

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวดตอบสนองในการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่น

รัชชานนท์ ยงพัทธกรกุล¹, สุพัฒน์พงษ์ มัตราช², กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา³, สมภพ สอนองราชฤทธิ์³, เทียมมะณีรัตน์ รัตนวิระพันธ์⁴ และ วิภาดา เดชะปัญญา^{2*}
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

* Corresponding Author: wipada.d@ubu.ac.th

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 2 พฤษภาคม 2566

แก้ไข : 1 ธันวาคม 2566

ตอบรับ : 18 ธันวาคม 2566

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.24

คำสำคัญ : น้ำเสียยางพารา / โอโซนเนชั่น / วิธีพื้นผิวดตอบสนอง / แบบจำลองการออกแบบแบบส่วนประสมกลาง

คุณภาพน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมจัดเป็นปัญหาหลักปัญหาหนึ่งของโรงงานแปรรูปยางพารา ด้วยเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนเนชั่นและการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวดตอบสนอง โดยใช้แบบจำลอง การออกแบบแบบส่วนประสมกลางในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการพ่นโอโซน แปรผันเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 600, 900 และ 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัส แปรผัน 3 ระดับ ได้แก่ 90, 120 และ 150 min และ pH แปรผัน 3 ระดับ ได้แก่ 3, 7 และ 9 จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ BOD สูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ $43.51 \pm 1.86\%$ และ $83.51 \pm 5.82\%$ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สมการ Quadratic เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD เนื่องจากมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9249 และมีค่า F-value และ p-value เท่ากับ 38.86 และน้อยกว่า 0.0001 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า p-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.1451 แสดงให้เห็นว่า Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด BOD อยู่ที่อัตราการพ่นโอโซน 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัส 126 min และ pH เท่ากับ 9 ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD เท่ากับ 85.99%

Application of Response Surface Methodology for Statistical Analysis of Treatment of Wastewater from a Para Rubber Plant Using Ozonation

Ratchanon Yongpasakornkun¹, Supatpong Mattaraj², Karnika Ratanapongleka³, Sompop Sanongraj³, Tiammanee Rattanaweerapan⁴ and Wipada Dechapanya^{2*}

Kasetsart Ubon Ratchathani University, Mueang Si Khai, Warin Chamrap, Ubonratchathani, 34190

* Corresponding Author: wipada.d@ubu.ac.th

¹ Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

³ Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Lecturer, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: May 2, 2023

Revised: December 1, 2023

Accepted: December 18, 2023

DOI: 10.14456/kmuttrd.2023.24

Keywords :

Para Rubber Wastewater / Ozonation / Response Surface Methodology (RSM) / Central Composite Design (CCD) Model

Abstract

One of the major problems of a rubber processing factory is poor wastewater quality that does not fall within the standard set forth by the Department of Industrial Works. The objective of the present research was therefore to study para rubber wastewater treatment using ozonation as well as the application of Response Surface Methodology (RSM) with the Central Composite Design (CCD) model for statistical analysis of the treatment data. The studied factors include the dosage rate of ozone, which was varied at 3 levels, i.e., 600, 900, and 1,200 mg/h; the contact time, which was varied at 3 levels, i.e., 90, 120, and 150 min; and pH, which was again varied at 3 levels, i.e., 3, 7, and 9. From the results, it was found that the highest COD and BOD removal efficiencies were 43.51 ± 1.86 and $83.51 \pm 5.82\%$, respectively. Statistical analysis results reveal that the Quadratic model was the most suitable mathematical model for the prediction of BOD removal efficiency. The value of R^2 was equal to 0.9249, while the F-value and p-value were 38.86 and less than 0.0001, respectively, suggesting that the model was significant. The p-value of Lack of Fit was, on the other hand, 0.1451, indicating that the Lack of Fit of the model was insignificant. The optimal condition was noted to be at the ozone dosage rate of 1,200 mg/h, contact time of 126 min and pH of 9; such a condition resulted in the BOD removal efficiency of 85.99%.

1. บทนำ

ยางพาราเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย และอีกหลาย ๆ ประเทศ ในอุตสาหกรรมยางพารามีการใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นสินค้ายางประเภทต่าง ๆ โดยผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางพารามีทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ และมีสินค้าที่ผลิตได้ เช่น ยางแท่ง ยางคอมปาวด์ ยางแผ่นรมควันอัดก้อน ถูยางอนามัย ถูมือยาง อุปกรณ์ทางการแพทย์ ชิ้นส่วนยานพาหนะและชิ้นส่วนยาง เป็นต้น [1-2]

