weng, C.-H., Tzeng, J.-H., & Lin, Y.-T. (2016). *Adsorption and Photocatalytic Kinetics of Visible-Light Response N-Doped TiO₂ Nanocatalyst for Indoor Acetaldehyde Removal under Dark and Light Conditions* (Vol. 2016).
- Liu, C. Y., Tseng, C. H., Wang, H. C., Dai, C. F., & Shih, Y. H. (2019). The Study of an Ultraviolet Radiation Technique for Removal of the Indoor Air Volatile Organic Compounds and Bioaerosol. *Int J Environ Res Public Health*, *16*(14). doi:10.3390/ijerph16142557
- Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., . . . Straif, K. (2017). Carcinogenicity of benzene. *The Lancet Oncology*, *18*(12), 1574-1575. doi:10.1016/S1470-2045(17)30832-X
- Luksamijarulkul, P., Suknongbung, S., Vatanasomboon, P., & Sujirarut, D. (2017). Health status, Environmental living conditions and microbial indoor air quality among migrant worker household in Thailand *Southeast Asian J Trop Med Public Health*, *48*(2), 396-406.
- Luo, K., Li, R., Li, W., Wang, Z., Ma, X., Zhang, R., . . . Xu, Q. (2016). Acute Effects of Nitrogen

- Dioxide on Cardiovascular Mortality in Beijing: An Exploration of Spatial Heterogeneity and the District-specific Predictors. *Scientific Reports*, 6, 38328. doi:10.1038/srep38328
- Martinez, J. M., & Eling, T. E. (2019). Activation of TRPA1 by volatile organic chemicals leading to sensory irritation. *Altex*, 36(4), 572-582. doi:10.14573/altex.1811012
- Marty, M., Spurlock, F., & Barry, T. (2010). Chapter 19 - Volatile Organic Compounds from Pesticide Application and Contribution to Tropospheric Ozone. In R. Krieger (Ed.), *Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology (Third Edition)* (pp. 571-585). New York: Academic Press.
- Mastrangelo, G., Fadda, E., & Marzia, V. (1996). Polycyclic aromatic hydrocarbons and cancer in man. *Environmental health perspectives*, 104(11), 1166-1170. doi:10.1289/ehp.961041166
- McHale, C. M., Zhang, L., & Smith, M. T. (2012). Current understanding of the mechanism of benzene-induced leukemia in humans: implications for risk assessment. *Carcinogenesis*, 33(2), 240-252. doi:10.1093/carcin/bgr297
- Méausoone, C., El Khawaja, R., Tremolet, G., Siffert, S., Cousin, R., Cazier, F., . . . Landkocz, Y. (2019). In vitro toxicological evaluation of emissions from catalytic oxidation removal of industrial VOCs by air/liquid interface (ALI) exposure system in repeated mode. *Toxicology in Vitro*, 58, 110-117. doi:10.1016/j.tiv.2019.03.030
- Mei, H., Li, C., Liu, H., & Ji, S. (2006). Simulation of Catalytic Combustion of Methane in a Monolith Honeycomb Reactor1 1Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.20136010 and No.20376005). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 14(1), 56-64. doi:10.1016/S1004-9541(06)60038-4
- Meng, Y., & He, J. (2015). The Viability of Photocatalysis for Air Purification. *Molecules*, 20, 1319-1356. doi:10.3390/molecules20011319
- Mishra, G., & Mukhopadhyay, M. (2019). TiO₂ decorated functionalized halloysite nanotubes (TiO₂@HNTs) and photocatalytic PVC membranes synthesis, characterization and its application in water treatment. *Scientific Reports*, 9(1), 4345. doi:10.1038/s41598-019-40775-4
- Mitha, N., Levy, J., Annesi-Maesano, I., Lafortune, J., Magnier, A. M., & Ibanez, G. (2013). [Indoor air quality and adult asthma]. *Rev Mal Respir*, 30(5), 374-413. doi:10.1016/j.rmr.2013.01.008

