

ชุดฟอกอากาศสำหรับบำบัดสารเบนซินโดยใช้เทคโนโลยี

โฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์^{1*}, ต่อพงศ์ กริธาชาติ²

^{1*}สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

²วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

Email: chaisri.th@ssru.ac.th^{1*}, tor_envi@hotmail.com²

Received: October 31, 2018

Revised: May 29, 2019

Accepted: June 5, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประยุกต์ใช้ชุดฟอกอากาศทำการบำบัดสารเบนซินด้วยเทคโนโลยีโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่สังเคราะห์จากแผ่นฟิล์มชีวภาพขอบเขตการวิจัย ทำการทดลองใช้แผ่นฟิล์มพอลิแลคติก แอซิดที่ใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0, 10.0 และ 15.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีโบล์ฟิล์ม ความหนา 30.0 ไมครอน และติดตั้งชุดปฏิกรณ์แบบอากาศไหลทางเดียว ใช้หลอดกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องสแกนแบบส่องกราด พบว่ามีการกระจายตัวของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ทั่วทั้งผิวฟิล์ม ผลึกโครงสร้างเป็นแบบอนาเทส และมีช่องว่างของพลังงานที่ 3.14-3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารเบนซิน ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองใน 3 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยจากปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา ความเข้มแสง และความเข้มข้นของสารเบนซินเริ่มต้น พบว่า แผ่นฟิล์มที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10.0 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเบนซิน 5 ± 0.5 พีพีเอ็ม และความเข้มแสง 5.24 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าตอบสนองสูงสุด 58.90 เปอร์เซ็นต์ และจากวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณสำหรับทำนายผลการบำบัดสารเบนซินในอนาคต พบว่ามีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 0.82 สรุปได้ว่ากระบวนการบำบัดสารเบนซินในอากาศ สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับชุดฟอกอากาศในสภาวะที่เหมาะสมได้

คำสำคัญ : ชุดฟอกอากาศ, เบนซิน, ฟิล์มชีวภาพ, โฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

Air Purifier for Benzene Removal by using Photocatalytic Oxidation Technology

Chaisri Tharasawatpipat^{1*}, Torpong Kreetachat²

^{1*}Environmental science, Suansunandha Rajabhat University

²School of Energy and Environment, University of Phayao

Email: chaisri.th@ssru.ac.th^{1*}, tor_envi@hotmail.com²

Received: October 31, 2018

Revised: May 29, 2019

Accepted: June 5, 2019

Abstract

The objectives of this research were to apply the air purifier for benzene volatile organic compound removal through photocatalytic oxidation process using bio-composite film as photocatalyst. The polylactic acid films were embedded with 5.0, 10.0 and 15.0 %wt of titanium dioxide powder. Each film was installed in annular closed-system photoreactor with UV-C light at 254 nm. Blown film extrusion technique was used to create the films with 30.0 microns in thickness. The morphology of the films were examined by a scanning electron microscope (SEM). After SEM testing, it was found that titanium dioxide was equally distributed and embedded all over the films. The crystal structure of titanium dioxide was appeared to be an anatase structure. It was found that the energy band gap was from 3.14 to 3.26 eV. The experiment on the optimal conditions for benzene removal by surface response techniques on three effect as photocatalyst dosage, light intensity, initial benzene concentration showed that the optimised response was 58.90% for 10%wt of titanium dioxide with 5 ± 0.5 ppm of initial benzene concentration and 5.24 mW/cm^2 of light intensity. A linear correlation of 0.82 was found in the multiple regression analysis of benzene treatment prediction. In the conclusion, there was a possibility to integrate the benzene removal process with an air purifier using photocatalytic oxidation.

