



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดไอระเหยเบนซีนของ TiO_2/PLA -composite film ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

Eco-efficiency of removal benzene using TiO_2/PLA -composite film
by photocatalytic oxidation process

ปัทมพร จันทร์กลม โกวิท สุวรรณหงษ์ ทนงศักดิ์ ยิ่งรัตนสุข และ รชฎติ ชิติกาวินทร์

Pattamaphon Chanklom Kowit Suwannahong Tanongsak Yingratanasuk and Rotruedee Chotigawin^{*}

คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131, ประเทศไทย

Faculty of Public Health, Burapha University, Chon Buri 20131, Thailand

Received: 13 July 2020

Revised: 10 October 2020

Accepted: 13 November 2020

Available online: 14 June 2021

บทคัดย่อ

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของเทคโนโลยีบำบัดอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นวิธีการนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องฟอกอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสเทียบกับกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยใช้ฟิล์ม $5\%\text{TiO}_2/\text{PLA}$ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม ฟิล์มที่สังเคราะห์ได้วิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวบนแผ่นฟิล์มเป็นอย่างดี วิเคราะห์ด้วย UV-VIS พบว่าค่าแถบพลังงานเท่ากับ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นลักษณะของผลึกอนาเทส และตรวจด้วย ATR-FTIR พบโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์และพีแอลเอ จากผลการศึกษาพบว่าการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันและกระบวนการโฟโตไลซิสนาน 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเท่ากับ 44% และ 9% ตามลำดับ โดยเบนซีนถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่มีอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0188 และ 0.0133 ตามลำดับ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเท่ากับ 0.346 และ 0.007 ตามลำดับ ดังนั้นกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันที่ใช้ $5\%\text{TiO}_2/\text{PLA}$ สามารถบำบัดเบนซีนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

คำสำคัญ: โฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน โฟโตไลซิส เบนซีน ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์/พีแอลเอ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

Abstracts

Eco-efficiency assessment in air pollution treatment by photocatalytic oxidation contributes to the application of effective air control pollution. The purpose of this research is to study eco-efficiency assessment of removal efficiency of benzene by photolysis and photocatalytic oxidation using 5%TiO₂/PLA-composite film which synthesized by blown film technique. The result from SEM showed well dispersion of TiO₂ on film. UV-VIS showed the band gap is 3.22 eV, band gap of anatase TiO₂. ATR-FTIR showed anatase TiO₂ and PLA in the film. The result showed removal efficiency of benzene by photocatalytic oxidation and photolysis within 24 hours of reaction time are 44% and 9%, respectively. Benzene can be degraded to CO₂ and H₂O by photocatalytic oxidation and photolysis, was following the first order kinetic. The removal rate constants (k) were 0.0188 and 0.0133, respectively. The eco-efficiency was 0.346 and 0.007, respectively. In summary, the photocatalytic oxidation using 5%TiO₂/PLA-composite film is suitable for removal benzene and high eco-efficiency.

Keywords: Photocatalytic oxidation: Photolysis: Benzene: TiO₂/PLA-composite film: Eco-efficiency

* ติดต่อ: E-mail : rotruedee@go.buu.ac.th

1. บทนำ

คุณภาพอากาศทั้งนอกและในอาคารนั้นส่งผลต่อสุขภาพ [1, 2] โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพอากาศในสถานที่ทำงานและโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีสารอันตรายระเหยง่ายหลายชนิดที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ เช่น เบนซีนพบได้ในโรงงานปิโตรเคมี พบว่าผู้ปฏิบัติงานได้รับสัมผัสเบนซีนจากการทำงาน 1.11 ± 2.61 ส่วนในล้านส่วน ซึ่งเกินค่าที่นักสุขภาพศาสตร์อุตสาหกรรมภาครัฐแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (ACGIH) แนะนำ [3]