- Mo, J., Zhang, Y., Xu, Q., Lamson, J., & Zhao, R. (2009). Photocatalytic Purification of Volatile Organic Compounds in Indoor Air: A Literature Review. *Atmospheric Environment*, *43*, 2229-2246. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.034
- Montero-Montoya, R., López-Vargas, R., & Arellano-Aguilar, O. (2018). Volatile Organic Compounds in Air: Sources, Distribution, Exposure and Associated Illnesses in Children. *Annals of global health*, *84*(2), 225-238. doi:10.29024/aogh.910
- Mordukhovich, I., Beyea, J., Herring, A. H., Hatch, M., Stellman, S. D., Teitelbaum, S. L., . . . Gammon, M. D. (2016). Vehicular Traffic-Related Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Exposure and Breast Cancer Incidence: The Long Island Breast Cancer Study Project (LIBCSP). *Environmental health perspectives*, *124*(1), 30-38. doi:10.1289/ehp.1307736
- Muangmora, R., Kemacheevakul, P., & Chuangchote, S. (2019). Removal of gaseous benzene by photocatalytic oxidation process using TiO₂ film coated on glass sheets under UVC irradiation. *Thai Environmental Engineering Journal*, *33*, 9-16.
- Mumby, S., Chung, K. F., & Adcock, I. M. (2019). Transcriptional Effects of Ozone and Impact on Airway Inflammation. *Frontiers in Immunology*, *10*(1610). doi:10.3389/fimmu.2019.01610
- Nakata, K., & Fujishima, A. (2012). TiO₂ photocatalysis: design and applications. *J Photochem Photobiol C C13:169-189. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *13*, 169–189. doi:10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001
- Nam, Y., Lim, J. H., Ko, K. C., & Lee, J. Y. (2019). Photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: a theoretical aspect. *Journal of Materials Chemistry A*, *7*(23), 13833-13859. doi:10.1039/C9TA03385H
- National Center for Biotechnology Information. (2004). Nickel (II) ion. Retrieved from https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Nickel-_II_-ion
- National Center for Biotechnology Information. (2019). Cadmium sulfide. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cadmium-sulfide>
- NPI Volatile organic compound definition and information, (2009).
- National Toxicology Program (NTP). (2005). Report on Carcinogens, eleventh ed *Public Health Service, US Department of Health and Human Services, Washington*.
- Nawi, M. A., & Zain, S. M. (2012). Enhancing the surface properties of the immobilized Degussa P-25 TiO₂ for the efficient photocatalytic removal of methylene blue from aqueous solution.

- Applied Surface Science*, 258(16), 6148-6157. doi:10.1016/j.apsusc.2012.03.024
- Nimibofa, A., Ebelegi, A., & Donbebe, W. (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Hindawi Journal of Chemistry*, Volume 2017, 11 pages. doi:10.1155/2017/3039817
- Norback, D., Michel, I., & Widstrom, J. (1990). Indoor air quality and personal factors related to the sick building syndrome. *Scand J Work Environ Health*, 16(2), 121-128. doi:10.5271/sjweh.1808
- Nuengruthai Panichavalit., P. P. (2009). Eco-efficiency for Sustainable Development. Retrieved from http://www2.mtec.or.th/website/article_list.aspx?id=116&cate=28
- Ohtani, B., Adzuma, S., Nishimoto, S.-i., & Kagiya, T. (1992). Photocatalytic degradation of polyethylene film by incorporated extra-fine particles of titanium dioxide. *Polymer Degradation and Stability*, 35(1), 53-60. doi:10.1016/0141-3910(92)90135-R
- Ollis, D. F. (2018). Kinetics of Photocatalyzed Reactions: Five Lessons Learned. *Frontiers in chemistry*, 6, 378-378. doi:10.3389/fchem.2018.00378
- Pahasup-anan, T., Suwannahong, K., Dechapanya, W., & Rangkupan, R. (2017). Fabrication and photocatalytic activity of TiO₂ composite membranes via simultaneous electrospinning and electrospraying process. *Journal of Environmental Sciences*, 72. doi:10.1016/j.jes.2017.11.025
- Pant, B., Park, M., & Park, S.-J. (2019). Recent Advances in TiO₂ Films Prepared by Sol-Gel Methods for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Antibacterial Activities. *Coatings*, 9(10), 613.
- Park, D., Choi, S., Ha, K., Jung, H., Yoon, C., Koh, D.-H., . . . Yoo, K. (2015). Estimating Benzene Exposure Level over Time and by Industry Type through a Review of Literature on Korea. *Safety and Health at Work*, 6(3), 174-183. doi:10.1016/j.shaw.2015.07.007
- Paschke, A., Schaible, U. E., & Hein, W. (2019). Legionella transmission through cooling towers: towards better control and research of a neglected pathogen. *The Lancet Respiratory Medicine*, 7(5), 378-380. doi:10.1016/S2213-2600(19)30041-4
- Patil, K., Jeong, S., Lim, H., Byun, H.-S., & Han, S. (2019). Removal of volatile organic compounds from air using activated carbon impregnated cellulose acetate electrospun mats. *Environmental Engineering Research*, 24(4), 600-607. doi:10.4491/eer.2018.336