กระบวนการแปรรูปยางพาราส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในบริเวณใกล้เคียงโรงงาน ปัญหาคุณภาพน้ำทิ้งที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมก็จัดเป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักของโรงงานแปรรูปยางพารา [3-4] ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการแปรรูปยางพาราต้องใช้น้ำสำหรับการผลิตและล้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้น้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมาก ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand; COD และ Biochemical Oxygen Demand; BOD) และของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid; SS) ปนเปื้อนในปริมาณสูง นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังมีการใช้สารเคมีอื่น ๆ เช่น NH_3 , ZnO และ DAP (Diammonium Hydrogen Phosphate) ปนเปื้อนในน้ำเสียด้วย [5-6] ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีหลากหลายในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตยางพารา แต่อย่างไรก็ตามยังประสบปัญหาในด้านคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดและแนวทางการแก้ไขปัญหายังเหมาะสม ซึ่งส่งผลกระทบต่อชุมชนใกล้เคียงและสิ่งแวดล้อม ผู้ประกอบการควรต้องปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาพบว่า กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes; AOPs) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้บำบัดสารมลพิษน้ำและอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้รับความสนใจและนิยมใช้ AOPs มีหลายกระบวนการ เช่น $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/UV , Fenton, UV/TiO_2 และ $\text{UV}/\text{Persulfate}$ เป็นต้น [7-8] หลักการของ AOPs ในการบำบัดสารมลพิษ จะใช้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical; $\text{OH}\cdot$) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดย $\text{OH}\cdot$ สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้หลากหลายชนิด และได้ผลิตภัณฑ์

สุดท้ายคือ CO_2 และ H_2O ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [8]

จากหลายกระบวนการ AOPs ที่ได้กล่าวถึงข้างต้น กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากไม่มีสารเคมีตกค้างในระบบ โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidant) ความสามารถในการลดกลิ่น สี และสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดี [3] นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อโรค จึงทำให้กำจัดเชื้อโรคและปรับสภาพน้ำในขั้นตอนเดียวกันได้ ช่วยลดค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสีย เช่น BOD, COD, TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) และ SS อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่า Dissolved Oxygen (DO) ในน้ำ เนื่องจากโอโซนสามารถเปลี่ยนเป็นออกซิเจนและละลายในน้ำได้ [9]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนและสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การเกิดปฏิกิริยาโดยตรง (Direct attack) และการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้อม (Indirect attack) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาโดยตรง โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ตรงบริเวณพันธะคู่ (ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะที่เป็นกรด) โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างว่องไวกับสารประกอบประเภท Aromatics ที่มีหมู่ OH , CH_3 หรือ OCH_3 ณ บริเวณตำแหน่ง Ortho แต่ในทางตรงกันข้าม หากสารประกอบ Aromatics มีหมู่ NO_2 , COOH หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ช้า สำหรับการเกิดปฏิกิริยาโดยอ้อม (ซึ่งจะเกิดได้ดีภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง) สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก ได้แก่ $\text{OH}\cdot$ และ $\text{HO}_2\cdot$ [10] จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาโดยอ้อมระหว่างโอโซนและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเกิดได้ดีกว่าปฏิกิริยาโดยตรง [3] อย่างไรก็ตามกระบวนการโอโซนเนชันเป็นกระบวนการทางเคมี ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่เกิดขึ้นจากสารเคมีและพลังงานที่ใช้ ในขณะที่ขบวนการต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัด [11] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวดูดซับสองในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียยางพาราด้วยการเติมโอโซน โดยมีตัวแปร (Variable) ที่ใช้ในการศึกษาคืออัตราการฟอนโอโซน (Dosage rate of ozone) ระยะเวลาสัมผัส (Contact time) และ pH และการประเมินประสิทธิผล (Effectiveness) ของการใช้กระบวนการดังกล่าวในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานยางพารา

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างน้ำเสีย

งานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบการเก็บแบบจ้วง (Grab sampling) ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียที่ระดับความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของบ่อ โดยมีขั้นตอนและวิธีการเป็นไปตามประกาศของกรมควบคุมมลพิษ [12] ตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บได้ถูกรักษาสภาพ (Preserve) เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำเสียโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลาไม่เกิน 1 เดือน จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียเพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการเจือจางตัวอย่างน้ำเสียก่อนการบำบัด ซึ่งผล

ที่ได้จากการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำเสีย พบว่ามีค่า COD อยู่ในช่วง 30,000 – 50,000 mg/L ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เจือจาง ตัวอย่างน้ำเสีย 10 เท่า เพื่อให้ค่า COD อยู่ที่ประมาณ 3,000 – 5,000 mg/L

2.2 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัด

คุณภาพตัวอย่างน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัด พิจารณาจากดัชนีคุณภาพน้ำทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่า pH, Chemical Oxygen Demand (COD), Total Dissolved Solid (TDS), Biochemical Oxygen Demand (BOD) และ Suspended Solid (SS) วิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ดัชนีคุณภาพน้ำและวิธีการวิเคราะห์ [13]

