



การบำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ในห้องเรียนตึกกายวิภาคศาสตร์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น
โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมแบบส่วนประสมกลาง (CCD)

TREATMENT OF GASEOUS FORMALDEHYDE IN A CLASSROOM OF ANATOMY BUILDING
USING OZONATION WITH THE APPLICATION OF CENTRAL COMPOSITE DESIGN MODEL

ณัฐพงษ์ คำภีภาค¹, ศิริรัตน์ บุญธรรม¹, วิภาดา เดชะปัญญา^{2*}, ปวีณา ลิมปิทีปราการ³, สมภพ สนองราษฎร์²,
สุพัฒน์พงษ์ มัตราจ², เทียมมะณีรัชต์ รัตนวิระพันธ์³ และกรรณิกา รัตนพงษ์เลขา²

¹นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

³อาจารย์ประจำกลุ่มวิชาสาธารณสุขศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*Corresponding author, E-Mail: wipada.d@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบและประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ภายในห้องเรียน SY105 ตึกกายวิภาคศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design Model, CCD Model) ในการออกแบบการทดลอง ซึ่งสภาวะการบำบัดที่ศึกษา ได้แก่ อัตราการฟั่นโอโซน (700 mg/hr, 1,100 mg/hr และ 1,500 mg/hr) และความเร็วพัดลมดูดอากาศ (1.12, 1.58 และ 2.04 m/s) ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราการฟั่นโอโซน 1,500 mg/hr และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 2.04 m/s มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ที่ 62.45±2.07% และเป็นสภาวะเหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert V. 13

คำสำคัญ: ก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์; โอโซนเนชั่น; การบำบัด; โปรแกรมสำเร็จรูปแบบส่วนประสมกลาง

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the optimal treatment condition; ozone dosage and fan speed of the air purifier, and the removal efficiency of gaseous formaldehyde in the SY105 classroom of Anatomy building, College of Medicine and Public Health. The Central Composite Design (CCD) model was applied for experimental design. Treatment conditions studied include ozone dosage rate (700 mg/hr, 1,100 mg/hr, and 1,500 mg/hr) and air blower speed (1.12, 1.58, and 2.04 m/s). The results showed

Nattpong Kampipak¹, Sirirat Boonthum¹, Wipada Dechapanya^{2*}, Pawena Limpiteeprakan³, Sompop Sanongraj², Supatpong Mattaraj², Tiammanee Rattanaweerapan², and Karnika Ratanapongleka²

¹Student in Environmental Engineering Program, Department of Chemical Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand.

²Instructor in Chemical Engineering Department, Ubon Ratchathani University, Thailand.

³Instructor in Public Health Sub-Division, College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University, Thailand.

that at the ozone dosage rate of 1,500 mg/hr and the air blower speed of 2.04 m/s, the highest removal efficiency of gaseous formaldehyde ($62.45 \pm 2.07\%$) was obtained. These conditions were also found to be the optimal condition yielding the most effective treatment of gaseous formaldehyde with ozonation using the package Design Expert V. 13.

KEYWORDS: gaseous formaldehyde; ozonation; treatment; The Central Composite Design model

1. บทนำ

สารฟอร์มาลีน (Formalin) เป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่าเป็น “น้ำยาฉีดศพ” เป็นสารที่สามารถรักษาสภาพของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทางห้องปฏิบัติการ [1] ฟอร์มาลีนที่ใช้กันทั่วไป เตรียมได้จากการผสมฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) กับน้ำ ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ประมาณ 37-50% โดยน้ำหนัก และมีส่วนผสมของเมทานอลประมาณ 10-15% ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารจำพวกแอลดีไฮด์ที่มีสถานะเป็นก๊าซที่ระเหยได้ง่าย ไม่มีสี เป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดพิษที่มีผลระคายเคืองต่อตาและระบบทางเดินหายใจ และเป็นสารก่อมะเร็ง [2-3] ฟอร์มาลดีไฮด์มีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างไปจากสารประกอบในกลุ่มแอลดีไฮด์ทั่วไป เนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์มีไฮโดรเจนเพียงอะตอมเดียวที่เกาะกับหมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) และไม่มีอนุภาคของหมู่อัลคิลในโมเลกุล จึงเป็นสารที่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ง่าย โดยปกติสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์นี้จะไม่เสถียรเมื่อเก็บไว้นาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงจะกลายเป็นกรดฟอร์มิก ดังนั้นจึงมีการเติมสารยับยั้งหรือที่เรียกว่าสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวสแตบิไลเซอร์ เช่น เมทานอล 5-15% โดยน้ำหนัก ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำไปใช้หลากหลายในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตพาร์ทิเคิลบอร์ด การย้อมสีผ้าเพื่อปรับปรุงให้สีย้อมยึดติดแน่น อีกทั้งยังใช้เป็นสารประกอบในผลิตภัณฑ์และวัสดุต่าง ๆ เช่น กาวประสานชิ้นงาน สี น้ำยาเคลือบเงา น้ำยาทำความสะอาด กระจกทึบ และเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ด้านการเกษตร ได้แก่ การผลิตสารที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ในดิน และใช้เป็นสารเคลือบผลผลิตทางการเกษตรไม่ให้เน่าเสีย อีกทั้งยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการนำไปใช้ในด้านทางการแพทย์ ได้แก่ การฆ่าเชื้อของเครื่องมือทางการแพทย์ในโรงพยาบาล และใช้ในการเก็บรักษาเนื้อเยื่อทางกายวิภาค (Anatomical specimens) ไม่ให้เน่าเสีย [4]