- Pavasupree, S., Dubas, S. T., & Rangkupan, R. (2015). Surface modification of polypropylene non-woven fibers with TiO₂ nanoparticles via layer-by-layer self assembly method: Preparation and photocatalytic activity. *J Environ Sci (China)*, 37, 59-66. doi:10.1016/j.jes.2015.04.020
- Pawar, M., Sendodular, T., & Gouma, P. (2018). *A Brief Overview of TiO₂ Photocatalyst for Organic Dye Remediation: Case Study of Reaction Mechanisms Involved in Ce-TiO₂ Photocatalysts System* (Vol. 2018).
- Pérez-Herrera, N., Díaz de León-Martínez, L., Flores-Ramírez, R., Barbier, O., Ortega-Romero, M., May-Euán, F., . . . Pérez-Vázquez, F. J. (2019). Evaluation of Benzene Exposure and Early Biomarkers of Kidney Damage in Children Exposed to Solvents Due to Precarious Work in Ticul, Yucatán, México. *Annals of global health*, 85(1), 94. doi:10.5334/aogh.2482
- Phung, V. L. H., Ueda, K., Kasaoka, S., Seposo, X., Tasmin, S., Yonemochi, S., . . . Nitta, H. (2018). Acute Effects of Ambient PM_{2.5} on All-Cause and Cause-Specific Emergency Ambulance Dispatches in Japan. *Int J Environ Res Public Health*, 15(2). doi:10.3390/ijerph15020307
- Quirce, S., & Barranco, P. (2010). Cleaning agents and asthma. *J Investig Allergol Clin Immunol*, 20(7), 542-550; quiz 542p following 550.
- Rachel, A., Subrahmanyam, M., & Boule, P. (2002). Comparison of photocatalytic efficiencies of TiO₂ in suspended and immobilised form for the photocatalytic degradation of nitrobenzenesulfonic acids. *Applied Catalysis B: Environmental*, 37(4), 301-308. doi:10.1016/S0926-3373(02)00007-3
- Regmi, C., Joshi, B., Ray, S. K., Gyawali, G., & Pandey, R. P. (2018). Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Frontiers in chemistry*, 6, 33-33. doi:10.3389/fchem.2018.00033
- Regmi, C., Kshetri, Y. K., Kim, T.-H., Pandey, R. P., & Lee, S. W. (2017). Visible-light-induced Fe-doped BiVO₄ photocatalyst for contaminated water treatment. *Molecular Catalysis*, 432, 220-231. doi:10.1016/j.mcat.2017.02.004
- Ren, C.-J., Wang, G.-P., Chen, Y.-C., & Chen, Y.-Q. (2014). Degradation of benzene on Zr-doped TiO₂ photocatalysts with a bimodal pore size distribution. *Rare Metals*, 33(6), 714-722. doi:10.1007/s12598-014-0326-z
- Rich, D. Q., Samet, J. M., & Utell, M. J. (2015). Indoor and Outdoor Air Pollution. In M. A. Grippi,

- J. A. Elias, J. A. Fishman, R. M. Kotloff, A. I. Pack, R. M. Senior, & M. D. Siegel (Eds.), *Fishman's Pulmonary Diseases and Disorders, 5e*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Saeedabadi, H., & Nikpey, A. (2018). Respiratory exposure with acrylonitrile butadiene styrene particle in appliance company workers. *The Journal of Qazvin University of Medical Sciences*, 22(1), 31-41. doi:10.29252/qums.22.1.41
- Salem, E., El-Garawani, I., Allam, H., El-Aal, B. A., & Hegazy, M. (2018). Genotoxic effects of occupational exposure to benzene in gasoline station workers. *Industrial health*, 56(2), 132-140. doi:10.2486/indhealth.2017-0126
- Sanchez, M., Karnae, S., & John, K. (2008). Source characterization of volatile organic compounds affecting the air quality in a coastal urban area of South Texas. *Int J Environ Res Public Health*, 5(3), 130-138. doi:10.3390/ijerph5030130
- Sansom, G. T., Kirsch, K. R., Stone, K. W., McDonald, T. J., & Horney, J. A. (2018). Domestic Exposures to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Houston, Texas, Environmental Justice Neighborhood. *Environmental justice (Print)*, 11(5), 183-191. doi:10.1089/env.2018.0004
- Santiago, F., Lima, S., Pinheiro, T., Silvestre, R. T., Otero, U. B., Tabalipa, M. M., . . . Alves, G. (2017). Benzene poisoning, clinical and blood abnormalities in two Brazilian female gas station attendants: two case reports. *BMC research notes*, 10(1), 52-52. doi:10.1186/s13104-016-2369-8
- Sastri, V. R. (2014). 6 - Commodity Thermoplastics: Polyvinyl Chloride, Polyolefins, and Polystyrene. In V. R. Sastri (Ed.), *Plastics in Medical Devices (Second Edition)* (pp. 73-120). Oxford: William Andrew Publishing.
- Sathiakumar, N., Brill, I., & Delzell, E. (2009). 1,3-butadiene, styrene and lung cancer among synthetic rubber industry workers. *J Occup Environ Med*, 51(11), 1326-1332. doi:10.1097/JOM.0b013e3181c3c663
- Sathiakumar, N., Tipre, M., Leader, M., Brill, I., & Delzell, E. (2019). Mortality Among Men and Women in the North American Synthetic Rubber Industry, 1943 to 2009. *J Occup Environ Med*, 61(11), 887-897. doi:10.1097/jom.0000000000001688
- Savioli Lopes M., J. A., Maciel Filho R.,. (2014). Synthesis and Characterizations of Poly (Lactic