ดัชนีคุณภาพน้ำ	วิธีวิเคราะห์
pH	Electrometric Method
COD	Close Reflux, Titrimetric Method
BOD	Azide Modification Method
SS	Gravimetric method
TDS	Gravimetric method

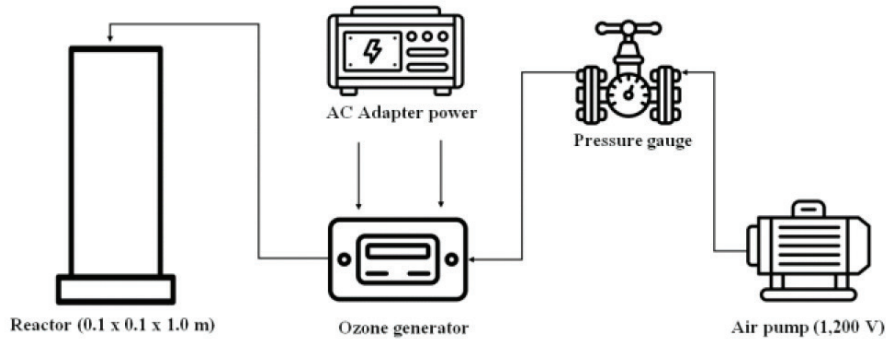
2.3 การออกแบบการทดลองบำบัดน้ำเสียอย่างพาราด้วยกระบวนการโอโซน

ตัวแปร (Variable) ที่ทำการศึกษา 3 ตัวแปรคือ อัตราการฟุ้งโอโซน (Dosage rate of ozone) ระยะเวลาสัมผัส (Contact time) และ pH และจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ในการบำบัดน้ำเสียอย่างพาราด้วยกระบวนการโอโซน [3, 14-15] ผู้วิจัยได้กำหนดสภาวะในการบำบัดน้ำเสียอย่างพารา ที่แตกต่างจากการศึกษาที่ผ่านมา โดยมีรายละเอียดดังนี้ อัตราการฟุ้งโอโซน แปรผันเป็น 3 ระดับ คือ 600, 900 และ 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัส แปรผัน 3 ระดับคือ 90, 120 และ 150 min และ pH เท่ากับ 3, 6 และ 9 และใช้โปรแกรม Design – Expert โดยการเลือกใช้ในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central

composite design; CCD) ซึ่งผลการออกแบบการทดลองได้ชุดการทดลองทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง

2.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน

รูปที่ 1 แสดงแผนผังการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซน โดยการเติมตัวอย่างน้ำเสียที่เจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่า และทำการปรับค่า pH ด้วย H₂SO₄ 0.1 M และ NaOH 0.1M (AR Grade) ปริมาตร 2 L ลงใน Reactor จากนั้นเปิดเครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone generator) และปั๊มดูดอากาศ (Air pump) อากาศจะถูกดูดผ่านปั๊มดูดอากาศเข้าไปยังเครื่องกำเนิดโอโซน โดยมี Pressure gauge เป็นตัวควบคุมอัตราการผลิตโอโซน ซึ่งการหาอัตราการฟุ้งโอโซนใช้วิธี 2350 E. Ozone Demand/Requirement-Semi-Batch Method [16]



รูปที่ 1 แผนผังการบำบัดน้ำเสียทางพาราด้วยกระบวนการโอโซนชั้น

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและการหาสถานะที่เหมาะสมโดยใช้ RSM

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวดตอบสนอง ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design – Expert 13 (trial version) โดยพิจารณาค่า P – value เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง (Response) ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นมีค่าเท่ากับร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ที่ความเชื่อมั่นระดับนี้จะให้ความถูกต้องและมีความเหมาะสม หาก P – value มีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทางพารา แต่หาก P – value มีค่ามากกว่า 0.05 สรุปได้ว่าปัจจัยนั้น ๆ ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทางพารา นอกจากนี้ยังพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ R-sq (Adj) หากมีค่าเกินกว่าร้อยละ 70 ถือว่ายอมรับได้ [17]

การวิเคราะห์พื้นผิวดตอบสนองกำลังสอง เมื่อผลการทดลองอยู่ในจุดที่ใกล้เคียงที่ดีที่สุด โดยนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ซึ่งอยู่ในรูปแบบดังสมการที่ 1 [8]

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

- โดยที่ y คือ ตัวแปรผลตอบสนอง
- k คือ จำนวนปัจจัยทั้งหมด
- x_i, x_j คือ ปัจจัยการทดลอง
- β_0 คือ ค่าคงที่
- $\beta_i, \beta_{ij}, \beta_j$ คือ สัมประสิทธิ์การถดถอย
- $\sum_{i=1}^k \beta_i X_i$ คือ เทอมของอิทธิพลเชิงเส้น (Linear Effect)

$\sum_{i=1}^k \beta_i X_i^2$ คือ เทอมของอิทธิพลกำลัง สอง (Quadratic Effect)