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นหนึ่งในมลพิษอากาศภายในอาคารที่สำคัญ ซึ่งถ้าได้รับสัมผัสไอรระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์และมีการสะสมเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของบุคคลที่ปฏิบัติงานในสถานที่ที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากความเข้มข้นของสารฟอร์มาลดีไฮด์ที่ร่างกายได้รับสูงเกิน 0.1 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองต่อ ตา จมูก และทางเดินหายใจ แต่ถ้าได้รับปริมาณเข้มข้นสูงเกิน 100 ppm อาจทำให้หมดสติและอาจถึงแก่ชีวิตในที่สุด เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูง ๆ สารฟอร์มาลีนจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดฟอร์มิก (Formic acid) ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายระบบการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ [5] นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Arts et al. [5] ซึ่งทำงานวิจัยเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการหาปริมาณการได้รับสารฟอร์มาลดีไฮด์ที่ก่อให้เกิดมะเร็ง พบว่าคนงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมีชนิดนี้ที่ระดับสูงกว่า 1 ppm มีโอกาสที่จะเกิดอาการระคายเคืองต่อประสาทสัมผัสทางตา และจมูก และมีโอกาสกลายเป็นมะเร็งโพรงจมูกในอนาคตต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง งดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีอันตราย พ.ศ. 2560 ที่ได้กำหนดค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฟอร์มาลดีไฮด์ตลอดระยะเวลาทำงานปกติ 8 ชั่วโมง (Time Weighted Average, TWA) ไม่เกิน 0.75 ppm และค่าความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลาจำกัด (Short Term Exposure Limit, STEL) 15 นาที ไม่เกิน 2 ppm [6]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) กระบวนการโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Photocatalytic oxidation) และกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced oxidation) เป็นต้น กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ เนื่องจากมีต้นทุนในการดำเนินการที่ต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ สารมลพิษถูกทำลายหรือถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้จากการศึกษาก่อนหน้านี้ [7] พบว่าโอโซนสามารถใช้บำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องจำลองระบบปิดที่มีแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ผ่านกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Process, AOP) โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidizing agent) มีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) ค่อนข้างสูง (2.07 V) ซึ่งเป็นค่าที่บอกแนวโน้มการเข้าทำปฏิกิริยากับสารชนิดอื่น โดยโอโซนมีค่าความแรงของการออกซิไดซ์สูงกว่าออกซิเจนและคลอรีนประมาณ 5 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ โอโซนถึงแม้จะเป็นก๊าซพิษแต่เป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวออกเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย และมีเวลาครึ่งชีวิตเพียง 12 hr ในบรรยากาศ [8] โอโซนสามารถนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรค การบำบัดกลิ่นและสารอินทรีย์ระเหยง่าย ทั้งในน้ำและอากาศ [9] โดยโอโซนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ เช่น ฟอร์มาลดีไฮด์จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวสุดท้าย (Final products) ได้แก่ CO_2 , H_2O และ O_2 ดังสมการที่ 1 [7] ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การบำบัดด้วยวิธีนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจึงไม่จัดว่าเป็นก๊าซมลพิษ สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ทันที



จากงานวิจัยของ ชิดาพร และคณะ [10] พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียนตึกกายวิภาคศาสตร์มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน การนำกระบวนการ โอโซนเนชันเพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศในห้องเรียนตึกกายวิภาคศาสตร์ ก่อนการใช้งานห้องเรียนสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้เข้าใช้ห้องเรียนได้ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสำหรับห้องเรียนดังกล่าว ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการศึกษาความเร็วพัดลมของเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบและอัตราการปน โอโซนที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยกระบวนการโอโซนเนชัน โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการศึกษาวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบแบบไหลต่อเนื่อง (Air purifier) เป็นเครื่องที่ออกแบบโดยคณะผู้วิจัยและสังประกอบโดยตัวเครื่องมีขนาด 30 cm x 50 cm x 165 cm ภายในตัวเครื่องติดตั้งแผ่นกั้นเพื่อให้การไหลของอากาศในเครื่องเป็นแบบ plug flow มีระยะความยาวที่อากาศไหลผ่านโซนในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 4.7 m จึงทำให้มีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) ระหว่างก๊าซพิษ

3.3 การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

งานวิจัยนี้ใช้วิธีพินิจตอบสนอง (RSM) แบบส่วนประสมกลาง (CCD) ในการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert (Trial Version 13) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ ซึ่งออกแบบให้การทดลองเป็นแบบสุ่ม โดยทำการศึกษา 2 ปัจจัย ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ อัตราการพ่นไอ โซนและความเร็วพัดลมดูดอากาศ ซึ่งแต่ละปัจจัยทำการแปรผันค่า 3 ระดับ ดังนี้ ปริมาณการพ่นไอ โซน 700, 1,100 และ 1,500 mg/hr และ ความเร็วลมดูดอากาศ 1.12, 1.58 และ 2.04 m/s โดยทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 3 ซ้ำ และมีระยะ α เท่ากับ 1 ซึ่งได้ชุดการทดลองทั้งหมด 11 ชุด

3.4 การเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียน SY105

การเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศในห้องเรียน ใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ 36.5% w/w เกรดวิเคราะห์ Univar® Analytical Reagents Product Range ยี่ห้อ Ajax Finechem (Australia) หยดลงในจานเพาะเชื้อประมาณ 2 ml จำนวน 6 plates โดยวางทิ้งไว้ให้ระเหยประมาณ 1 hr 30 min บริเวณมุมห้องทั้ง 6 จุด ซึ่งค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งแตกต่างกันตามอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเรียน SY105 แต่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยอยู่ในช่วงประมาณ 1.15±0.007- 1.22±0.014 ppm โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วง 27.0-28.6 °C และ 67.3-87.3% ตามลำดับ

3.5 การศึกษาการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียนในตึกกายวิภาคศาสตร์โดยใช้เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียน ทำการศึกษาวิจัยในภาคการศึกษาปลายของปีการศึกษา 2563 ในช่วงเดือนตุลาคม 2563 – กุมภาพันธ์ 2564 เวลาประมาณ 13:00 – 17:00 น. โดยในขณะที่ทำการวิจัยไม่มีผู้ใช้ห้องเรียน ทั้งนี้ในแต่ละชุดทดลองที่ได้จากโมเดลได้ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยวัดค่าความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ทุก 5 min ตั้งแต่ก่อนการบำบัดจนถึงสิ้นสุดการบำบัด เป็นระยะเวลาทั้งหมด 90 min

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพินิจตอบสนอง ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design-Expert V.13 (Trial version) โดยพิจารณาจากค่า P เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนอง (Response) ซึ่งใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% โดยหากค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบต่อร้อยละของการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ถ้าค่า P มากกว่า 0.05 แสดงได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์

2) วิเคราะห์พินิจตอบสนองกำลังสอง เมื่อผลการทดลองอยู่ในจุดที่ใกล้เคียงจุดที่ดีที่สุดโดยนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 2 [11] โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ได้มาจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์

3) ตรวจสอบความถูกต้อง (Model accuracy checking) ของแบบจำลองเพื่อสังเกตความเหมาะสมของข้อมูล ซึ่งหลังจากที่ได้มีการตรวจสอบรูปแบบจะทำให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4) นำสมการทำนายไปหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปร ที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของร้อยละการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์โดยฟังก์ชันผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response optimizers)

5) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ด้วยกราฟของตัวแปรพื้นผิวตอบสนอง (Response surface plot)

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

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)
$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2$	คือ เทอมของอิทธิพลกำลังสอง (Quadratic Effect)
$\sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$	คือ เทอมของอิทธิพลร่วม (Cross-product Effect)