- Acid) by Ring-Opening Polymerization for Biomedical Applications. *Chemical Engineering Transactions*, 38, 331-336.
- Schell, L. M., Burnitz, K. K., & Lathrop, P. W. (2010). Pollution and human biology. *Annals of Human Biology*, 37(3), 347-366. doi:10.3109/03014461003705511
- Schulz, H., & Baranska, M. (2009). Chapter 12 - Fruits and Vegetables. In D.-W. Sun (Ed.), *Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control* (pp. 321-353). San Diego: Academic Press.
- Seyed Younes, H., Mansour Rezazadeh, A., Raana Taiefeh, R., & Elahe, T. (2015). Occupational Risk Assessment of Benzene in Rubber Tire Manufacturing Workers. *International Journal of Occupational Hygiene*, 6(4), 220-227.
- Sha, L.-Z., Zhao, H.-F., & Xiao, G.-N. (2013). Photocatalytic degradation of formaldehyde by silk mask paper loading nanometer titanium dioxide. *Fibers and Polymers*, 14(6), 976-981. doi:10.1007/s12221-013-0976-8
- Shah, W. K., & Li, W. (2019). A Review on Catalytic Nanomaterials for Volatile Organic Compounds VOC Removal and Their Applications for Healthy Buildings. *Nanomaterials*, 9(6). doi:10.3390/nano9060910
- Shayegan, Z., Lee, C.-S., & Haghghat, F. (2018). TiO₂ photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – A review. *Chemical Engineering Journal*, 334, 2408-2439. doi:10.1016/j.cej.2017.09.153
- Shrubsole, C., Dimitroulopoulou, S., Foxall, K., Gadeberg, B., & Doutsis, A. (2019). IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK. *Building and Environment*, 165, 106382. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106382
- Singapore Standards Council. (2016). *SINGAPORE STANDARD: Code of practice for indoor air quality for airconditioned buildings*: Singapore enterprise.
- Siwarom, S., Puranitee, P., Plitponkarpim, A., Manuyakorn, W., Sinitkul, R., & Arj-Ong Vallipakorn, S. (2017). Association of indoor air quality and preschool children's respiratory symptoms. *Asian Pac J Allergy Immunol*, 35(3), 119-126. doi:10.12932/ap0838
- Smith, M. T. (2010). Advances in understanding benzene health effects and susceptibility. *Annual review of public health*, 31, 133-148. doi:10.1146/annurev.publhealth.012809.103646
- Speight, J. G. (2017). Chapter Seven - Transformation of Inorganic Chemicals in the Environment.

- In J. G. Speight (Ed.), *Environmental Inorganic Chemistry for Engineers* (pp. 333-382): Butterworth-Heinemann.
- Sriwong, C., Wongnawa, S., & Patarapaiboolchai, O. (2012). Rubber sheet strewn with TiO₂ particles: Photocatalytic activity and recyclability. *Journal of Environmental Sciences*, 24(3), 464-472. doi:10.1016/S1001-0742(11)60794-8
- Sunun, K., Wipawee, K., Ratthapol, R., & Kowit, S. (2017). Volatile Organic Compound (VOC) Removal via Photocatalytic Oxidation Using TiO₂ Coated Nanofilms. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 15(7).
- Suwannahong, K. (2012). Photo catalytic oxidation activity of carbon supported nano TiO₂/LDPE film. *Journal of Environmental Research And Development*, 7, 1-6.
- Suwannahong, K., Kreetachat, T., & Kruenate, J. (2013). Preparation of TiO₂/Bio-composite Film by Sol-Gel Method in VOCs Photocatalytic Degradation Process. *Applied Mechanics and Materials*, 390, 552. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.390.552
- Suwannahong, K., Liengcharernsit, W., Sanongraj, W., & Kruenate, J. (2012). Application of Nano-TiO₂/LDPE composite film on photocatalytic oxidation degradation of dichloromethane. *Journal of environmental biology / Academy of Environmental Biology, India*, 33, 955-959.
- Suwannahong, K., Sanya Sirivithayapakorn, Pongsak Noophan, Wipada Sanongraj. (2014). Improvement of TiO₂/LDPE Composite Films for Photocatalytic Oxidation of Acetone. *Advanced Materials Research*, 931-932. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.931-932.235
- Swenberg, J. A., Moeller, B. C., Lu, K., Rager, J. E., Fry, R. C., & Starr, T. B. (2013). Formaldehyde carcinogenicity research: 30 years and counting for mode of action, epidemiology, and cancer risk assessment. *Toxicologic pathology*, 41(2), 181-189. doi:10.1177/0192623312466459
- Tang, G. L. (2016). Converting Volatile Organic Compounds to CO₂ and Water. *American Journal of Chemical Engineering*, 4, 62-67. doi:10.11648/j.ajche.20160402.16
- Tejasvi, R., Sharma, M., & Upadhyay, K. (2015). Passive photo-catalytic destruction of air-borne VOCs in high traffic areas using TiO₂-coated flexible PVC sheet. *Chemical Engineering Journal*, 262, 875-881. doi:10.1016/j.cej.2014.10.040
- Tharasawatpipat, C. (2015). Removal of VOCs by photocatalytic oxidation using nano-TiO₂/PLA biocomposite. *Journal of Environmental Biology*, 36, 617-624.

- Tharasawatpipat, C., & Kreetachat., T. (2019). Application of Photocatalytic Oxidation Technology in an Air Purifier for Benzene Removal by Using TiO₂/PLA Film. *Suan Sunandha Science and Technology Journal, Vol.06.No.1*, 1-5. doi:10.14456/ssstj.2019.1
- Thurston, G. D. (2017). Outdoor Air Pollution: Sources, Atmospheric Transport, and Human Health Effects. In S. R. Quah (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)* (pp. 367-377). Oxford: Academic Press.
- Tisserand, R., & Young, R. (2014). 6 - The respiratory system. In R. Tisserand & R. Young (Eds.), *Essential Oil Safety (Second Edition)* (pp. 99-110). St. Louis: Churchill Livingstone.
- Toloman, D., Pana, O., Stefan, M., Popa, A., Leostean, C., Macavei, S., . . . Barbu-Tudoran, L. (2019). Photocatalytic activity of SnO₂-TiO₂ composite nanoparticles modified with PVP. *J Colloid Interface Sci, 542*, 296-307. doi:10.1016/j.jcis.2019.02.026
- Tomatis, M., Xu, H.-H., He, J., & Zhang, X.-D. (2016). *Recent Development of Catalysts for Removal of Volatile Organic Compounds in Flue Gas by Combustion: A Review* (Vol. 2016).
- Torpy, F., Clements, N., Pollinger, M., Dengel, A., Mulvihill, I., He, C., & Irga, P. (2018). Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone (MEK). *Air Qual Atmos Health, 11*(2), 163-170. doi:10.1007/s11869-017-0518-4
- Tu-morn, M., Pairoh, N., Sutapun, W., & Trongsatitkul, T. (2019). Effects of titanium dioxide nanoparticle on enhancing degradation of polylactic acid/low density polyethylene blend films. *Materials Today: Proceedings, 17*, 2048-2061. doi:10.1016/j.matpr.2019.06.253
- Tuomi, T., & Vainiotalo, S. (2014). The guideline and target values for total volatile organic compound concentrations in industrial indoor environments in Finland. *Indoor and Built Environment, 25*(2), 424-434. doi:10.1177/1420326X14554270
- Utami, F., Rahman, D., & Sustini, E. (2019). Immobilization of TiO₂ on transparent plastic and its application in photocatalytic wastewater treatment. *Journal of Physics: Conference Series, 1171*, 012030. doi:10.1088/1742-6596/1171/1/012030
- Vaiano, V., Sacco, O., Sannino, D., & Ciambelli, P. (2015). Nanostructured N-doped TiO₂ coated on glass spheres for the photocatalytic removal of organic dyes under UV or visible light irradiation. *Applied Catalysis B: Environmental, 170-171*, 153-161. doi:10.1016/j.apcatb.2015.01.039

- Verheggen, F., Perrault, K. A., Megido, R. C., Dubois, L. M., Francis, F., Haubruge, E., . . .
Stefanuto, P.-H. (2017). The Odor of Death: An Overview of Current Knowledge on
Characterization and Applications. *BioScience*, 67(7), 600-613. doi:10.1093/biosci/bix046
- Viriyapanya, V. (2002). *Steam reforming of methane to synthetic gas on Ni_{0.03}Mg_{0.97}O solid
solution catalyst*. (Master of Science), Chulalongkorn University, Bangkok. Retrieved from
<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/25074>
- Wang, D. C., Li, Y. H., Li, D., Xia, Y. Z., & Zhang, J. P. (2010). A review on adsorption
refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems.
Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1), 344-353.
doi:10.1016/j.rser.2009.08.001
- Wang, J., & Bai, L. Y. (2015). Properties of TiO₂ Thin Film Prepared by Sol-Gel Dip Coating.
Applied Mechanics and Materials, 723, 528-531.
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.723.528
- Wang, J., Chen, R., Xiang, L., & Komarneni, S. (2018). Synthesis, properties and applications of
ZnO nanomaterials with oxygen vacancies: A review. *Ceramics International*, 44(7), 7357-
7377. doi:10.1016/j.ceramint.2018.02.013
- Wang, Q., He, H., Li, B., Lin, H., Zhang, Y., Zhang, J., & Wang, Z. (2017). UV-Vis and ATR-FTIR
spectroscopic investigations of postmortem interval based on the changes in rabbit plasma.
PLoS One, 12(7), e0182161. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/28753641>
- World Health Organization. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition*. World Health
Organization Regional Publications, European Series No.91. Copenhagen: World Health
Organization , Regional Office for Europe.
- X. Yan, X. C. (2015). Titanium Dioxide Nanomaterials. In *Encyclopedia of Inorganic and
Bioinorganic Chemistry* (pp. 1-38): John Wiley & Sons.
- Xia, T., Zhang, Y., Murowchick, J., & Chen, X. (2014). Vacuum-treated titanium dioxide
nanocrystals: Optical properties, surface disorder, oxygen vacancy, and photocatalytic
activities. *Catalysis Today*, 225, 2-9. doi:10.1016/j.cattod.2013.08.026
- Yan, H., Wang, X., Yao, M., & Yao, X. (2013). Band structure design of semiconductors for
enhanced photocatalytic activity: The case of TiO₂. *Progress in Natural Science: Materials
International*, 23(4), 402-407. doi:10.1016/j.pnsc.2013.06.002

- Yao, P., Zhong, S., & Shen, Z. (2015). *TiO₂/Halloysite Composites Codoped with Carbon and Nitrogen from Melamine and Their Enhanced Solar-Light-Driven Photocatalytic Performance* (Vol. 2015).
- Yu, P., Zhou, X., Li, Z., & Yan, Y. (2020). Inactivation and change of tetracycline-resistant *Escherichia coli* in secondary effluent by visible light-driven photocatalytic process using Ag/AgBr/g-C₃N₄. *Science of The Total Environment*, 705. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135639
- Yu., K. P., Lee, G. W., Huang, W. M., Wu, C. C., Lou, C. L., & Yang, S. (2006). Effectiveness of photocatalytic filter for removing volatile organic compounds in the heating, ventilation, and air conditioning system. *J Air Waste Manag Assoc*, 56(5), 666-674. doi:10.1080/10473289.2006.10464482
- Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., & Ge, J. (2008). Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. *Ecological Economics*, 68(1), 306-316. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.03.009
- Zhang, D. (2010). Enhanced photocatalytic activity for titanium dioxide by co-modification with copper and iron. *Transition Metal Chemistry*, 35, 933-938. doi:10.1007/s11243-010-9414-6
- Zhang, F., Li, X., Zhao, Q., Chen, G., & Zhang, Q. (2020). High-performance In₂O₃@PANI core@shell architectures with ultralong charge carriers lifetime for photocatalytic degradation of gaseous 1,2-dichlorobenzene. *Applied Catalysis B: Environmental*, 263. doi:10.1016/j.apcatb.2019.118278
- Zhang, H. W., Kok, V. C., Chuang, S. C., Tseng, C. H., Lin, C. T., Li, T. C., . . . Hsu, C. Y. (2019). Long-term ambient hydrocarbons exposure and incidence of ischemic stroke. *PLoS One*, 14(12), e0225363. doi:10.1371/journal.pone.0225363
- Zhang, J., Wang, P., Li, J., Mendola, P., Sherman, S., & Ying, Q. (2016). Estimating population exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbon in the United States - Part II: Source apportionment and cancer risk assessment. *Environ Int*, 97, 163-170. doi:10.1016/j.envint.2016.08.024
- Zhang, Y., Xu, M., Li, H., Ge, H., & Bian, Z. (2018). The enhanced photoreduction of Cr(VI) to Cr(III) using carbon dots coupled TiO₂ mesocrystals. *Applied Catalysis B: Environmental*, 226, 213-219. doi:10.1016/j.apcatb.2017.12.053