$\sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon$ คือ เทอมของอิทธิพลร่วม (Cross-product Effect)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (Coefficients of variation ; CV) ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทางพาราด้วยกระบวนการโอโซนชั้น จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้อง (Model adequacy checking) ของแบบจำลองเพื่อสังเกตความเหมาะสมของข้อมูล ขั้นตอนที่ถัดไปคือการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาโดยใช้ฟังก์ชันผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response optimizers) และทำการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ด้วยกราฟของตัวแปรพื้นผิวดตอบสนอง (Response surface plot)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำเสีย

ผลการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่า น้ำเสียทางพารามีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นเหม็นกรด มีค่าความสกปรกค่อนข้างมากโดยเฉพาะค่า COD และ BOD ผลการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างน้ำเสียทางพาราแสดงดังตารางที่ 2 โดยมีดัชนีคุณภาพน้ำที่พิจารณาทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ pH, SS, TDS, COD และ BOD พบว่าทั้ง 5 พารามิเตอร์ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tuprakay และ Tuprakay [6] ที่ได้ทำการศึกษาน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปยางพาราโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสีย

ก่อนเข้าบ่อบำบัดน้ำเสีย และน้ำเสียบ่อบำบัดน้ำเสียจากการแปรรูปยางพาราของเกษตรกร จากการศึกษาพบว่าน้ำเสียในกระบวนการแปรรูปยางพาราก่อนเข้าบ่อบำบัดมีกลิ่นเหม็นกรด สีขาวขุ่น มีค่า pH, SS และ BOD เท่ากับ 4.88, 66 mg/L และ 5,109 mg/L ตามลำดับ และน้ำเสียจากบ่อบำบัดมีกลิ่นเหม็นกรดและกลิ่นคล้ายยางเน่า สีเทาขุ่น มีค่า pH, SS และ BOD เท่ากับ 5.28, 122 mg/L และ 7,090 mg/L ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Dechapanya และคณะ [18] ซึ่งได้ศึกษาคุณภาพน้ำเสียยางพาราจากยางก้อนถ้วย พบว่าลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย มีสีดำ มีกลิ่นฉุนคล้ายน้ำ

เสียจากบ่อบำบัด มีค่า pH, SS, TDS และ COD เท่ากับ 5.52 ± 0.05 , 916.67 ± 125.83 mg/L, $25,350 \pm 636.40$ mg/L และ $52,179 \pm 100.49$ mg/L ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Wongkamchao และ Dechapanya [19] ซึ่งได้ศึกษาคุณภาพน้ำเสียยางพาราจากโรงงานรับซื้อยางแห้งหนึ่งในจังหวัดอุบลราชธานี พบว่า ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสีย มีสีดำและกลิ่นฉุน มีค่า pH, SS, TDS, COD และ BOD เท่ากับ 4.68 ± 0.01 , $2,687.33 \pm 0.34$ mg/L, $11,669.67 \pm 0.01$ mg/L, $43,919.89 \pm 0.34$ mg/L และ $16,800 \pm 0.00$ mg/L ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คุณภาพตัวอย่างน้ำเสียยางพาราก่อนการบำบัด

ดัชนีคุณภาพน้ำเสีย	ผลการวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม [13]
pH	4.64 ± 0.07	5.5 - 9.0
TDS (mg/L)	$12,515.00 \pm 14.14$	ไม่เกิน 3,000
SS (mg/L)	$2,185.00 \pm 21.21$	ไม่เกิน 50
COD (mg/L)	$49,100.00 \pm 353.55$	ไม่เกิน 120
BOD (mg/L)	$18,150.00 \pm 212.13$	ไม่เกิน 20

3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียยางพาราด้วยกระบวนการโอโซน

น้ำเสียยางพาราที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีลักษณะค่อนข้างใส ไม่มีกลิ่น ประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD และ SS ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 20-45%, 30-85% และ 40-80% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัด COD และ BOD มีค่าที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการฟ่นโอโซน ระยะเวลาการสัมผัส และค่า pH นอกจากนี้ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่ากระบวนการโอโซนขั้นต้นแบบไม่มีผลต่อการกำจัด TDS และ pH เลย สำหรับ TDS ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นผลเนื่องมาจากการฟ่นโอโซนก่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และอาจเปลี่ยนรูปเป็นสารละลาย จึงส่งผลให้ค่า TDS ของน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงขึ้นเล็กน้อย [20]