Keywords : Air Purifier, Benzene, Biocomposite film, Photocatalytic Oxidation

บทนำ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ ปัจจุบันพบเป็นสารที่มีในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สี ควันบุหรี่ สารฟอกสี ตัวทำละลายในงานพิมพ์ ปะปนในอากาศ ซึ่งพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ อาคารสำนักงานต่าง ๆ เป็นพื้นที่ทำงานหนึ่ง ที่มีแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภท เบนซีน โทลูอีน เบนซอลดีไฮด์ ซึ่งหากได้รับในปริมาณมากย่อมก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคของผู้ให้บริการและผู้ใช้บริการ (Roschan & Tipayarom, 2014, pp. 971-976) เทคโนโลยีโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกพัฒนามาใช้บำบัดสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในน้ำและในอากาศที่อาศัยกลไกทางกายภาพเคมี อาศัยพลังงานจากแสงช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตร่วมกับการกระตุ้นโดยอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ แต่เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ สารตัวเร่งปฏิกิริยาต้องการให้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม การศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงไว้ในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ($\text{TiO}_2/\text{Biocomposite}$ film) ที่ขึ้นรูปจากเทคนิคการเป่า (blown film) มาใช้บำบัดสารเบนซีนในอากาศ โดยเลือกเครื่องฟอกอากาศที่บรรจุในห้องจำลองขนาด 785 ลิตร ที่เป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ปฏิบัติงาน และหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองด้วยเทคนิคการหาค่าการตอบพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology : RSM) แบบ box benken method (Srimanta, Jerald, & Nihar 2009, pp. 15–24) ในปัจจัยหลักที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคโนโลยีนี้ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มแสง ปริมาณสารตัวเร่ง

ปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ Donya, Fariborz, Chang, & Ness (2013, pp. 148-157) ซึ่งผลการวิจัยนี้จะสามารถเป็นแนวทางต่อยอดถึงรูปแบบของการพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่การออกแบบระบบบำบัดสาร VOCs ที่เป็นมลพิษในอุปกรณ์ฟอกอากาศในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีน ด้วยชุดฟอกอากาศจำลองที่ใช้เครื่องฟอกอากาศเป็นชุดทำให้เกิดปฏิกิริยา โฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารเบนซีน ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองแบบ box benken

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประเภทพัฒนาทดลองประยุกต์ เลือกใช้ขั้นตอนการบำบัดมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีใหม่ โดยดำเนินการดังนี้

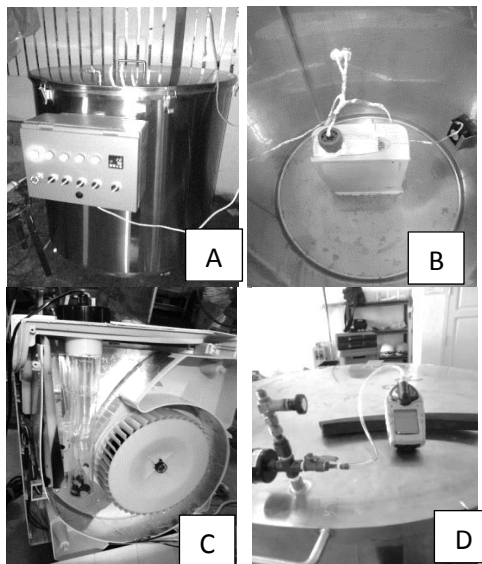
1. ออกแบบชุดฟอกอากาศให้อากาศไหลผ่านชุดปฏิกรณ์แบบ annular แบบทางเดียวประกอบด้วยกล่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 1.0 เมตร ทำด้วยวัสดุทนการกัดกร่อน SS 314 เชื่อมปิดสนิท มีช่องเปิดเพื่อเปลี่ยนหลอด UV ที่ปิดด้วยวัสดุกันรั่วซึมแบบแผ่นยางกันซึม และพัดลมดูดอากาศภายนอกเข้าภายในกล่องโดยท่อที่มีการควบคุมการปิด-เปิดด้วยวาล์วควบคุมภายในกล่องบรรจุชุดปฏิกรณ์ที่ประกอบไว้ในชุดเครื่องฟอกอากาศ ที่ถูกดัดแปลงจากชุดฟอกอากาศยี่ห้อ Bionaire รุ่น BAP-625 ขนาด 420x210x476 มิลลิเมตร ความเร็วลมดัดแปลงต่ำสุด 0.240 m^3/hr . (4.0 V/min) ภายในติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม วัดอุณหภูมิ ชุดความชื้น และชุดปฏิกิริยาที่ภายในติดตั้งหลอดกำเนิดแสงช่วง UV-C และแผ่นฟิล์ม TiO_2/PLA film ซึ่งมี

คุณสมบัติเสถียรภาพต่อสารเคมี ปลอดภัยต่อผู้ใช้ และสิ่งแวดล้อม Suwannahong et al. (2012, pp. 955-959) ดังแสดงในรูปที่ 1

2. ตรวจสอบการรั่วไหลของสารเบนซีนเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศด้วยวิธีตรวจสอบบริเวณรอยต่อ ด้วยฟองสบู่ และการอัดด้วยลมที่ติดตั้งเกจวัดแรงดันไว้ด้านบนถังเพื่อสังเกตการณ์ลดลงของแรงดันในถังปฏิกรณ์

3. ทำการทดลองหาสถานะสมดุลของการปฏิกิริยาการดูดซับโดยการฉีดสารเบนซีนที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน 15 ppm. ตรวจสอบปริมาณสารเบนซีนทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนพบจุดสมดุลของการดูดซับบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม (จุดที่ปริมาณสารเบนซีนไม่เปลี่ยนแปลง) แล้วทำการเปิดแสงอัลตราไวโอเลต แล้วทำการตรวจสอบปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารเบนซีนทุก ๆ 1 ชั่วโมงโดยเก็บตัวอย่างอากาศที่ผ่านจากระบบตรวจสอบปริมาณด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC-FID)

4. ทำการตรวจสอบสถานะการทดลองที่เหมาะสมตามเทคนิคพื้นผิวตอบสนองแบบ box benken โดยฉีดสารเบนซีนที่รู้ปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนเข้าสู่ชุดทดลอง ทำการเปิดแสง UV-C หลังจากสถานะสมดุลของการดูดซับแล้ว โดยทำการทดลองบำบัดสารเบนซีน ที่ความเข้มข้น 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 , 15 ± 0.5 ppm.



รูปที่ 1 ลักษณะของชุดทดลองที่ดัดแปลงจากชุดกรองอากาศและการตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัด

A คือ ห้องทดลองและชุดควบคุมไฟฟ้าภายนอก

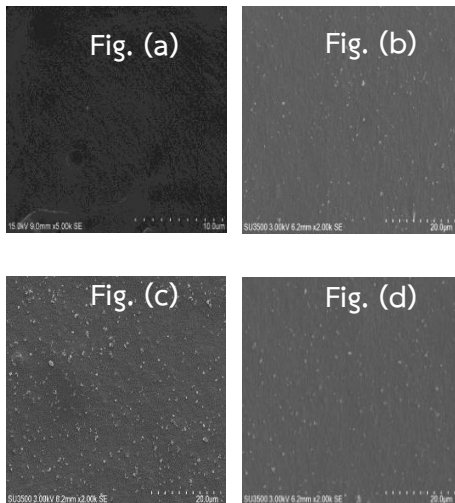
B คือ ชุดฟอกอากาศที่ภายในบรรจุหลอด UV และฟิล์ม TiO_2/PLA

C แสดงภายในชุดฟอกอากาศ

D แสดงจุดตรวจสอบปริมาณสารเบนซีนด้วยเครื่องตรวจวัดสารเบนซีน

ผลการวิจัย

1. ผลการตรวจสอบลักษณะของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/PLA film ด้วยเครื่องสแกนแบบส่องกราด พบว่า ผิวหน้าของแผ่นฟิล์มมีลักษณะราบเรียบ โดยพบว่ามีการฝังตัวของสารเร่งปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวของแผ่นฟิล์มจากภาพ (b)-(d) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการตรวจสอบ SEM micrographs (a) PLA film 0.0, 5.0, 10.0 และ 15.0%wt. ตามลำดับ

ผลของการตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสง UV-Vis ของแผ่นฟิล์ม ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm. พบว่า สามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้ดี ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm. เมื่อหาค่าพลังงานแบนแก๊ป (Eg) พบว่า มีค่าพลังงานในช่วงแบนแก๊ปที่ 3.14-3.26 eV. แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของการคำนวณค่าพลังงานแบนแก๊ปของแผ่นฟิล์ม TiO₂/PLA

ปริมาณสารเร่ง ปฏิกิริยาด้วยแสงใน แผ่นฟิล์ม TiO ₂ (%wt)	ค่าพลังงานแบนแก๊ป (eV) TiO ₂ /PLA
5.0%	3.22
10.0%	3.18
15.0%	3.14

จากรูปที่ 2 และตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีการกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม และค่าพลังงานแบนแก๊ปของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂ ในแผ่นฟิล์ม PLA ใกล้เคียงกับค่าแถบพลังงานของผลึกสารเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง ที่มีโครงสร้างแบบ Anatase (Eg 3.20 eV.) Obee et al. (2000, pp. 253-261)

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีนที่เลือกใช้ TiO₂/PLA ฟิล์มที่มีปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ที่ 5.0, 10.0 และ 15.0%w/w พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดสารระเหยเบนซีน ได้สูงสุด 63 เปอร์เซ็นต์ที่ TiO₂ 10.0%w/w

3. ผลการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารเบนซีนในชุดฟอกอากาศ ที่ใช้ TiO₂/PLA film ด้วยเทคนิค respond surface method พบคำตอบสนองในสภาวะที่ดีที่สุดของการบำบัดสารเบนซีน มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นแบบสหสัมพันธ์ที่ R² เท่ากับ 0.82 ที่ ความเข้มแสง 5.24 mW/cm² ปริมาณTiO₂ 10.0%w/w และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารระเหยเบนซีน 5±0.5 ppm. มีคำตอบสนอง 58.90% และได้สมการทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองและสร้างแบบจำลองการถดถอย (multiple regression) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังแสดงผลทางสถิติในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลทางสถิติ แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จากเทคนิคพื้นผิวผิวดตอบสนอง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	1234	112.2	6.23	0.001
Blocks	2	70.2	35.1	1.95	0.176
Linear	3	729.1	243.0	13.50	0.000
Light intensity	1	260.3	260.3	14.46	0.002
TiO ₂ Dosage(%TiO ₂)	1	48.0	48.0	2.67	0.123
Initial concentration	1	402.9	402.9	22.39	0.000
Square	3	361.4	120.4	6.69	0.004
Light intensity*Light intensity	1	118.6	118.6	6.59	0.021
%TiO ₂ *%TiO ₂	1	141.7	141.7	7.88	0.013
Initial concentration* Initial concentration	1	143.4	143.4	7.97	0.013
2-Way Interaction	3	38.1	12.7	0.71	0.563
Light intensity*%TiO ₂	1	16.3	16.3	0.91	0.355
Light intensity* Initial concentration	1	0.8	0.8	0.05	0.827
%TiO ₂ * Initial concentration	1	15.5	15.5	0.87	0.367
Lack-of-Fit	10	264.3	26.4	23.71	0.001
Total	15	1504.2			

สรุปและอภิปรายผล

แผ่นฟิล์มที่ผลิตจากแผ่นพลาสติกชีวรูปที่ใส สารเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม พบว่าสามารถใช้บำบัดสารเบนซินที่เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดี จากผลการตรวจสอบด้วย SEM micrographs และการตรวจสอบการยึดเกาะติดผิวของหุ้ฟงชั้นของสารอินทรีย์จากผลการวิเคราะห์ FTA สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kreetachat, Kruenate, & Suwannahong (2013) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรอากาศใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดมลพิษ สามารถถูกนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสมในสภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกประยุกต์ใช้ห้องทดสอบที่มีปริมาตรอากาศ 786 ลิตร และมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันที่เหมาะสมสามารถที่จะบำบัดสารเบนซินได้เช่นเดียวกับ

ผลการศึกษาของ Donya, Fariborz, Chang, & Ness, (2013, pp. 148-157) Hugo D et al. (2012, pp. 159-170) โดยพบว่าที่ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพการบำบัดสารเบนซินได้สูงกว่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 15 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาตรพื้นผิวสัมผัสของฟิล์มเท่าเดิมไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Suwanahong et al. (2012, pp. 955-959) จากผลการบำบัดสารเบนซินด้วยชุดทดลองที่ติดตั้งจากชุดฟอกอากาศได้สูงสุดที่ 62.28% และสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองด้วยเทคนิค RSM มีค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ที่ความเข้มแสง 5.24 mW/cm² ปริมาณ TiO₂ 10.0%w/w และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเบนซิน 5±0.5 ppm. โดยมีค่าตอบสนอง 58.90% สอดคล้องกับ

ผลการวิจัยของ Hugo et al (2012, pp. 159-170) ที่พบว่าปริมาณสารเบนซีนที่เหมาะสมต่อการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ออกซิเดชันที่ค่าต่ำเช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Donya, Fariborz, Chang, & Ness (2013, pp. 148-157) ส่วนปัจจัยด้านค่าความเข้มแสง UV ที่สูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Obee et al (2000, pp. 253-261) และปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีความสัมพันธ์น้อยสุดโดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 10.0%w/w สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kreetachat, Kruenate, & Suwannahong (2013, pp. 552-556)

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาประยุกต์ใช้นวัตกรรมด้านเครื่องฟอกอากาศที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารเบนซีนในอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ แต่ยังมีคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดในส่วนของคุณภาพของกระแสอากาศที่นำพาสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ระบบการฟอกอากาศ
2. ควรศึกษากลไกทางของการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทอื่น ๆ เพิ่มเติม
3. ควรมีการศึกษากาการจัดการผลผลิตได้ อาทิ การจัดการแผ่นฟิล์มที่เสื่อมประสิทธิภาพ การจัดการกับสารข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการบำบัด

References

- Donya, F., Fariborz H., Chang, S. L & Ness, L. (2013). Impact of design parameters on the performance of ultraviolet photocatalytic oxidation air cleaner. *Journal of Building and Environment*, 2013 (66), 148-157.
- Hugo, D., et-al. (2012). Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions. *Journal of Applied Catalysis B Environmental*, 2012 (128), 159-170.
- Kreetachat, T., Kruenate, J., & Suwannahong, K. (2013). Preparation of TiO_2/Bio -composite Film by Sol-Gel Method in VOCs Photocatalytic Degradation Process. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, 2013 (390), 552-556.
- Obee, T.N., et-al. (2000). Photocatalytic Oxidation of Toluene on Nanoscale TiO_2 Catalysts: Studies of Deactivation and Regeneration. *Journal of Catalysis*, 2000 (196), 253-261.
- Roschan, S., Tipayarom, A. (2014). Health Risk Assessment of Exposure to Volatile Organic Compounds Emitted from Photocopiers. *KKU Institutional Research Journal*, 971-976.
- Srimanta, R., Jerald, A.L. & Nihar, B. (2009). Using the Box-Benkhen technique to statistically model phenol photocatalytic degradation by titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Chemical Engineering*, 2009 (150), 15–24.

Suwannahong, K., et al. (2012). Application of nano-TiO₂/LDPE composite film on photocatalytic oxidation degradation of dichloromethane. *Journal of Environmental Biology*, 2012(33), 955-959.