- Zhang, Y., Zhu, Z., Zheng, Y., Chen, Y., Yin, F., Zhang, W., . . . Xin, H. (2019). Characterization of Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from Swine Manure Biogas Digestate Storage. *Atmosphere*, *10*(7). doi:10.3390/atmos10070411
- Zheng, J., Yu, Y., Mo, Z., Zhang, Z., Wang, X., Yin, S., . . . Cai, H. (2013). Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China. *Sci Total Environ*, *456-457*, 127-136. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.055
- Zhong, L., & Haghghat, F. (2015). Photocatalytic air cleaners and materials technologies – Abilities and limitations. *Building and Environment*, *91*, 191-203. doi:10.1016/j.buildenv.2015.01.033
- Zhong, L., Haghghat, F., Lee, C.-S., & Lakdawala, N. (2013). Performance of ultraviolet photocatalytic oxidation for indoor air applications: Systematic experimental evaluation. *J Hazard Mater*, *261C*, 130-138. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.07.014
- Zhou, Z. H., Deng, Y., Wu, K. Y., Tan, Q. W., Zhou, X. L., Song, D. L., . . . Zeng, W. H. (2019). Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu. *Huan Jing Ke Xue*, *40*(9), 3949-3961. doi:10.13227/j.hjcx.201903009
- Zhu, X., Fan, Z. T., Wu, X., Jung, K. H., Ohman-Strickland, P., Bonanno, L. J., & Li, P. J. (2011). Ambient concentrations and personal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in an urban community with mixed sources of air pollution. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, *21*(5), 437-449. doi:10.1038/jes.2011.2
- Zou, Q., Zhang, Z., Li, H., Pei, W., Ding, M., Xie, Z., . . . Li, H. (2020). Synergistic removal of organic pollutant and metal ions in photocatalysis-membrane distillation system. *Applied Catalysis B: Environmental*, *264*. doi:10.1016/j.apcatb.2019.118463



ภาคผนวก

Method C:\CHEM32\1\METHODS\BENZENERE.M

=====
 Calibration Table
 =====

Calib. Data Modified : 4/2/2020 11:30:59 PM

Calculate : External Standard
 Based on : Peak Area

Rel. Reference Window : 3.000 %
 Abs. Reference Window : 0.000 min
 Rel. Non-ref. Window : 3.000 %
 Abs. Non-ref. Window : 0.000 min
 Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Uncalibrated Peaks : not reported
 Partial Calibration : Yes, identified peaks are recalibrated
 Correct All Ret. Times: No, only for identified peaks

Curve Type : Linear
 Origin : Included
 Weight : Equal

Recalibration Settings:
 Average Response : Average all calibrations
 Average Retention Time: Floating Average New 75%

Calibration Report Options :
 Printout of recalibrations within a sequence:
 Calibration Table after Recalibration
 Normal Report after Recalibration
 If the sequence is done with bracketing:
 Results of first cycle (ending previous bracket)

Signal 1: FID1 A,

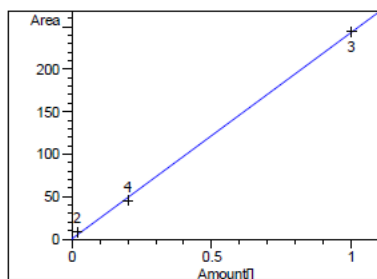
RetTime	Lvl	Amount	Area	Amt/Area	Ref Grp Name
[min]	Sig				
2.855	1 2	2.00000e-2	7.97023	2.50934e-3	Benzene
	4	2.00000e-1	45.11152	4.43346e-3	
	3	1.00000	244.63083	4.08779e-3	