ตารางที่ 3 แสดงค่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดค่า COD, BOD และ SS ซึ่งมีค่าเท่ากับ $43.51 \pm 1.86\%$, $83.51 \pm 5.82\%$ และ $83.33 \pm 5.44\%$ ตามลำดับ ที่อัตราการฟ่นโอโซนเท่ากับ 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 150

min และ pH เท่ากับ 9 ซึ่ง Chinlee และ Dachapanya [3] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบำบัดน้ำเสียยางพาราด้วยการเติมโอโซน ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการฟ่นโอโซนและระยะเวลาสัมผัส พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด COD อยู่ที่อัตราการฟ่นโอโซนเท่ากับ 800 mg/h และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 120 min ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ $89.66 \pm 0.48\%$ Wongkamchao และ Dechapanya [19] ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียยางพาราด้วยกระบวนการฟ่นต้นร่วมกับโอโซนขั้นต้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด COD อยู่ที่อัตราการฟ่นโอโซนเท่ากับ 800 mg/h และระยะเวลาสัมผัส 30 min โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD เท่ากับ $94.70 \pm 0.02\%$ Somkerd และ Suwannawittaya [21] ได้ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยใช้กระบวนการโอโซนขั้นต้นในสภาวะที่มีและไม่มีความเร่งปฏิกิริยา TiO_2 โดยทำการทดลองแบบกะ (batch) แปรผันค่า pH 4, 7 และ 10 โดยเติมโอโซนที่ปริมาณเฉลี่ย $4.732 \text{ mg O}_3/\text{min}$

พบว่าสามารถใช้โอโซนในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เหลือในน้ำทิ้งได้ โดยสภาวะที่มี TiO_2 ให้ผลการกำจัดที่ดีกว่าสภาวะที่ไม่มี TiO_2 pH ของน้ำเสียเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาด้วย แต่ไม่ชัดเจนเท่าผลของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ การเติมโอโซนที่ 60 min ปริมาณโอโซน 260.92 mg O_3 /min pH เท่ากับ 10 เมื่อใช้โอโซนอย่างเดียว BOD ลดลง 29.13% และ COD ลดลง 36.7% ในสภาวะที่มี TiO_2 การกำจัดดีขึ้น โดย BOD ลดลง 36% และ COD ลดลง 60% ตารางที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ได้จากการทดลองและจากโปรแกรม Design Expert 13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน

3.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Design Expert 13 โดยพิจารณา Model Summary Statics ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์กำลังสาม (Cubic Model) มีค่า R_2 สูงสุดเท่ากับ 0.9543 แต่อย่างไรก็ตามมีข้อความแจ้งเตือน Aliased เนื่องจากการทดลองไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดแบบจำลองคณิตศาสตร์กำลังสามได้ ดังนั้นแบบจำลองจึงแนะนำให้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีค่า R_2 รองลงมาคือแบบจำลองคณิตศาสตร์กำลังสอง (Quadratic Model) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต่าง ๆ (อัตราการพ่นโอโซน ระยะเวลาสัมผัส และความเป็นกรด - ด่าง) กับค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD ในน้ำเสียขางพารา ด้วยกระบวนการโอโซนชั้น โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์กำลังสองมีค่า R_2 เท่ากับ 0.9249 มีค่า F-value ของแบบจำลอง

เท่ากับ 38.86 ค่า p-value < 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า p-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.1451 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึง Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง [22-23] และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าทั้งสามปัจจัยส่งผลกระทบต่อ การบำบัด BOD อย่างมีนัยสำคัญ ตารางที่ 7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบควอดราติก เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R_2) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9774 แสดงให้เห็นว่า 97.74% ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับข้อมูลที่ ได้จากการทำนาย [24] นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ในการปรับแก้ (Adj R_2) มีค่าเท่ากับ 0.9522 ซึ่งมากกว่า 0.64 (ค่ากำหนดต่ำสุดของ Adj R_2 สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์) จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้มีความเหมาะสม อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย (Pred. R_2) มีค่าเท่ากับ 0.8720 ซึ่งมีผลต่างจากค่า Adj R_2 เพียง 0.0802 โดยปกติแล้วผลต่างระหว่างสองค่านี้ไม่ควรจะเกิน 0.2 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลไม่มีปัญหาในการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองคณิตศาสตร์ อีกทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (C.V) มีค่าต่ำเพียง 5.83 และค่า Adequacy precision มีค่าเท่ากับ 22.0771 (ตารางที่ 7) ซึ่งมีค่ามากกว่า 4 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และเป็นตัวบ่งชี้ความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย [25] แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ที่ได้จากแบบจำลอง แสดงดังสมการที่ 2

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียขางพาราหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนชั้น

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ตัวอย่างน้ำก่อนบำบัด	ตัวอย่างน้ำหลังบำบัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
pH	9.13	7.57	-
TDS (mg/L)	1,013.50	1,053.5	-
SS (mg/L)	390.00	65.0	83.33±5.44
COD (mg/L)	5,010.00	2,910.0	43.51±1.86
BOD (mg/L)	4,320.00	712.5	83.51±5.82

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ได้จากการทดลองและการทำนาย

อัตราการพ่น โอโซน(mg/h)	ระยะเวลาสัมผัส (min)	พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี (%)	
			ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการทำนาย
600	90	3	59.79±2.56	59.07
600	150	3	67.73±0.06	67.22
600	120	6	41.67±0.79	41.69
600	90	9	30.12±1.99	30.84
600	150	9	39.24±2.42	39.71
900	120	3	47.58±2.73	53.69
900	90	6	40.80±3.97	47.99
900	120	6	49.54±3.91	49.80
900	120	6	48.39±2.28	49.80
900	120	6	51.85±7.18	49.80
900	120	6	54.27±3.75	49.80
900	120	6	53.46±4.90	49.80
900	120	6	49.19±3.42	49.80
900	150	6	56.80±3.65	57.45
900	120	9	44.44±0.87	45.91
1,200	90	3	69.72±1.05	69.47
1,200	150	3	72.20±2.35	71.63
1,200	120	6	78.00±0.67	78.38
1,200	90	9	80.90±3.97	81.42
1,200	150	9	83.51±5.82	84.30

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของการบำบัด BOD ในน้ำเสียยางพารา

Source	Sequential p - value	Lack of Fit p - value	Adjusted R ²	Predicted R ²	
Linear	0.0029	0.0009	0.4925	0.1327	
2FI	0.0403	0.0022	0.6627	-0.4379	
Quadratic	0.0004	0.0587	0.9249	0.7789	Suggested
Cubic	0.2614	0.0359	0.9419	-12.9613	Aliased

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบควอดราติก

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	4132.63	10	413.26	38.86	< 0.0001	significant
A-Ozone dosage rate	659.93	1	659.93	62.06	< 0.0001	
B-Contact time	128.00	1	128.00	12.04	0.0071	
C-pH	150.62	1	150.62	14.16	0.0045	
AB	17.91	1	17.91	1.68	0.2266	
AC	813.05	1	813.05	76.46	< 0.0001	
BC	0.2145	1	0.2145	0.0202	0.8902	
A ²	464.50	1	464.50	43.68	< 0.0001	
B ²	3.28	1	3.28	0.3089	0.5919	
A ² B	43.79	1	43.79	4.12	0.0730	
AB ²	32.17	1	32.17	3.03	0.1160	
Residual	95.70	9	10.63			
Lack of Fit	66.10	4	16.52	2.79	0.1451	not significant

ตารางที่ 7 ผลทางสถิติของแบบ Fit Statistics และสมการถดถอยสำหรับปัจจัยในการบำบัดน้ำเสียอย่างพารา

Std. Dev.	3.26	R²	0.9774
Mean	55.96	Adjusted R²	0.9522
C.V. %	5.83	Predicted R²	0.8720
Adequacy precision			22.0771

$$\text{BOD R.E. (\%)} = 542.829 + (-0.885458) * A + (-5.02287) * B + (-11.5912) * C + 0.00730903 * A * B + 0.0112022 * A * C + 0.00179722 * B * C + 0.000366401 * A^2 + 0.0160779 * B^2 + (-0.00000193787) * A^2 * B + (-0.000016613) * A * B^2 \quad (2)$$

โดยที่ BOD R.E. คือ ประสิทธิภาพการกำจัด BOD

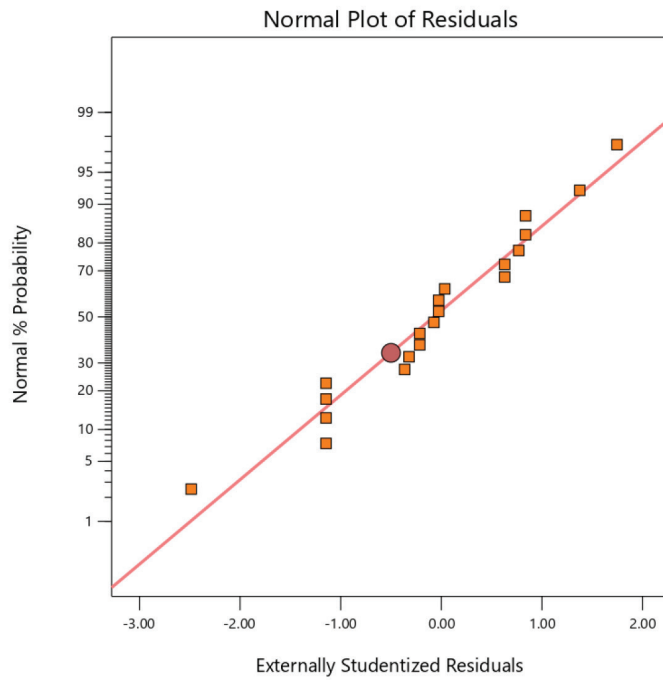
A คือ อัตราการพ่นโอโซน (mg/h)

B คือ ระยะเวลาการสัมผัส (min)

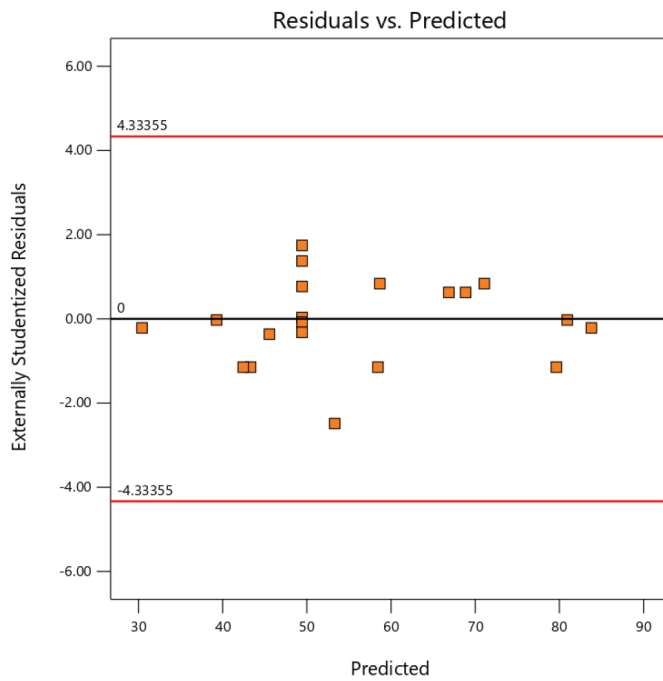
C คือ pH

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ 1) การพล็อตกราฟส่วนตกค้าง (Internally Studentized Residual Plots) และ 2) การพล็อตกราฟความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal

Probability Plots) จากรูปที่ 2 พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงและจุดข้อมูลมีการเรียงตัวเกาะเส้นตรง เป็นการยืนยันว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ รูปที่ 3 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าประมาณบนเส้นถดถอยซึ่งมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสุ่ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้อาจการทดลองชุดนี้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้ในการทำนายเพื่อหาค่าผลตอบสนองต่อไปได้ [26]



รูปที่ 2 ส่วนตกค้างแบบการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของ BOD



รูปที่ 3 ส่วนตกค้างกับค่าประมาณเส้นถดถอยของ BOD

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากรูปแบบของสมการความสัมพันธ์หรือแบบจำลองคณิตศาสตร์ ระหว่างผลตอบสนองคือ ประสิทธิภาพการกำจัด BOD กับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ดังสมการที่ 2 เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ก่อนนำไปใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียขางพาราด้วยกระบวนการไอโซเนชันโดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ทั้งหมด 5 สภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้ง 5 สภาวะ แสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความแม่นยำในการทำนายค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD ด้วยกระบวนการไอโซเนชัน

3.5 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียขางพารา

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดน้ำเสียขางพาราด้วยกระบวนการไอโซเนชันโดยใช้แบบจำลอง CCD พบว่ามีทั้งหมด 79 สภาวะ แต่แบบจำลองได้แนะนำสภาวะ

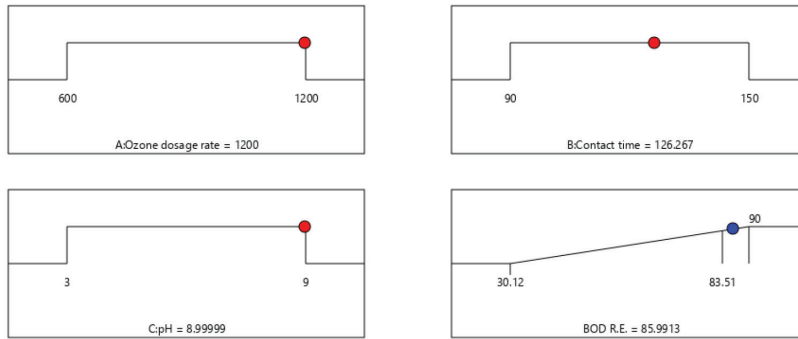
ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด BOD คือ ที่อัตราการฟุ้งไอโซเนเท่ากับ 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 126 min และ pH เท่ากับ 9 เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD เท่ากับ 85.99% และมีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability) เท่ากับ 0.933 ซึ่งใกล้เคียง 1 (รูปที่ 4) แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียขางพาราที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือ [26]

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการบำบัดที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลอง โดยทำการทดลองที่สภาวะที่แบบจำลองแนะนำจำนวน 3 ซ้ำ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD เฉลี่ยเท่ากับ $86.01 \pm 0.757\%$ ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากแบบจำลอง

ผลการสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (3D Surface plots) ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด BOD และปัจจัยต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการฟุ้งไอโซเนและ pH จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณไอโซเนที่เพิ่มมากขึ้นในการทำปฏิกิริยา ส่วนระยะเวลาสัมผัสส่งผลต่อประสิทธิภาพกำจัดน้อยกว่าสองปัจจัยข้างต้น

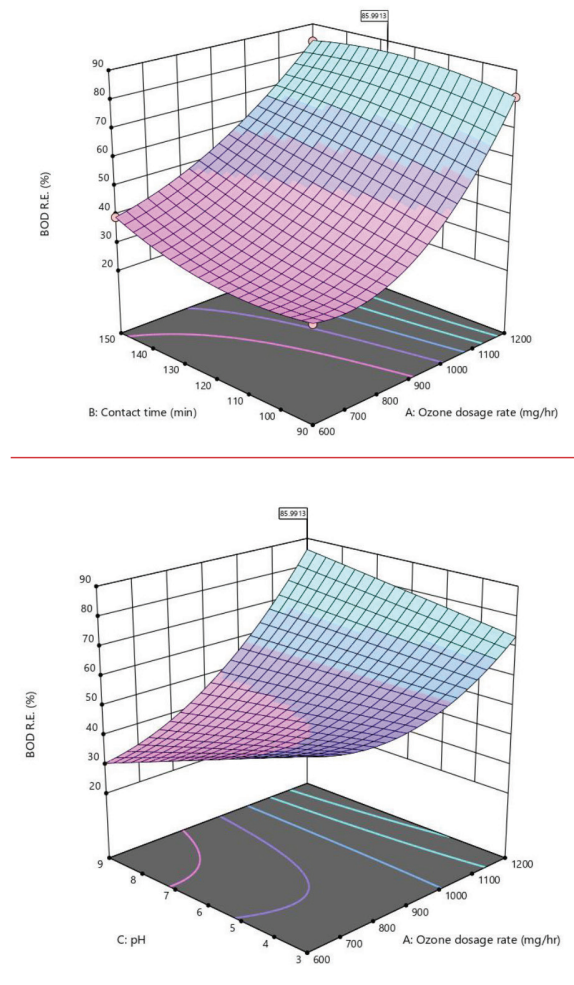
ตารางที่ 8 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์

อัตราการฟุ้งไอโซเน (mg/h)	ระยะเวลาสัมผัส (min)	พีเอช	ประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี (%)	
			Experiment	From Eq. 2
700	60	7	40.63±7.79	41.70
700	70	4	49.59±6.42	49.92
800	90	7	34.94±2.17	36.83
1000	80	8	45.02±0.96	46.25
1000	100	8	52.41±5.15	51.58

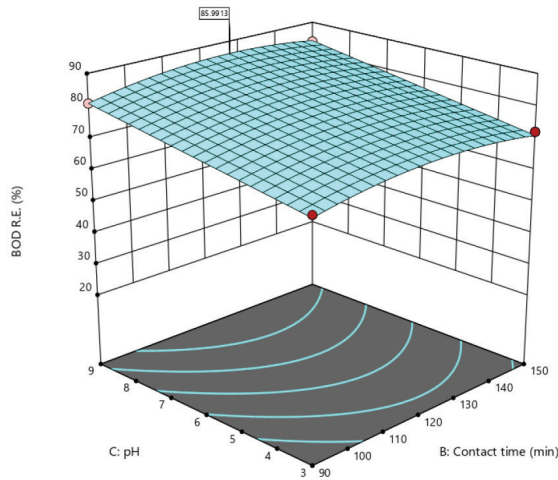


Desirability = 0.933
Solution 1 out of 79

รูปที่ 4 Desirability ramps ของการกำจัด BOD ในน้ำเสียยางพาราที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองของการกำจัด BOD (3D surface plots)



รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองของการกำจัด BOD (3D surface plots) (ต่อ)

ตารางที่ 9 ผลการยืนยันประสิทธิภาพการกำจัด BOD ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลอง

BOD R.E. (%)			
No. 1	No. 2	No. 3	Avg.
85.45	86.87	85.70	86.01±0.757

4. สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ BOD สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ $43.51 \pm 1.86\%$ และ $83.51 \pm 5.82\%$ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าสมการควอดราติกเป็นสมการที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัด BOD เนื่องจากมีค่า R_2 เท่ากับ 0.9249 F-value และ p-value ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ มีค่าเท่ากับ 38.86 และน้อยกว่า 0.0001 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์มีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า p-value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.1451 แสดงให้เห็นว่า Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญ และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด BOD ได้แก่ อัตราการฟุ้งไอโซนเท่ากับ 1,200 mg/h ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 126 min และ pH เท่ากับ 9 เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพการกำจัด BOD เท่ากับ 85.99% ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานยางพาราด้วยกระบวนการไอโซเนชั่น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานยางพาราแปรรูป บริษัท ศรีตรังแอมโอรอินตส์ทรี จำกัด (มหาชน) สาขาอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับสถานที่ในการศึกษาวิจัยและสนับสนุนเงินงบประมาณในการทำวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Satsue, P. and Phitthayaphinant, P., 2019, "Para-rubber Industry under ASEAN Economic Community: Manifestation of Para-rubber Plantation Area in the Large City of Two Sea," *King Mongkut's Agricultural Journal*, 37 (4), pp. 675-685.
- