

การบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วย โอโซนเนชั่น

Treatment of Gaseous Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory using Ozonation

วิภาดา เดชปะปัญญา^{1,*}, สรรพาวุธ นนทกุล², สนั่น พุทธาบุญ¹, สมภพ สนองราษฎร์¹ และสุพัฒน์พงษ์ มัตราจ¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

² สำนักงานเทศบาลตำบลเมืองศรีโค เมืองศรีโค วารินชำราบ อุบลราชธานี 34190

Wipada Dechapanya^{1,*}, Sanpawoot Nontula², Sanan Phudthabun¹, Sompop Sanongraj¹ and Supatpong Mattaraj¹

¹Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubonratchathani, 34190, Thailand

²Office of the Mueang Si Khai Subdistrict Municipality, Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubonratchathani, 34190, Thailand

*Corresponding Author E-mail: wipada.d@ubu.ac.th

Received: Oct 25, 2021; Revised: Dec 23, 2021; Accepted: Dec 28, 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่ทำการศึกษ ได้แก่ อัตราการฟุ้งโอโซนและความเร็วพัดลมดูดอากาศ วิธีพินผิวตอบสนอง (RSM) แบบโมเดลส่วนประสมกลาง (CCD) ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ นอกจากนี้ยังได้หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองแรก สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาร่างอาจารย์ใหญ่โดยนักศึกษาแพทย์ และชุดการทดลองที่สอง สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาร่างอาจารย์ใหญ่โดยนักศึกษาพยาบาล ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่ได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างสูง (สูงกว่าร้อยละ 85) สำหรับทั้งสองกรณีศึกษา ประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จากการทำนายโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากโมเดล CCD ได้แก่ อัตราการฟุ้งโอโซนที่ 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศที่ 1.24 เมตรต่อวินาที

คำสำคัญ: ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์, โอโซนเนชั่น, ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์, การบำบัดก๊าซพิษ

Abstract

The main objective of this research was to study treatment of gaseous formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory (GAL) using the prototype of toxic gas purifier with ozonation. Factors affecting treatment removal efficiency include ozone dosage rate and air blower speed. Response Surface Methodology (RSM) with the Central Composite Design (CCD) model was applied to design the experimental sets and to analyze the statistical data. The optimal conditions for treatment of gaseous formaldehyde were also investigated. Two sets of experiment were conducted in which, the first set was for case study 1 (the cadaver studied by medical students) and the second set was for case study 2 (The cadaver studied by

nursing students). Results show that formaldehyde removal efficiencies received from most of experiments were relatively high (above 85%) for both case studies. Predicted removal efficiencies from the mathematical model were in good agreement with those from experimental data. The optimal conditions obtained from the CCD model were at the ozone dosage rate of 1,210 mg/hr and the air blower speed of 1.24 m/s.

Keywords: Gaseous formaldehyde, Ozonation, Gross Anatomy Laboratory (GAL), Toxic gas treatment

1. บทนำ

ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำไปใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตพาร์ทิเคิลบอร์ด การย้อมสีผ้า เพื่อปรับปรุงให้สีย้อมยึดติดแน่น อีกทั้งยังใช้เป็นสารประกอบในผลิตภัณฑ์และวัสดุต่าง ๆ (กาวประสานชิ้นงาน สี น้ำยาเคลือบเงา น้ำยาทำความสะอาด กระจกทึบ และเฟอร์นิเจอร์) ด้านการเกษตร ได้แก่ การผลิตสารที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ในดิน และใช้เป็นสารเคลือบผลผลิตทางการเกษตรไม่ให้เน่าเสีย อีกทั้งยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปใช้ในด้านทางการแพทย์ ได้แก่ การฆ่าเชื้อในโรงพยาบาล เครื่องมือทางการแพทย์ และใช้ในการเก็บรักษาเนื้อเยื่อทางกายวิภาค (Anatomical specimens) ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ไม่ให้เน่าเสีย [1] เมื่อไอระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมามีการสะสมเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลที่ปฏิบัติงานภายในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งอาการที่แสดงออกมากขึ้นกับปริมาณที่ได้รับ หากได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ตั้งแต่ 0.01 พีพีเอ็ม ไปจนถึง 30 พีพีเอ็ม จะก่อให้เกิดอาการระคายต่อผิวหนัง ดวงตา จมูก คอ และมีอาการไอ แน่นหน้าอก หากรับเข้าไปในปริมาณสูงกว่า 100 พีพีเอ็ม อาจทำให้มีโอกาเสียชีวิตได้ [2] นอกจากนี้ฟอร์มาลดีไฮด์ยังเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย ทั้งนี้ OSHA ได้กำหนดค่ามาตรฐานการปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในบรรยากาศการทำงาน ตลอดระยะเวลาการทำงาน 8 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 0.75 พีพีเอ็ม และกำหนดค่าจำกัดที่สามารถสัมผัสได้ในช่วงระยะเวลาสั้นสำหรับเก็บตัวอย่าง 15 นาที ต้องไม่เกิน 2 พีพีเอ็ม [3]

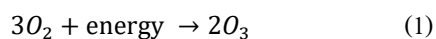
งานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาวิธีการและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศหลายวิธีการ Tseng et al. [4] ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วย

เครื่องฟอกอากาศชนิด ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) เครื่องฟอกอากาศที่มีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เครื่องฟอกอากาศที่มีการปล่อยประจุลบ (Negative ion) และเครื่องฟอกอากาศที่มีการใช้โอโซน (Ozone air cleaner) โดยมีตัวแปรสำคัญที่ศึกษา คือ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ เวลาที่ใช้ในการบำบัด 4 ชั่วโมง จากการทดสอบประสิทธิภาพเรียงลำดับจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุดดังนี้ เครื่องฟอกอากาศที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ร้อยละ 56.0) เครื่องฟอกอากาศด้วยการใช้โอโซน (ร้อยละ 44.2) เครื่องฟอกอากาศด้วยการปล่อยประจุลบ (ร้อยละ 30.8) และเครื่องฟอกอากาศด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 28.6) อีกทั้งยังพบว่า เครื่องฟอกอากาศด้วยโอโซนเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง เหมาะกับการใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

กระบวนการบำบัดด้วยโอโซน (Ozonation) เป็นเทคโนโลยีทางเลือกอย่างหนึ่ง ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีต้นทุนในการดำเนินการที่ถูกกว่าวิธีอื่น ๆ และยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จากการศึกษาก่อนหน้านี้ [5] พบว่าโอโซนสามารถใช้บำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องจำลองระบบปิดที่มีแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ผ่านกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOP) ซึ่งโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงเมื่อทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย (Final products) ได้แก่ CO_2 และ H_2O ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและ

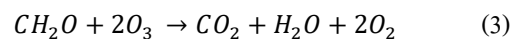
เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดด้วยวิธีนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจึงไม่จัดว่าเป็นก๊าซมลพิษ สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ทันที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเชิงเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย พบว่าการใช้โอโซนสามารถเป็นหนึ่งในทางเลือกสำหรับการบำบัดสารมลพิษที่สามารถระเหยง่าย เช่น ฟอรั่มัลดีไฮด์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและราคาถูก

การบำบัดก๊าซฟอรั่มัลดีไฮด์ด้วยโอโซนเป็นวิธีการใช้โอโซนที่ได้จากเครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) โดยให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าแรงดันสูงเพื่อทำให้ออกซิเจนแตกตัวเป็นออกซิเจนอะตอมเดี่ยว จากนั้นออกซิเจนอะตอมเดี่ยวจะจับตัวกับก๊าซออกซิเจนอีกครั้ง ทำให้ได้ก๊าซโอโซนออกมา แสดงดังสมการที่ (1) กลไกการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอรั่มัลดีไฮด์และโอโซนได้ถูกศึกษา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี BHandHLYP เพื่อทำนายวิถีการเกิดปฏิกิริยา (Pathway) ซึ่งวิถีการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีอยู่ทั้งหมด 14 วิถี นำไปสู่การเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 8 ตัว ได้แก่ P1 (HCCOOH+O₂), P2 (HCO+HOOO), P3 (H₂COO+O₂), P4 (cCH₂O₂+O₂), P5(HC(O)OO+OH), P6(HCO₂+HOO), P7 (CO₂+H₂O₂) และ P8 (CO₂+2OH) แสดงดังสมการที่ (2) อย่างไรก็ตามสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟอรั่มัลดีไฮด์และโอโซนมีเพียง 2 ตัวหลัก ได้แก่ P1 (HCCOOH+O₂) และ P2 (HCO+HOOO) เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ตั้งแต่ P3 ถึง P8 มีค่าการดูดพลังงานความร้อนสูงกว่า P1 และ P2 จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา [6]



ในการบำบัดอากาศเสีย โอโซนจะถูกป้อนเข้าไปในอากาศที่มีสารฟอรั่มัลดีไฮด์ปนเปื้อนอยู่ เพื่อทำการออกซิไดซ์ (Oxidize) ก๊าซฟอรั่มัลดีไฮด์ โดยตัวโอโซนเองเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidizing agent) จึงเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้ายที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของฟอรั่มัลดีไฮด์ด้วยโอโซน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน และน้ำ แสดงดังสมการที่ (3) [7] นอกจากนี้โอโซนซึ่งใช้เป็นสารออกซิไดซ์แล้ว ยังมีสาร

ออกซิไดซ์อื่น ๆ เช่น ก๊าซคลอรีน เป็นต้น แต่คลอรีนเป็นก๊าซพิษร้ายแรงและคงตัวอยู่ได้นานกว่าก๊าซโอโซน จึงไม่นิยมใช้กัน เนื่องจากก๊าซคลอรีนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรือก๊าซคลอรีนส่วนเกินจะระบายออกพร้อมอากาศอากาศที่ถูกบำบัด ส่งผลกระทบต่อผู้อยู่ในบริเวณรอบข้างได้ ดังนั้นก๊าซโอโซนเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรมากกว่าก๊าซคลอรีน ทั้งนี้โอโซนเองมีแนวโน้มที่จะสลายตัวกลับเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย และมีเวลาครึ่งชีวิตเพียง 7-10 นาที ในอากาศในอาคาร [8]

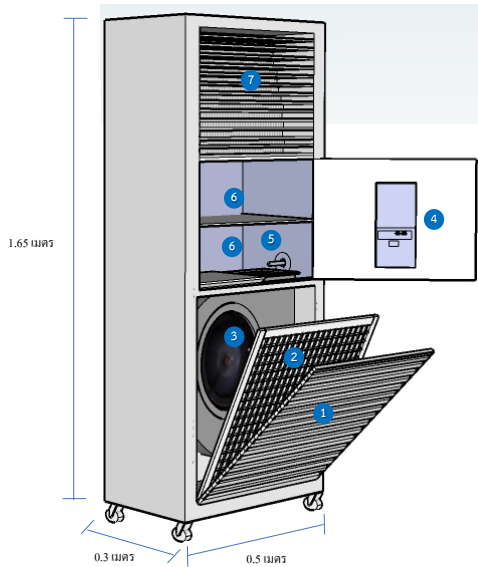


ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในอากาศในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นในขณะที่มีการใช้งานห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องที่ออกแบบและสร้างโดยคณะผู้วิจัย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบแบบไหลต่อเนื่อง เป็นเครื่องที่ออกแบบโดยคณะผู้วิจัยและสั่งประกอบ โดยมีขนาด 30 เซนติเมตร × 50 เซนติเมตร × 165 เซนติเมตร และมีระยะความยาวที่อากาศไหลผ่านโซนในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 4.7 เมตร โดยภายในตัวเครื่องติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อให้การไหลของอากาศในเครื่องเป็นแบบ plug flow เพื่อช่วยให้มีระยะเวลาสัมผัสกับโอโซนนานขึ้น และที่ด้านล่างของตัวเครื่องได้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ (Air blower) ซึ่งสามารถปรับความเร็วได้ทั้งหมด 10 ระดับ โดยมีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 0.85–2.11 เมตรต่อวินาที โดยขนาดและรายละเอียดของเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีองค์ประกอบดังนี้ 1) ฝาปิดแผ่นกรองอากาศ (Air filter cover) 2) แผ่นกรองอากาศ (Air filter) 3) พัดลมโบลเวอร์ (Blower) 4) แผงควบคุมความเร็วของโบลเวอร์ (Speed controller) 5) ท่อปล่อยโอโซน (Ozone inlet) 6) แผงกั้น (Baffles) และ 7) ช่องปล่อยอากาศที่ผ่านการบำบัด (Treated air outlet)



รูปที่ 1 ขนาดและรายละเอียดของเครื่องบำบัดก๊าซพิษ
ต้นแบบ

2. เครื่องกำเนิดโอโซน เป็นเครื่องสังประกอบ ซึ่งสามารถปรับอัตราการฟ่นโอโซน (Ozone dosage rate) ได้ในช่วงประมาณ 0–10,000 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยผลิตโอโซนจากออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศสะอาด โอโซนที่ผลิตได้จะถูกจ่ายเข้าไปยังเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยไหลผ่านท่อปล่อยโอโซนดังแสดงในรูปที่ 1 (หมายเลข 5)

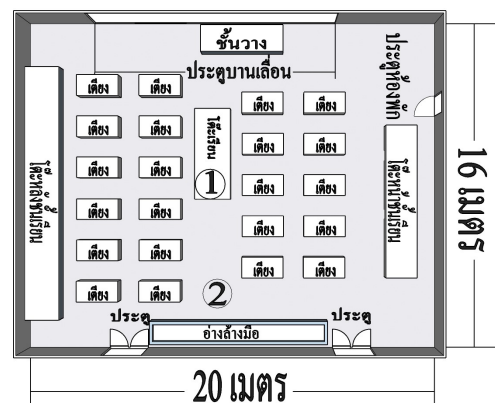
3. เครื่องวัดปริมาณก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์แบบพกพา Formaldehyde Meter/Monitor ซึ่งมีช่วงการวัดค่าตั้งแต่ 0–10 พีพีเอ็ม และมีค่าความละเอียด (Resolution) อยู่ที่ 0.01 พีพีเอ็ม จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9] ได้ทำการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ที่วัดด้วยเครื่องวัดแบบพกพาเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ได้โดยเครื่อง HPLC พบว่าค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 5

4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบดิจิทัล รุ่น DHT-1 (DAEYOON SCALE INDUSTRIAL, Seoul, Korea) ใช้ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์

2.2 ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์

ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ของภาควิชากายวิภาคศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีขนาด $16 \times 20 \times 3.5$ ลูกบาศก์เมตร โดยห้องปฏิบัติการมีลักษณะโปร่งแสงอาทิตย์สามารถเข้าถึง

ได้ตลอดจากประตูบานเลื่อนยาวจรดพื้น ซึ่งสามารถเลื่อนเปิดได้และติดตั้งอยู่เกือบตลอดความยาวของห้องทางฝั่งตรงข้ามกับประตูทางเข้า และมีประตูทางเข้าออก 3 ทาง มีรางอาจารย์ใหญ่ทั้งสิ้น 22 เตียง มีระบบดูดอากาศทั้งหมด 16 จุดในแต่ละจุดสามารถใช้ร่วมกัน 2 เตียง โดยระบบดูดอากาศจะต่อเข้ากับท่อบริเวณหัวเตียงเพื่อดูดระบายความเข้มข้นและกลิ่นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ออกไปในลักษณะการดูดอากาศจากในห้องลงสู่ระบบปล่องด้านล่างซึ่งต่อออกไปนอกอาคาร อีกทั้งยังมีระบบทำความเย็นกระจายอยู่ทั่วทั้งห้อง จำนวน 22 ช่อง โดยทั่วไปจะทำการเปิดระบบดูดอากาศเฉพาะวันที่มีการเรียนการสอน โดยเปิดก่อนเรียนอย่างน้อย 30 นาที แผนผังห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์และจุดตรวจวัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ (จุดที่ 1 บริเวณกลางห้อง) จุดติดตั้งเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ (จุดที่ 2 ใกล้ประตูทางเข้า) แสดงดังรูปที่ 2 ทั้งนี้จุดตรวจวัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์จะอยู่ห่างจากจุดติดตั้งเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบประมาณ 7 เมตร ซึ่งเป็นระยะรัศมีในการดูดอากาศของเครื่องบำบัด สำหรับจุดติดตั้งเครื่องบำบัดเลือกจุดที่ไม่รบกวนการเรียนการสอนของผู้ใช้ห้องปฏิบัติการ แต่ไม่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์จนเกินไป



รูปที่ 2 แผนผังการติดตั้งชุดเครื่องมือสำหรับตรวจวัดและ
บำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์

2.3 การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ก่อนการบำบัด

ก่อนการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 120 นาที (ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่

นักศึกษาแพทย์และพยาบาล ศึกษา ร่วอาจารย์ใหญ่ในห้องปฏิบัติการ) โดยทำการอ่านค่าทุก ๆ 5 นาที เพื่อเป็น Control experiment ซึ่งการตรวจวัดจะทำอย่างน้อย 2 ชั่วโมง และตรวจวัดทั้ง 2 กรณีศึกษา ได้แก่ 1) กรณีที่มีการเรียนการสอนและเปิดร่วอาจารย์ใหญ่เพื่อศึกษาระบบต่าง ๆ ในร่างกาย โดย นศ.แพทย์ และ 2) กรณีที่มีการเรียนการสอนและมีการเปิดร่วแต่ไม่มีการร่วอาจารย์ใหญ่ ซึ่งเป็นการศึกษาโดย นศ.พยาบาล ทั้งนี้ในกรณีที่ไม่มีกรเรียนการสอน ไม่ได้ทำการศึกษาผลการบำบัดเนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีผู้ใช้ห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ หรืออาจมีการใช้ในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งในการศึกษาทั้งสองกรณีมีข้อแตกต่างดังนี้คือ กรณีที่ 1 อาจารย์ใหญ่ที่ทำการศึกษาเป็นร่างใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการร่วร่างเพื่อศึกษา ส่วนกรณีที่ 2 เป็นการเรียนการสอนของนักศึกษาพยาบาลที่ศึกษาระบบอวัยวะต่าง ๆ ของอาจารย์ใหญ่ ซึ่งเป็นร่างอาจารย์ใหญ่นักศึกษาแพทย์ได้ทำการผ่าศึกษาแล้ว

2.4 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) แบบส่วนประสมกลาง (CCD) มาใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert (Trial Version 13, Stat-Ease, Inc., Minneapolis, MN, USA) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยโอโซน ซึ่งออกแบบให้การทดลองเป็นแบบสุ่ม กำหนดให้เป็น 2 ปัจจัย และมี 3 ระดับ ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนอัตราการฟั่นโอโซนและความเร็วอากาศที่ถูกดูดเข้าไปยังเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1 จากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการออกแบบการทดลอง ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 11 ชุด

ตารางที่ 1 ตัวแปรและค่าของตัวแปรที่ทำการศึกษาวิจัย

ปัจจัย	ค่าที่ศึกษา		
	ต่ำ	กลาง	สูง
อัตราการฟั่นโอโซน (D, มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	700	1,100	1,500
ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (v, เมตรต่อวินาที)	1.12	1.58	2.04

2.5 การบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวิธีโอโซนเนชั่น

ศึกษาการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการกายวิภาคศาสตร์ ในขณะที่มีการใช้ห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดตัวแปรหลักคือ อัตราการฟั่นโอโซน 3 ค่า ได้แก่ 700, 1,100 และ 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง โดยปรับความเร็วของพัดลมดูดอากาศ 3 ค่า ได้แก่ 1.12, 1.58 และ 2.04 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะส่งผลให้ระยะเวลาสัมผัสเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การบำบัดจะทำตามชุดการทดลองที่ได้จากโมเดล CCD ซึ่งทำการบำบัดจนค่าความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่สภาวะคงตัวหรือลดลงจนเหลือ 0 พีพีเอ็ม สำหรับแต่ละชุดการทดลอง และการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์จะอ่านค่าทุก ๆ 5 นาทีตั้งแต่ก่อนการบำบัดจนค่าเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อค่าที่ได้จากการทดลอง เช่น ระบบดูดอากาศและระบบทำความเย็นในห้องปฏิบัติการ ได้มีการควบคุมให้อยู่ในสภาวะเดียวกันตลอดการทดลองตั้งแต่ก่อนการบำบัดถึงสิ้นสุดการบำบัด ซึ่งแต่ละชุดการทดลองจะทำการบำบัด 2 ชั่วโมง

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design-Expert 13 (Trial version) โดยพิจารณาจากค่า P เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) ซึ่งค่า P ที่ได้จากการทดลองในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 95 ซึ่งที่ความเชื่อมั่นระดับนี้ให้ค่าความถูกต้องและมีความเหมาะสม โดยที่ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบต่อร้อยละของการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อค่าการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์

2) วิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองกำลังสอง เมื่อผลการทดลองอยู่ในจุดที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุด โดยนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (4) [10]

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4)$$

โดยที่ y	คือ ตัวแปรผลตอบสนอง
X_i, X_j	คือ ปัจจัยการทดลอง
k	คือ จำนวนปัจจัยทั้งหมด
β_0	คือ ค่าคงที่
$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$	คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย
$\sum_{i=1}^k \beta_i X_i$	คือ เทอมของอิทธิพลเชิงเส้น (Linear Effect)
$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_{ii}^2$	คือ เทอมของอิทธิพลกำลัง สอง (Quadratic Effect)
$\sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$	คือ เทอมของอิทธิพลร่วม (Cross-product Effect)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA, Analysis Of Variance) ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์

3) ตรวจสอบความถูกต้อง (Model Adequacy Checking) ของแบบจำลองเพื่อสังเกตความเหมาะสมของข้อมูล ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4) นำสมการทำนายไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปร ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์โดยฟังก์ชันผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimizers)

5) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ด้วยกราฟของตัวแปรพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot)

2.7 การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency, R.E.) ก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบร่วมกับการใช้โอโซน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$R.E. = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \quad (5)$$

โดยที่ $R.E.$	คือ ประสิทธิภาพการกำจัด ณ จุดสมดุล
C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย (พีพีเอ็ม)
C_e	คือ ความเข้มข้นเฉลี่ย ณ จุดสมดุล (พีพีเอ็ม)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ก่อนการบำบัด

ผลการตรวจวัดค่าความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการ ก่อนการบำบัดด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ ทั้ง 2 กรณีศึกษา คือกรณีที่ 1 มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ เพื่อศึกษาระบบต่าง ๆ ในร่างกาย และกรณีที่ 2 ไม่มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ พบว่าค่าความเข้มข้นก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ที่ทำการตรวจวัดในช่วงเวลา 120 นาที มีค่าใกล้เคียงกันตลอดช่วงการตรวจวัด โดยมีค่าอยู่เฉลี่ยเท่ากับ 3.58 ± 0.074 พีพีเอ็ม และ 1.29 ± 0.019 พีพีเอ็ม สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์

ผลการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ในการศึกษา และกรณีศึกษาที่ 2 ไม่มีการเปิดผาร่างอาจารย์ใหญ่ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการบำบัดและค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล และประสิทธิภาพการกำจัดดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในห้องปฏิบัติการสำหรับทั้งสองกรณีศึกษา พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25–29 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 55–70 ผลจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เท่ากับ ร้อยละ 100 ที่อัตราการฟั่นไอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.58 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 10)

สำหรับการบำบัดที่อัตราการฟั่นไอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.12 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 9) ไม่มีข้อมูลการบำบัดเนื่องจากเมื่อเริ่มเปิดเครื่องบำบัดก๊าซพิษ สังเกตได้ว่ามีกลิ่นของไอโซนตั้งแต่เริ่มการบำบัดในห้องปฏิบัติการ ทำให้ผู้วิจัยจำเป็นต้องหยุดการบำบัดสำหรับกรณีนี้ เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพและการฝึกปฏิบัติการของนักศึกษาและบุคลากรในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสาเหตุที่มี

กลิ่นของโอโซนอาจเป็นผลเนื่องมาจากที่ความเร็วพัดลม 1.12 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำทำให้มีปริมาณของอากาศปนเปื้อนที่ถูกดูดเข้ามาในเครื่องบำบัดน้อย เมื่อใช้อัตราการฟั่นโอโซน 1,500 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้มีปริมาณโอโซนมากเกินไปในการทำปฏิกิริยากับก๊าซฟอสฟอรัสที่ที่ถูกดูดเข้ามาในเครื่องบำบัด ทำให้มีโอโซนเหลือตกค้างจากการทำปฏิกิริยา ส่งผลให้มีกลิ่นของโอโซนในห้องปฏิบัติการสำหรับการบำบัดในชุดทดลองนี้ ผลการบำบัดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 พบว่าค่าประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 100 ที่อัตราการฟั่นโอโซน 1,500 มิลลิกรัม

ต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.58 เมตรต่อวินาที (ชุดการทดลองที่ 10) สำหรับการบำบัดในชุดการทดลองที่ 1, 4 และ 9 ที่ความเร็วพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 1.12 เมตรต่อวินาที ไม่สามารถทำการบำบัดได้ ที่ทุกอัตราการฟั่นโอโซน เนื่องด้วยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอสฟอรัสในห้องปฏิบัติการมีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ถูกดูดเข้ามาบำบัดน้อย จึงส่งผลให้มีปริมาณโอโซนส่วนเกินในชุดการทดลองดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงต้องยุติการบำบัดเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุผลดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ จึงทำให้ไม่มีผลในการบำบัด

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอสฟอรัสสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ชุดทดลอง.	อัตราการฟั่นโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
1	700	1.12	4.10 ± 0.141	0.39 ± 0.057	90.46 ± 1.709
2	700	1.58	3.13 ± 0.021	0.36 ± 0.000	88.48 ± 0.078
3	700	2.04	3.07 ± 0.042	0.68 ± 0.000	77.85 ± 0.306
4	1,100	1.12	5.35 ± 0.175	0.08 ± 0.057	98.33 ± 0.782
5	1,100	1.58	3.02 ± 0.028	0.06 ± 0.000	98.01 ± 0.019
6	1,100	1.58	3.07 ± 0.042	0.11 ± 0.000	96.42 ± 0.049
7	1,100	1.58	3.07 ± 0.058	0.11 ± 0.006	96.30 ± 0.163
8	1,100	2.04	3.55 ± 0.188	0.05 ± 0.006	98.50 ± 0.081
9	1,500	1.12	NA	NA	NA
10	1,500	1.58	3.44 ± 0.021	0.00 ± 0.000	100.00 ± 0.000
11	1,500	2.04	2.52 ± 0.014	0.05 ± 0.014	98.01 ± 0.572

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอสฟอรัสสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ชุดทดลอง.	อัตราการฟั่นโอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
1	700	1.12	NA	NA	NA
2	700	1.58	1.44 ± 0.021	0.18 ± 0.007	87.81 ± 0.313

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

ชุดทดลอง.	อัตราการฟุ้งไอโซน (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ความเข้มข้น. (พีพีเอ็ม)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
			C_o	C_e	
3	700	2.04	1.32 ± 0.040	0.49 ± 0.015	62.55 ± 0.067
4	1,100	1.12	NA	NA	NA
5	1,100	1.58	1.33 ± 0.071	0.03 ± 0.000	97.74 ± 0.120
6	1,100	1.58	1.35 ± 0.049	0.03 ± 0.000	97.77 ± 0.082
7	1,100	1.58	1.30 ± 0.021	0.03 ± 0.000	97.69 ± 0.038
8	1,100	2.04	1.84 ± 0.028	0.14 ± 0.000	92.39 ± 0.117
9	1,500	1.12	NA	NA	NA
10	1,500	1.58	1.44 ± 0.021	0.02 ± 0.000	100.00 ± 0.000
11	1,500	2.04	1.37 ± 0.021	0.05 ± 0.000	98.61 ± 0.021

3.3 ผลการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์และสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ โดยใช้โปรแกรม RSM

ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ที่ได้จากการทดลองสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 กับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้โปรแกรม Design-Expert 13 (Trial version) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากโปรแกรม RSM เพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยไอโซนแสดงดังสมการที่ (6) ซึ่งมีรูปแบบสมการเป็นแบบโมเดล Quadratic โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ANOVA) พบว่า ค่า P ของโมเดลมีค่าเท่ากับ 0.0084 แสดงว่าโมเดลมีนัยสำคัญ ค่า lack of fit ของโมเดลมีค่า 0.0769 แสดงว่าไม่มีนัยสำคัญ และค่า P ของตัวแปร D (Ozone dosage rate) และ D^2 มีค่าเท่ากับ 0.0014 และ 0.0329 แสดงว่าอัตราการฟุ้งไอโซน มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนค่า P ของเทอมอื่นๆ ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้มีค่ามากกว่า 0.05 ทุกเทอม แสดงว่าไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัด

$$\begin{aligned}
 R.E. = & 67.35725 + 0.061231 \times D \\
 & - 10.83943 \times v \\
 & + 0.014429 \times D \times v \\
 & - 0.000030 \times D^2 \\
 & - 3.24719 \times v^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ Optimization จากโปรแกรม RSM โดยสร้างกราฟเส้นระดับและกราฟสามมิติซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการบำบัดและผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 (ดังรูปที่ 3) จากรูปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการฟุ้งไอโซน แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความเร็วพัดลมดูดอากาศเพิ่มขึ้น

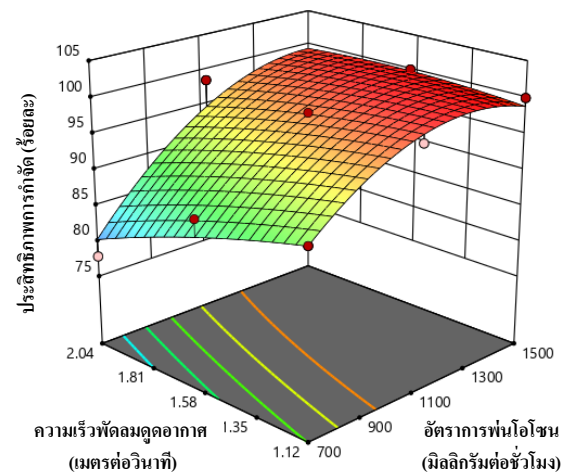
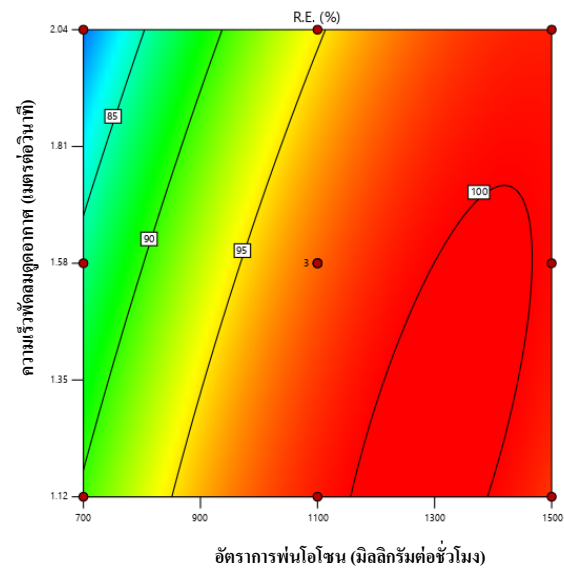
การหาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษดันแบบ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Expert Design 13 (Trial version) โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่ต้องการมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 ผลจากการทำนาย พบว่าสถานะการบำบัดที่เหมาะสมที่โปรแกรมแนะนำคือที่อัตราการฟุ้งไอโซน 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.24 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวใช้อัตราการฟุ้งไอโซนที่ไม่สูงเกินไปทำให้ลดค่าใช้จ่ายใน

การผลิตโอโซนจากออกซิเจนบริสุทธิ์และไม่มีโอโซนเหลือตกค้างจนก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ห้องปฏิบัติการ

เมื่อได้แบบจำลองคณิตศาสตร์จาก โปรแกรม RSM แล้ว ต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ (Model validation) โดยใช้สมการที่ (6) ไปทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 เทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 5) โดยตัดชุดการทดลองที่ไม่มีผลการบำบัดออก (ชุดที่ 1, 4 และ 9) ผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ผลจากการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้(สมการที่ (6)) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้สามารถใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งสองกรณีศึกษา

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดจากการทดลองและการทำนายจาก โปรแกรม RSM

ชุดการทดลอง	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	การทำนาย
1	90.46 ± 1.709	90.43
2	88.48 ± 0.078	86.05
3	77.85 ± 0.306	80.31
4	98.33 ± 0.782	99.50
5	98.01 ± 0.019	97.79
6	96.42 ± 0.049	97.79
7	96.30 ± 0.163	97.79
8	98.50 ± 0.081	94.69
9	NA	98.86
10	100.00 ± 0.000	99.79
11	98.01 ± 0.572	99.36



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการบำบัดและผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซฟอรัลดีไฮด์ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (กรณีศึกษาที่ 1)

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ (เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากกรณีศึกษาที่ 2)

ชุดการทดลอง.	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	แบบจำลองคณิตศาสตร์
2	87.81 ± 0.313	86.24
3	62.55 ± 0.067	80.50
5	97.74 ± 0.120	98.26
6	97.77 ± 0.082	98.26

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ (เปรียบเทียบกับผลการทดลองจากกรณีศึกษาที่ 2) (ต่อ)

ชุดการทดลอง.	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	
	การทดลอง	แบบจำลองคณิตศาสตร์
7	97.69±0.038	98.26
8	92.39±0.117	95.16
10	100.00±0.000	100.67
11	98.61±0.021	100.23

4. อภิปรายผลและสรุป

4.1 อภิปรายผล

ผลการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบซึ่งใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า ร้อยละ 85 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 2 ชั่วโมง ยกเว้นชุดการทดลองที่ 3 ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่า ร้อยละ 85 สำหรับทั้งสองกรณีศึกษา ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim et al. [11] ซึ่งศึกษาการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้โอโซนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดได้สูงถึง ร้อยละ 100 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng et al. [12] ซึ่งได้ศึกษาการกำจัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน Nano-TiO_2 (Fe/TiO_2) ร่วมกับโอโซนเนชั่น พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 95 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์จากงานวิจัยดังกล่าวต้องใช้กระบวนการผสมทั้งโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันร่วมกับโอโซนเนชั่นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดสูง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Wilamat et al. [13] ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการ

กำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ag/TiO_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้รังสียูวีซี (254 นาโนเมตร) และหลอดฟลูออเรสเซนต์ (ความเข้มแสง 1,030 ลูเมน) 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด เป็นแหล่งพลังงานการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา จากผลการศึกษาการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ ร้อยละ 37.93 ± 4.52 และ ร้อยละ 5.93 ± 4.13 ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในอากาศโดยการใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แผ่นลวดไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ เท่ากับ ร้อยละ 61.03 ± 5.39 และ ร้อยละ 27.20 ± 1.81 ตามลำดับ ส่วนการบำบัดโดยใช้แผ่นลวดซิลเวอร์-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้รังสียูวีซีและแสงฟลูออเรสเซนต์ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ ร้อยละ 66.43 ± 3.29 และ ร้อยละ 68.33 ± 1.15 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่างานวิจัยนี้ค่อนข้างมาก และจากงานวิจัยของ Liang et al. [14] ซึ่งทำการศึกษการบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ TiO_2/UV , $\text{Ag/TiO}_2/\text{UV}$ and $\text{Ce/TiO}_2/\text{UV}$ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 95 ที่ระยะเวลาในการบำบัด 8 ชั่วโมง ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้แต่ใช้เวลาในการบำบัดนานกว่า

4.2 สรุป

การบำบัดก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบโดยใช้กระบวนการโอโซนเนชั่น ในขณะที่มีการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากกว่า ร้อยละ 85 สำหรับที่สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ในช่วง 5.50–1.10 พีพีเอ็ม ดังนั้นเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีการเรียนการสอนในลักษณะคล้ายกัน และจากการศึกษาสภาวะการบำบัดที่เหมาะสมที่สุดด้วย

วิธีการ RSM โดยใช้โมเดลส่วนประสมกลาง ผลจากการทำนายพบว่าสภาวะการบำบัดที่เหมาะสมที่โมเดลแนะนำคือที่อัตราการฟ่นไอโซน 1,210 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 1.24 เมตรต่อวินาที

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณวิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์คณะผู้วิจัยในการเข้าไปใช้สถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ สำนักงานวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนเงินงบประมาณในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] The United States Environmental Protection Agency (US.EPA.). "Facts About Formaldehyde." epa.gov. <https://www.epa.gov/formaldehyde/facts-about-formaldehyde#whatisformaldehyde>. (accessed: Jul 5, 2021)
- [2] S. Dangruang, "The study of health impact assessment of workers from formaldehyde exposure, melamine faced board processing industry case study," Master dissertation, Dept. Envi. Sci., Silpakorn Univ., Bangkok, Thailand, 2011.
- [3] Occupational Safety and Health Administration (OSHA.). "OSHA Fact Sheet, Formaldehyde." odu.edu <https://www.odu.edu/content/dam/odu/offices/environmental-health-safety/docs/formaldehyde.pdf>. (accessed: Jun 29, 2021)
- [4] C. H. Tseng, C. D. Hsieh and S. S. Chen, "The Removal of Indoor Formaldehyde by Various Air Cleaners," in *Proc. the 98th A&WMA Annual Conf.* Minneapolis, MN, USA, June 21–24, 2005, pp. 457–469.
- [5] W. Dechapanya, W. and S. Nontula, "Treatment of Gaseous Formaldehyde with Continuous Source in a Closed Modeling Room Using Ozonation," *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 31, no. 1, p. 37–43, 2017.
- [6] F. Wang, H. Sun, J. Sun, X. Jia, Y. Zhang, Y. Tang, X. Pan, Z. Su, L. Hao and R. Wang, "Mechanistic and Kinetic Study of $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_3$ Reaction," *The Journal of Physical Chem. A*, vol. 114, no. 10, p. 3516–3522, 2010, doi: 10.1021/jp910754b.
- [7] J. W. Li, K. L. Pan, S. J. Yu, S. Y. Yan and M. B. Chang, "Removal of Formaldehyde over $\text{Mn}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$ Catalysts: Thermal Catalytic Oxidation versus Ozone Catalytic Oxidation," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 26, no. 12, p. 2546–2553, 2014, doi: 10.1016/j.jes.2014.05.030.
- [8] C. J. Weschler, "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry," *Indoor Air*, vol. 10, p. 269–288, 2000, doi: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x
- [9] W. Dechapanya, W. S. Nontula and Phudthabun, S. "Design and Creation of Prototype Reactor for Treatment of Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory," in *Proc. the 19th National Environmental Conf.* Chiang Rai, Thailand, October 7–9, 2020, pp. 328–335.
- [10] A. Chanpirak, P. Dumnin and A. Hongpuay, "Optimization of Oil Extraction from Spent Coffee Grounds (*Coffea canephora* var. *robusta*/Coffea Arabica) by Hexane Using Response Surface Methodology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, p. 799–811, 2018.
- [11] M. Kim, E. Park and J. Jurng, "Oxidation of Gaseous Formaldehyde with Ozone over $\text{MnO}_x/\text{TiO}_2$ catalysts at Room Temperature (25°C)," *Powder Technology*, vol. 325, p. 368–372, 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.10.031.
- [12] S. W. Cheng, Y. H. Li, C. S. Yuan, P. Y. Tsai, H. Z. Shen and C. H. Hung, "An Innovative Advanced Oxidation Technology for Effective Decomposition of Formaldehyde by Combining Iron Modified Nano- TiO_2 (Fe/TiO_2) Photocatalytic Degradation with Ozone

- Oxidation.” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 18, p. 3220–3233, 2018, doi: 10.4209/aaqr.2018.05.0156.
- [13] J. Wilamat, N. Bunchudam, and A. Jaicoey, “Removal of Formaldehyde in Air using Silver-Doped TiO₂ Coated on Stainless Steel Wire under Fluorescent Light,” A Special Project, Faculty of Science, KMITL, Bangkok, Thailand, 2017.
- [14] W. Liang, J. Li and Y. Jin, “Photo-catalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde by TiO₂/UV, Ag/TiO₂/UV and Ce/TiO₂/UV.” *Building and Environment*, vol. 51, p. 345–350, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.12.007.