=====
 Peak Sum Table
 =====

No Entries in table
 =====

Method C:\CHEM32\1\METHODS\BENZENERE.M

=====
Calibration Curves
=====



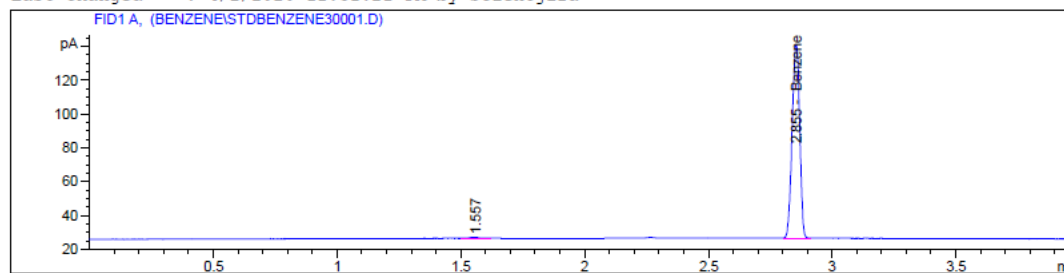
=====
Benzene at exp. RT: 2.855
FID1 A,
Correlation: 0.99970
Residual Std. Dev.: 3.43129
Formula: $y = mx + b$
m: 243.91770
b: 3.32472e-2
x: Amount[]
y: Area
=====

Data File C:\CHEM32\1\DATA\BENZENE\STDBENZENE30001.D

```

=====
Acq. Operator   : Scientjira
Acq. Instrument : Instrument 1          Location : -
Injection Date  : 3/22/2020 5:09:36 PM Inj       : 1
                                           Inj Volume : External

Acq. Method     : C:\CHEM32\1\METHODS\BENZENE.M
Last changed    : 3/22/2020 5:08:34 PM by Scientjira
Analysis Method : C:\CHEM32\1\METHODS\BENZENERE.M
Last changed    : 4/2/2020 11:31:21 PM by Scientjira
  
```



```

=====
External Standard Report
=====
  
```

```

Sorted By       : Signal
Calib. Data Modified : 4/2/2020 11:30:59 PM
Multiplier      : 1.0000
Dilution        : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: FID1 A,

RetTime [min]	Type	Area [pA*s]	Amt/Area	Amount	Grp	Name
2.855	BV	244.63083	4.09919e-3	1.00279		Benzene

```
Totals :                               1.00279
```

```

=====
*** End of Report ***
  
```



บันทึกข้อความ

ส่วนงาน สำนักงานอธิการบดี กองบริหารการวิจัยและนวัตกรรม โทร. ๒๕๖๑ - ๒๕๖๒

ที่ อว ๘๑๐๐/ ๐๒๕๖๘

วันที่ ๑๐ มีนาคม พ.ศ. ๒๕๖๓

เรื่อง ขอแจ้งรับรองโครงการวิจัยที่ส่งมาขอรับการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เรียน นางสาวปัทมพร จันทร์กลม (นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา คณะสาธารณสุขศาสตร์)

ตามที่ท่าน ได้ส่งเอกสารโครงการวิจัยเพื่อขอรับการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ในหัวข้อโครงการวิจัย เรื่อง ประสิทธิภาพของการบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชันโดยไททาเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ นั้น

บัดนี้ คณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้พิจารณาตามวิธีดำเนินการมาตรฐาน (Standard Operating Procedures, SOP) ฉบับที่ ๑.๑ พ.ศ. ๒๕๖๒ ที่ได้ประกาศใช้เมื่อวันที่ ๑ ตุลาคม พ.ศ. ๒๕๖๒ แล้วว่า โครงการวิจัยดังกล่าวไม่ได้ทำการศึกษาวิจัยในมนุษย์ จึงเห็นสมควรให้ดำเนินการวิจัยได้

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจงเอียด)

ประธานคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ชุดที่ ๑ (กลุ่มคลินิก/ วิทยาศาสตร์สุขภาพ/ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

ชั่วโมงที่	ความเข้มข้นของเบนซีน ณ เวลาต่างๆ			
	5%	10%	15%	photolysis
0	5.21	5.21	5.21	5.21
1	5.2	5.21	5.2	5.2
2	5.19	5.2	5.16	5.21
3	5.18	5.15	5.11	5.1
4	5	5.12	5.06	5.09
5	4.21	4.62	5.1	5.2
6	3.95	4.25	5.01	5.1
7	3.76	4.23	4.98	5
8	3.62	4.15	4.9	5
9	3.56	4.12	4.88	4.9
10	3.32	4.06	4.82	4.95
11	3.3	4	4.8	4.94
12	3.22	3.95	4.77	4.93
13	3.13	3.85	4.73	4.88
14	3.11	3.75	4.71	4.85
15	3.01	3.63	4.68	4.86
16	3	3.52	4.6	4.83
17	2.99	3.45	4.55	4.82
18	2.98	3.41	4.51	4.8
19	2.97	3.36	4.47	4.79
20	2.96	3.3	4.38	4.78
21	2.96	3.22	4.27	4.76
22	2.95	3.15	4.21	4.76
23	2.94	3.05	4.03	4.75
24	2.93	3.05	3.84	4.73