วิธีการบำบัดสารอันตรายระเหยง่ายภายในอาคารมีหลายวิธี ได้แก่ เทคโนโลยีกายภาพ เทคโนโลยีเคมี และเทคโนโลยีชีวภาพ [4] เช่น การดูดซับ (adsorption) ด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) การใช้พืชในการบำบัด (biofiltration) [5] กระบวนการโฟโตไลซิส (photolysis) การใช้โอโซน (ozonation) [6] การใช้ปฏิกิริยาความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (thermal catalytic oxidation) [7]

และกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (photocatalytic oxidation) [8]

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันถูกใช้อย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีสะอาด [9] กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการบำบัดสารมลพิษซึ่งจะได้เป็นสารที่ไม่เป็นพิษหรือเรียกว่า green chemistry อันได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม [10] มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ [7] สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง [11] และสามารถกำจัดจุลินทรีย์ในอากาศ (bioaerosol) ได้ [12, 13]

ปัจจุบันมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการบำบัดสารอันตรายระเหยง่าย เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการซึ่งได้รับความนิยม เนื่องจากราคาถูก ปลอดภัย หาได้ง่าย และมีความเสถียร [10] โดยนำไททาเนียมไดออกไซด์ตรึงบนวัสดุตัวกลางต่าง ๆ เช่น พลาสติก [14] โลหะ แก้ว [15] อิฐ ปูนซีเมนต์ [16] และยางพารา [17] หลังจาก

ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหมดอายุการใช้งาน วัสดุตัวกลางจะกลายเป็นขยะตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากปิโตรเคมี

พลาสติกชีวภาพจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโพลีแลคติกแอซิดหรือพีแอลเอ (polylactic acid หรือ PLA) เนื่องจากการผลิตพีแอลเอใช้พลังงานลดลงถึง 30-50% ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 50-70% สามารถรีไซเคิลได้ เกิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) และสามารถย่อยสลายได้ [18-20] จึงนับได้ว่ามีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ผลิตจากพีแอลเอและไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย [19]

การพัฒนาอย่างยั่งยืน (sustainable development) เป็นวิธีการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการในปัจจุบันโดยไม่เบียดบังการตอบสนองความต้องการของมนุษย์ในรุ่นถัดไป การพัฒนาจะยั่งยืนได้นั้นต้องมีการพัฒนาทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนไปพร้อมกัน [21]

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (eco-efficiency) เป็นหนทางหนึ่งที่จะนำไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจเกิดขึ้นได้จากการลดต้นทุนการผลิตเพื่อส่งมอบสินค้าและบริการในราคาที่แข่งขันได้ ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ นำมาซึ่งคุณภาพชีวิต ใช้ทรัพยากรตลอดวงจรชีวิตอย่างคุ้มค่า ขณะเดียวกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการผลิต ขนส่ง บริโภค และการกำจัดขยะจากผลิตภัณฑ์ลดลง ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจยังเป็นแนวทางพัฒนาที่ใช้ได้ทุกระดับ และยังบูรณาการได้ทุกกิจกรรม [22]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจโดยประยุกต์ใช้กับการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอาศัยฟิล์ม 5%TiO₂/PLA เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเปรียบเทียบกับกระบวนการโฟโตไลซิส

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส (cosmetic grade) พีแอลเอจากบริษัท nature work โดยสังเคราะห์ได้แผ่นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และใช้เบนซีนจากบริษัท Merck เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในการศึกษา

2.2 การสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

การสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film โดยใช้ ไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส 5%โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดเบนซีน [20] ผสมกับพีแอลเอด้วยเครื่อง twin screw extruder ยี่ห้อ Lab Tech, LTE16-40 และนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง blown film machine ยี่ห้อ Lab tech, LE20-30/C & LF-250 [20]

ฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้นำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS และวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเครื่อง ATR-FTIR [19]

2.3 ถึงปฏิกิริยาด้วยแสง

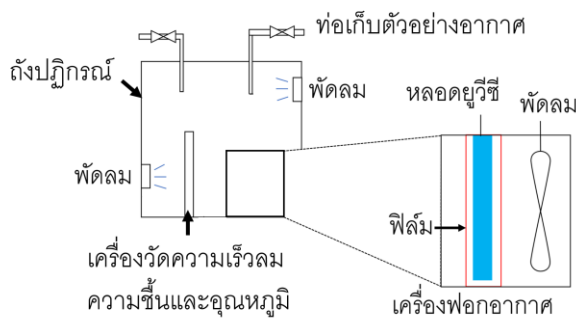
ถึงปฏิกิริยาระบบปิดขนาด 785 ลิตร ใช้จำลองแทนห้องที่มนุษย์อาศัย ภายในติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม ความชื้น และอุณหภูมิ จากนั้นวางเครื่องฟอกอากาศขนาดกว้าง 420 มิลลิเมตร ยาว 210 มิลลิเมตร สูง 476 มิลลิเมตร มีความเร็วลม 4 ลิตรต่อนาที ซึ่งได้ติดตั้งฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film แบบ annular reactor และติดตั้งหลอดรังสียูวีซีภายในเครื่องฟอกอากาศ หลอดรังสี ยูวีซียี่ห้อ Philips ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ขนาด 18 วัตต์ วัดความเข้มแสงยูวีซีด้วยเครื่องวัดความเข้มแสงยูวีซียี่ห้อ Sanpometer ที่ผิวฟิล์มเท่ากับ 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตรวจสอบการรั่วไหลของถึงปฏิกิริยาด้วยแสงโดยวัดแรงดันในถึงปฏิกิริยาด้วยแสงและใช้เกจวัดความดันที่เปลี่ยนแปลงไป [20]

2.4 การทดลองควบคุม

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการทดลองควบคุมทำโดยฉีดพ่นเบนซินเข้าสู่ปฏิกรณ์ระบบปิด เมื่อเบนซินแพร่ถึงจุดสมดุลจึงเปิดหลอดยูวีซีในเครื่องฟอกอากาศที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film วัดติดตามระดับเบนซินนาน 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศผ่านท่อเก็บตัวอย่างอากาศ

2.5 การทดลองบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันทำโดยฉีดพ่นเบนซินเข้าสู่ปฏิกรณ์ระบบปิด เมื่อเบนซินแพร่ถึงจุดสมดุลจึงเปิดหลอดยูวีซีในเครื่องฟอกอากาศที่ได้ติดตั้งแผ่นฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film วัดติดตามระดับเบนซินนาน 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างอากาศผ่านท่อเก็บตัวอย่างอากาศ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film ติดตั้งในเครื่องฟอกอากาศที่วางในถังปฏิกรณ์

สภาวะที่ใช้ในการทดลองกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะที่ทำการทดลอง

สภาวะ	ค่าที่ทำการทดลอง
ความชื้นสัมพัทธ์	55%
ความเข้มข้นเบนซินเริ่มต้น	5 ส่วนในล้านส่วน (ppm)
อัตราการไหลของอากาศ	4 ลิตรต่อนาที (L min ⁻¹)
ความเข้มแสง	5 มิลลิวัตต์ต่อซม. ² (mWcm ⁻²)
อุณหภูมิ	28-35 องศาเซลเซียส (°C)

2.6 การวิเคราะห์เบนซินและคาร์บอนไดออกไซด์

นำอากาศในถังปฏิกรณ์ไปตรวจระดับเบนซินทุก 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง GC-MS และวัดระดับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง GC-TCD ยี่ห้อ Shimadzu

2.7 ประเมินความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ซึ่งพิจารณามูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นเทียบกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ลดลง [23] โดยงานวิจัยนี้พิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซินเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเบนซินตลอด 24 ชั่วโมง ดังสมการที่ 1

$$\text{Eco-efficiency} = E/P \quad (1)$$

เมื่อ Eco-efficiency คือ ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ
P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 24 ชั่วโมง
E คือ ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซิน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการสังเคราะห์ TiO₂/PLA-composite film

ฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film ที่สังเคราะห์ได้นำมาวิเคราะห์การกระจายตัวของไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวบนผิวของฟิล์มอย่างดี [19]

วิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร คำนวณค่าแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์ม 5%TiO₂/PLA-composite film เท่ากับ 3.22 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นลักษณะของไททาเนียมไดออกไซด์ผลึกอนาเทส [19]

วิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเครื่อง ATR-FTIR พบโครงสร้างของพีแอลเอและไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม [19]

3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซิน

กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซินในเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของเบนซินเริ่มต้น

5 ส่วนในล้านส่วน เท่ากับ 9% และ 44% ตามลำดับ โดยคำนวณตามสมการ

$$\% \text{ removal} = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ % removal คือ ประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน (%)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นของเบนซีนเริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ที่ภาวะสมดุล และ ณ เวลาใด ๆ ตามลำดับ (ppm)

พิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยคำนวณจากความเข้มข้นของเบนซีนในแต่ละช่วงเวลา พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยารวมขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง ซึ่งเข้าได้กับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) คำนวณได้จากสมการ

$$r = -d[A]/dt = k[A] \quad (3)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ppm min^{-1})

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate constant) จะมีค่าเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อสารตั้งต้นทุกชนิดมีความเข้มข้นเท่ากับหนึ่งหน่วย (ppm min^{-1})

$[A]$ คือ ความเข้มข้นของเบนซีน (ppm)

โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตไลซิสต่ำกว่าค่าของกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0133 และ 0.0188 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตไลซิสสามารถบำบัดเบนซีนได้ช้ากว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน [24]

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามแบบจำลองของสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูด [25] ดังสมการที่ 2

$$r = -dC/dt = kKC/(1+KC) \quad (4)$$

เมื่อ r คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (ppm min^{-1})

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเบนซีน (ppm)

C_t คือ ความเข้มข้นของเบนซีนเริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ที่ภาวะสมดุล และ ณ เวลาใด ๆ ตามลำดับ (ppm)

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (min)

k คือ ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก

ออกซิเดชัน (ppm min^{-1})

K คือ ค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับ (ppm^{-1})

เมื่อแทนค่าสมการแลงเมียร์ฮินเชลวูดดังสมการที่ 2 เข้าสู่ mass balance equation [26] จะได้ดังสมการที่ 3

$$\frac{V}{Q} = \frac{1}{kK} \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) + \frac{1}{k} (C_0 - C) \quad (5)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของเครื่องฟอกอากาศ (L)

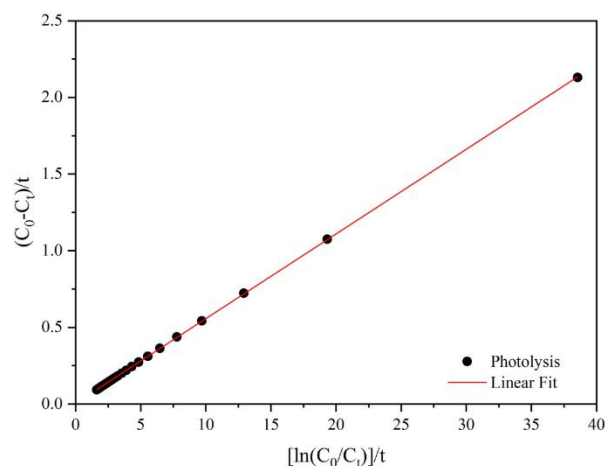
Q คือ อัตราการไหลของอากาศผ่านเครื่องฟอกอากาศ (L min^{-1})

C_0 คือ ความเข้มข้นเบนซีนเริ่มต้น (ppm)

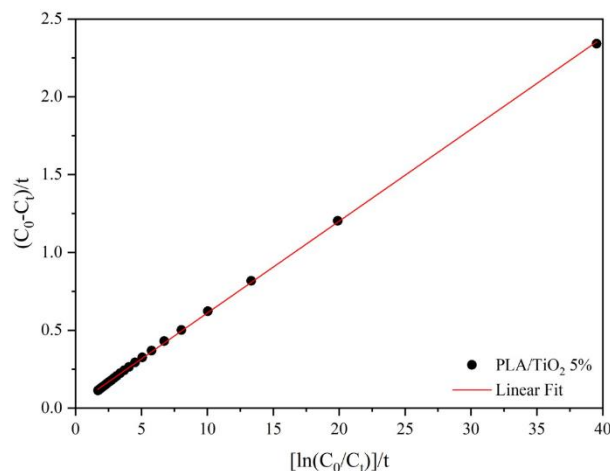
เขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 4

$$\frac{t}{C_0 - C} = \frac{1}{kK} \frac{\ln(C_0/C)}{(C_0 - C)} + \frac{1}{k} \quad (6)$$

จากการใช้แบบจำลองสมการของแลงเมียร์ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood: LH) พบว่ากระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.9999 และ 0.9988 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ากระบวนการทั้งสองสามารถทดสอบได้ด้วยแบบจำลองนี้ และเขียนแสดงเป็นกราฟได้ ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0 - C_t)]/t$ เมื่อบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(C_0 - C_t)/t$ กับ $[\ln(C_0 - C_t)]/t$ เมื่อบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

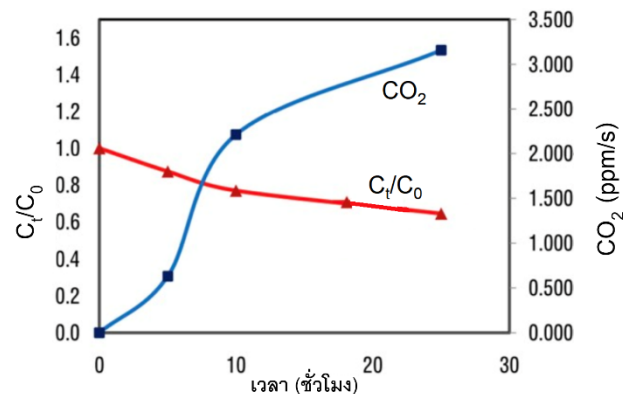
จากการวิเคราะห์หาค่าคงที่ของอัตราการดูดซับและค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเท่ากับ 0.0047 และ 0.1975 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ในการบำบัดเบนซินที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 ส่วนในล้านส่วน

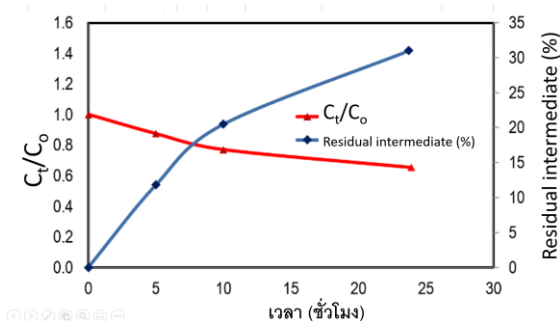
กระบวนการ	K	k	R ²
กระบวนการโฟโตไลซิส	0.0552	0.0046	0.9999
5%TiO ₂ /PLA-composite film	0.1975	0.0047	0.9988

3.3 ระดับคาร์บอนไดออกไซด์และสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

เมื่อพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์และสารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้น รวมถึงสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ 5 จะพบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เบนซินลดลง พบสารมัธยันตร์มีปริมาณสูงขึ้น กระบวนการย่อยสลายของเบนซินก่อนจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสารต่าง ๆ ซึ่งเรียกว่าสารมัธยันตร์ ได้แก่ benzaldehyde, benzoic acid, benzyl alcohol และ phenol [27] ซึ่งตรวจจาก GC-MS



รูปที่ 4 คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชัน



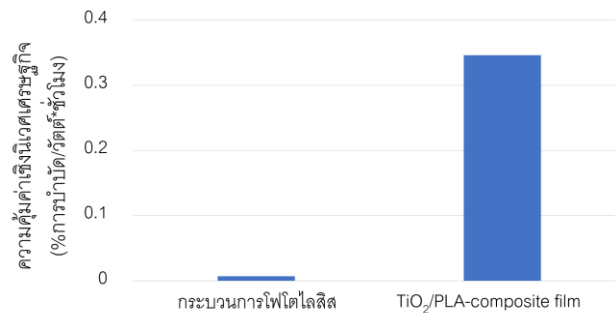
รูปที่ 5 สารมัธยันตร์ที่เกิดขึ้นและสัดส่วนของเบนซินเริ่มต้นต่อเบนซิน ณ เวลาใดในกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน

3.4 ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (eco-efficiency)

ความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film โดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่ได้ใช้ในการบำบัดเบนซิน และประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซิน เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเบนซิน 24 ชั่วโมงคำนวณได้จากหลอดรังสียูวีที่ 18 วัตต์ และเครื่องฟอกอากาศ 35 วัตต์ เปิดนาน 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1,272 วัตต์

การบำบัดเบนซินด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film มีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจมากกว่ากระบวนการโฟโตไลซิสซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.346 และ 0.007 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 6 ค่าความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจ
ในการบำบัดเบนซีน ด้วยกระบวนการโฟโตคะ
ตะไลติกและการโฟโตคะตะไลติก ออกซิเดชัน

4. สรุป

ตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยแสงชนิด 5%TiO₂/PLA-composite film มีประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันสูงกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันอื่น ๆ อีกทั้งยังมีความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจสูงกว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติก ซึ่งเป็นหนทางนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้วิธีการประเมินความคุ้มค่าเชิงนิเวศเศรษฐกิจของเครื่องฟอกอากาศที่อาศัยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนในสถานที่จริง ศึกษาผลกระทบต่อสุขภาพ รวมถึงศึกษาการย่อยสลายของฟิล์ม TiO₂/PLA-composite film

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอรำลึกในพระมหากรุณาธิคุณของพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีและขอขอบพระคุณมูลนิธิพระบรมราชานุสรณ์พระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัวและสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณีที่ได้สนับสนุนการค้นคว้าวิจัยฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณผศ.ดร.โกวิท สุวรรณหงษ์ รวมถึง

คณาจารย์ มหาวิทยาลัยบูรพา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ที่ให้ความช่วยเหลือเสมอมา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cincinelli A, Martellini T. Indoor Air Quality and Health. International journal of environmental research and public health 2017; 14(11): 1286.
- [2] Pei J, Dong C Liu J. Operating behavior and corresponding performance of portable air cleaners in residential buildings. China. Building and Environment. 2019; 147: 473-81.
- [3] Chung EK, Jang JK, Koh DH. A comparison of benzene exposures in maintenance and regular works at Korean petrochemical plants. Journal of Chemical Health and Safety. 2017; 24(3), 21-6.
- [4] Bouchaala. Volatile Organic Compound Removal Method: A Review. American Journal of Biochemistry and Biotechnology. 2012; 8: 220-9.
- [5] Torpy F, Clements N, Pollinger M, Dengel A, Mulvihill I, He C, et al. Testing the single-pass VOC removal efficiency of an active green wall using methyl ethyl ketone. Air quality, atmosphere and health. 2018; 11(2): 163-70.
- [6] Filho BMC, Silva GV, Boaventura RAR, Dias MM, Lopes JCB, Vilar VJP. Ozonation and ozone-enhanced photocatalysis for VOC removal from air streams: Process optimization, synergy and mechanism assessment. Science of The Total Environment. 2019; 687: 1357-68.
- [7] Shah WK, Li W. A Review on Catalytic Nanomaterials for Volatile Organic Compounds VOC Removal and Their Applications for Healthy Buildings. Nanomaterials 2019; 9(6): 910.

- [8] He C, Cheng J, Zhang X, Douthwaite M, Pattisson S, Haoet Z. Recent Advances in the Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds: A Review Based on Pollutant Sorts and Sources. *Chemical Reviews*. 2019; 119(7): 4471-568.
- [9] Sendogdular ST, Gouma P. A Brief Overview of TiO_2 Photocatalyst for Organic Dye Remediation: Case Study of Reaction Mechanisms Involved in Ce- TiO_2 Photocatalysts System. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 13.
- [10] Khami S, Khamwicht W, Rangkupan R, Suwannahong K. Volatile Organic Compound (VOC) Removal via Photocatalytic Oxidation Using TiO_2 Coated Nanofilms. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2017; 15(7): 491-501.
- [11] Huang Y, Ho SSH, Lu Y, Niu R, Xu L, Cao J, et al. Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect. *Molecules*. 2016; 21(1): 56.
- [12] Djellabi R, Ali J, Zhao X, Saber A. CuO NPs incorporated into electron-rich TCTA@PVP photoactive polymer for the photocatalytic oxidation of dyes and bacteria inactivation. *Journal of Water Process Engineering*. 2020; 36: 101238.
- [13] Regmi C, Joshi B, Rau SK, Gyawala G, Pandwt RP. Understanding Mechanism of Photocatalytic Microbial Decontamination of Environmental Wastewater. *Frontiers in Chemistry*. 2018; 6(33): 1-6.
- [14] Suwannahong K, Sirivithayaoakorn S, Noophan P, Sanongraj W. Improvement of TiO_2 /LDPE Composite Films for Photocatalytic Oxidation of Acetone. *Advanced Materials Research*. 2014; 931-932: 235-40.
- [15] Muangmora R, Kemacheevakul P, Chuangchote S. Removal of gaseous benzene by photocatalytic oxidation process using TiO_2 film coated on glass sheets under UVC irradiation. *Thai Environmental Engineering Journal*. 2019; 33(3): 9-16.
- [16] Rachel A, Subrahmanyam M, Boule P. Comparison of photocatalytic efficiencies of TiO_2 in suspended and immobilised form for the photocatalytic degradation of nitrobenzenesulfonic acids. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2002; 37(4): 301-8.
- [17] Sriwong C, Wongnawa S, Patarapaiboolchaib O. Rubber sheet strewn with TiO_2 particles: Photocatalytic activity and recyclability. *Journal of Environmental Sciences*. 2012; 24(3): 464-72.
- [18] Lackner M. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons Inc: New Jersey; 2015.
- [19] Chanklom P, Yingratanasuk T, Chotigawin R, Suwannahong K. Improvement of PLATiO₂-composite film for photocatalytic VOCs degradation. *Conference of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*; 2020 April 6-9; Gold Coast, Australia. APSDEWES; 2020.

- [20] Tharasawatpipat C, Kreetachat T. Application of Photocatalytic Oxidation Technology in an Air Purifier for Benzene Removal by Using TiO_2 /PLA Film. *Suan Sunandha Science and Technology Journal*. 2019; 6(1): 1-5.
- [21] Heilala J, Ruusu R, Montonen J, Vatanen S. Product Concept Manufacturability and Sustainability Assessment with Eco Process Engineering System. *Sustainable Design and Manufacturing*. 2014: 875-86.
- [22] Prashar A. Eco-efficient production for industrial small and medium-sized enterprises through energy optimisation: framework and evaluation. *Production Planning & Control*. 2020: 32(3); 198-212.
- [23] Charlearmkwun M, Thirawat C. Application of Eco-Efficiency for the Sustainable Development of Automotive Parts Industry. *The Journal of Industrial Technology*. 2018; 14(1): 64-73.
- [24] Liu CY, Tseng CH, Wang HC, Dai CF, Shih YH. The Study of an Ultraviolet Radiation Technique for Removal of the Indoor Air Volatile Organic Compounds and Bioaerosol. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(14): 2557.
- [25] Liu H, Zhiwe L, Xiaojang Y, Wenfeng S. Kinetic analysis of photocatalytic oxidation of gas-phase formaldehyde over titanium dioxide. *Chemosphere*. 2005; 60(5): 630-5.
- [26] Ao CH, Lee SC, Yu JZ, Xu JH. Photodegradation of formaldehyde by photocatalyst TiO_2 : effects on the presences of NO , SO_2 and VOCs. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2004; 54(1): 41-50.
- [27] Boyjoo Y, Sun H, Liu J, Pareek VK, Wang S. A Review on Photocatalysis for Air Treatment: From Catalyst Development to Reactor Design. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 310(2): 537-59.