3.7 การคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์

ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$R. E. = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (3)$$

โดยที่ $R. E.$	คือ ประสิทธิภาพในการบำบัด ที่เวลาในการบำบัด 90 min
C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ (ppm)
C_t	คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ ที่เวลาในการบำบัด 90 min (ppm)

4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

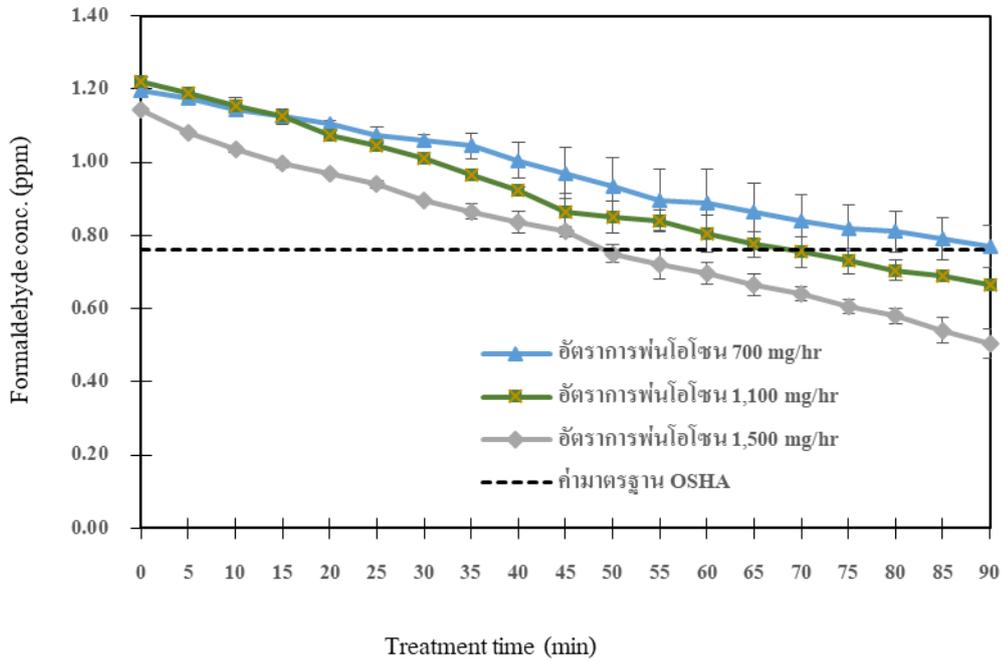
4.1 ลักษณะห้องเรียน SY105 ตึกกายวิภาคศาสตร์

จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ลักษณะทั่วไปของห้อง SY105 มีลักษณะโปร่ง แสงอาทิตย์สามารถเข้าถึงได้ตลอดจากหน้าต่างบานเลื่อนยาวจรดพื้น ซึ่งสามารถเลื่อนปิดเปิดได้และติดตั้งอยู่ตลอดความยาวของหลังห้อง ภายในห้องมีขนาด $9.6 \times 6.7 \times 3.5 \text{ m}^3$ และมีประตูทางเข้าออกเพียงทางเดียว

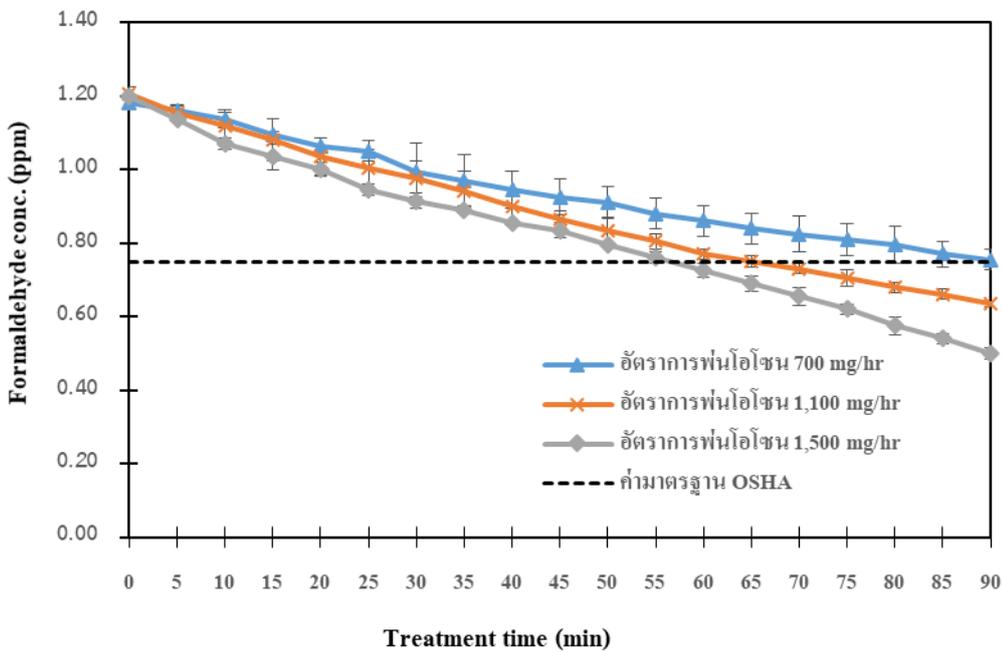
4.2 ผลการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียน SY105 มีตัวแปรหลัก 2 ตัวแปร คือ 1) อัตราการฟ่นโอโซน (Ozone dosage rate) แปรผัน 3 ค่า ได้แก่ 700, 1,100, และ 1,500 mg/hr และ 2) ความเร็วพัดลมดูดอากาศ แปรผัน 3 ค่า ได้แก่ 1.12, 1.58 และ 2.04 m/s ซึ่งจะทำให้มีระยะเวลาสัมผัส (Contact time) เท่ากับ 4.19, 2.97 และ 2.30 s ตามลำดับ การบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ ศึกษาโดยการเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้องเรียน SY105 ดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.4 ซึ่งค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งแตกต่างกันเล็กน้อยตามสภาพอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องเรียน SY105 ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้น เมื่อวางแหล่งกำเนิดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ทิ้งไว้โดยไม่ได้บำบัด พบว่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ในอากาศมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

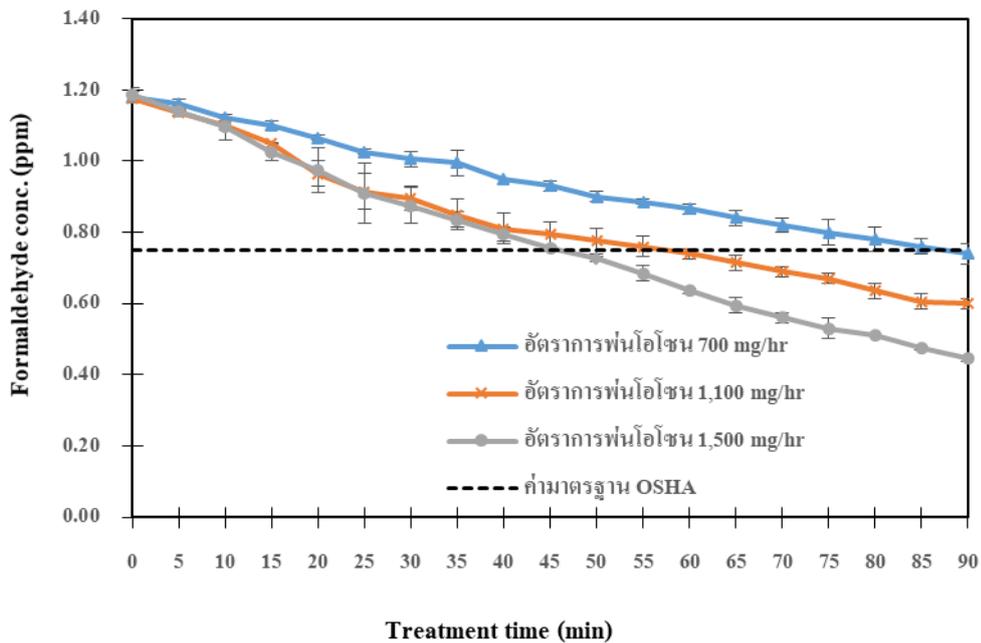
จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศในห้องเรียน SY105 โดยใช้ความเร็วพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 1.12 m/s ที่อัตราการฟ่นโอโซนแตกต่างกันสามระดับ โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าประมาณ 1.18 ± 0.07 ppm ระยะเวลาการบำบัด 90 min พบว่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ค่อย ๆ ลดลง และมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด 0.75 ppm [9] ที่เวลาในการบำบัดประมาณ 50 min โดยประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงสุดเท่ากับ $55.90\% \pm 0.79$ ที่อัตราการฟ่นโอโซน 1,500 mg/hr ที่เวลาในการบำบัด 90 min ดังแสดงในรูปที่ 2 จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้ความเร็วพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 1.58 m/s ที่อัตราการฟ่นโอโซนแตกต่างกันสามระดับ โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าประมาณ 1.20 ± 0.03 ppm พบว่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ค่อย ๆ ลดลง และลดลงจนต่ำกว่าค่ามาตรฐาน [9] ที่เวลาในการบำบัดประมาณ 55 min โดยประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงสุดเท่ากับ $58.33\% \pm 0.28$ ที่อัตราการฟ่นโอโซน 1,500 mg/hr ที่เวลาในการบำบัด 90 min ดังแสดงในรูปที่ 3 สำหรับการศึกษาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้ความเร็วพัดลมดูดอากาศเท่ากับ 2.04 m/s ที่อัตราการฟ่นโอโซนแตกต่างกัน 3 ระดับ โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าประมาณ 1.18 ± 0.02 ppm พบว่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ค่อย ๆ ลดลง และมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน [9] ที่เวลาในการบำบัดประมาณ 45 min โดยประสิทธิภาพในการบำบัดที่สูงที่สุดเท่ากับ $62.45\% \pm 2.07$ ที่อัตราการฟ่นโอโซน 1,500 mg/hr ที่เวลาในการบำบัด 90 min ดังแสดงในรูปที่ 4 จากผลการบำบัดจะเห็นได้ว่า ที่อัตราการฟ่นโอโซน 1,500 mg/hr และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 2.04 m/s ให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการฟ่นโอโซนดังกล่าวมีปริมาณของโอโซนที่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าและลดค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ได้มากกว่า



รูปที่ 2 ความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่อัตราการฟ่น ไอโชน 700, 1,100 และ 1,500 mg/hr และความเร็วกัดลมดูดอากาศ 1.12 m/s



รูปที่ 3 ความเข้มข้นก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่อัตราการฟ่น ไอโชน 700, 1,100 และ 1,500 mg/hr และความเร็วกัดลมดูดอากาศ 1.58 m/s



รูปที่ 4 ความเข้มข้นก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ที่อัตราการพ่น ไอ โชน 700, 1,100 และ 1,500 mg/hr และความเร็วพัดลมดูดอากาศ 2.04 m/s

จากผลการวิจัยข้างต้น พบว่าอัตราการพ่น ไอ โชนที่ 1,500 mg/hr ส่งผลให้ความเข้มข้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากที่อัตราการพ่น ไอ โชนดังกล่าว ทำให้มีปริมาณ ไอ โชนเพียงพอต่อการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ วิภาดา เดชะปัญญา และ สรรพาวุธ นนท์ตุลา [12] ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ด้วยไอ โชน พบว่าสามารถบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ได้จริงและให้ประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัด (สูงกว่า 80%) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ประมาณ 1.3-4.1 ppm อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-29 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 55-70% และจากงานวิจัยของ Tseng et al. [13] ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยเครื่องฟอกอากาศหลาย ๆ ชนิด พบว่าเครื่องฟอกอากาศแบบใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 19.6-28.6% ที่อุณหภูมิ 20 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ประมาณ 4 ppm สำหรับเครื่องฟอกอากาศที่ใช้ประจุลบ พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 24.9-30.8% ที่สภาวะเดียวกัน สำหรับเครื่องฟอกอากาศที่ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 27.9-56.0% ที่อุณหภูมิ 20 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% ความเข้มข้นเริ่มต้น 4 ppm และเครื่องฟอกอากาศที่ใช้ไอ โชน พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดประมาณ 20.2-44.2% ที่อุณหภูมิ 30 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สูงกว่าที่ได้จากงานวิจัยของ Tseng et al. [13]

4.3 การศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการบำบัดก๊าซฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษ โดยการใช้โปรแกรม Design Expert V. 13

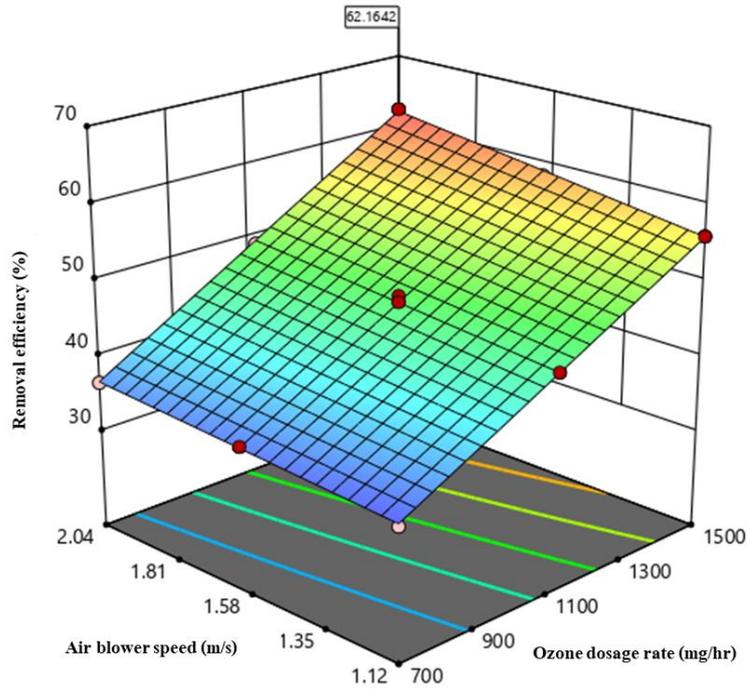
ผลการวิจัยในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซพิษต้นแบบที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

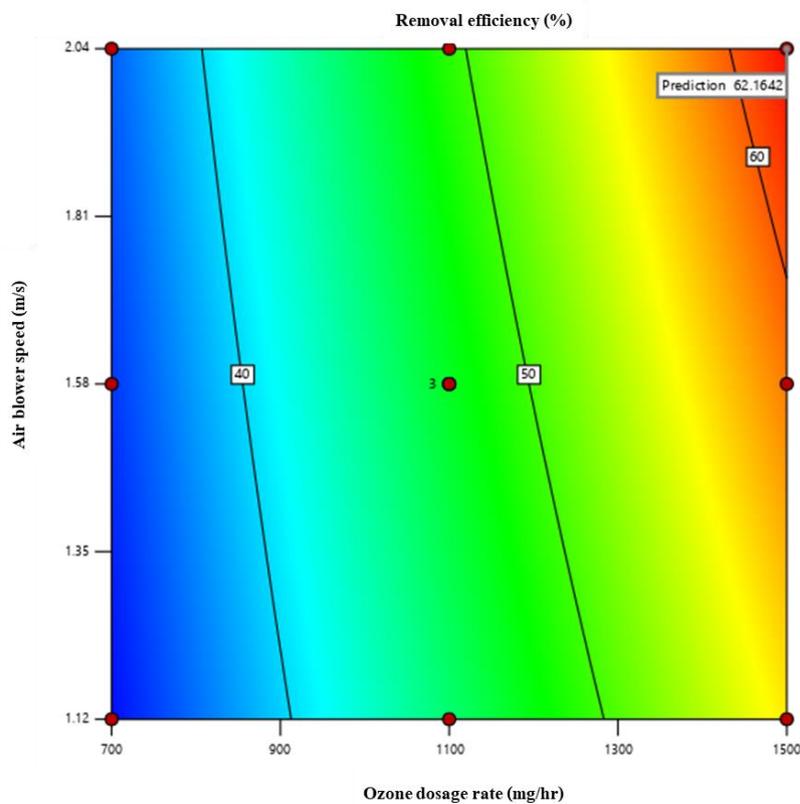
การทดลอง	อัตราการฟ่นไอโซน (mg/hr)	ความเร็วพัดลมดูดอากาศ (m/s)	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)	
			ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการทำนาย
1	700	1.12	33.89	34.26
2	700	1.58	35.59	34.42
3	1100	1.58	47.30	47.21
4	1500	1.58	58.33	59.00
5	700	2.04	36.44	36.58
6	1100	1.58	48.12	47.21
7	1100	1.12	45.08	45.05
8	1500	2.04	62.45	62.16
9	1500	1.12	55.90	55.84
10	1100	1.58	47.28	47.21
11	1100	2.04	48.94	49.37

การหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert V.13 โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการมีค่ามากที่สุด (Maximize) ผลจากการทำนาย พบว่ามี 10 สถานะการบำบัดที่ให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่มากที่สุด แต่สถานะที่ดีที่สุดในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ที่โมเดลแนะนำคือ ความเร็วพัดลมดูดอากาศ เท่ากับ 2.04 m/s และอัตราการฟ่นไอโซน 1,500 mg/hr แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่สถานะดังกล่าว ประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 62.16% นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วพัดลมดูดอากาศและอัตราการฟ่นไอโซน จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า ค่า P ของ model มีค่า 0.0052 แสดงว่าโมเดลมีนัยสำคัญ และค่า P ของ lack of fit มีค่า 0.5333 แสดงว่า lack of fit ไม่มีนัยสำคัญหรือโมเดลสามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ค่า P ของอัตราการฟ่นไอโซน (A) และความเร็วพัดลมดูดอากาศ (B) มีค่าน้อยกว่า 0.0001 และค่า P ของผลคูณระหว่างสองปัจจัย (AxB) เท่ากับ 0.0052 แสดงว่าทั้งปัจจัยส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P น้อยกว่า 0.05 โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จาก RSM Model เพื่อใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยไอโซนแสดงดังสมการที่ 4

$$R.E. (%) = 16.80576 + 0.020896 \times A - 1.282610 \times B + 0.005435 \times A \times B \quad (4)$$



รูปที่ 5 ผลการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ (3D surface plot)



รูปที่ 6 ผลการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์แบบเส้นค่าระดับ (Contour plot)

5. สรุปผลการวิจัย

ผลจากการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการพ่นไอโซนด้วยอัตรา 700, 1,100 และ 1,500 mg/hr ตามลำดับ พบว่า เครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์ในห้อง SY105 อยู่ในช่วง 55.90-62.45% ที่ระยะเวลาในการบำบัด 90 min ซึ่งค่าความเข้มข้นของก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์หลังการบำบัดมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดที่ได้จากโมเดล ได้แก่ ความเร็วพัดลมดูดอากาศ เท่ากับ 2.04 m/s และอัตราการพ่นไอโซน 1,500 mg/hr ซึ่งจะให้ค่าการบำบัดที่ 62.16% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องบำบัดก๊าซพิษต้นแบบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดก๊าซพิษในห้องเรียนที่มีขนาดห้องใกล้เคียงกันได้

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bangon Changsap, B. The near dangers: formaldehyde/formalin. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, 2015, 1(1), pp. 97-109.
- [2] Kumar, P.A. et al. Hexavalent chromium removal from wastewater using aniline formaldehyde condensate coated silica gel. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143, pp. 24-32. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.08.067
- [3] Tejado, A. et al. Physico-chemical characterization of lignin from different sources for use in phenol-formaldehyde resin synthesis. *Bioresource Technology*, 2007, 98(8), pp. 1655-63. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.05.042. Epub 2006 Jul 14. PMID: 16843657.
- [4] Wanfan, S. *Knowledge of formaldehyde: Nearby hazardous substance*, 2013. Available from http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=19310 [Accessed 10 October 2021].
- [5] Arts, J.H.E. et al. Inhaled formaldehyde: Evaluation of sensory irritation in relation to carcinogenicity. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2006, 44, pp. 144-160. DOI: 10.1016/j.yrtph.2005.11.006
- [6] Department of Labour Protection and Welfare, *Announcement of Department of Labour Protection and Welfare: Total Threshold Limits Concentration of Hazardous Chemicals*. Bangkok, 2017. Available from <http://cste.sut.ac.th/csteshe/wp-content/lews/Law28.pdf> [Accessed 5 May 2021].
- [7] Dechapanya, W and S. Nontula, Treatment of gaseous formaldehyde with continuous source in a closed modeling room using ozonation. *Thai Environmental Engineering Journal*, 2017, 31(1), pp. 37-43.
- [8] Horvath, M. et al. *Ozone (Topics in Inorganic & General Chemistry)*, 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Ltd., 1985.
- [9] Primozone. *Natures own disinfection method*, 2021. Available from <https://www.primozone.com/technology/why-ozone/> [accessed 25 November 2021].
- [10] Srithai, T. et al. Formaldehyde treatment with ozone in anatomy classroom. *Journal of Energy and Environment Technology*, 2021, 8(2), pp. 12-22.
- [11] Chanpirak, A. et al. Optimization of oil extraction from spent coffee grounds (coffea canephora var. robusta/coffea arabica) by hexane using response surface methodology. *The Journal of KMUTNB*, 2018, 28(4), pp. 799-811.
- [12] Dechapanya, W. and Nontula, S. *Creation design and removal efficiency study of prototype of reactor for treatment of formaldehyde using ozonation*. Final Report, Ubon Ratchathani University, 2020.
- [13] Tseng, C.H. et al. The removal of indoor formaldehyde by various air cleaners, In: *the 98th A&WMA annual conference*, Minneapolis, MN, USA, 21-24 June 2005, pp. 457-469.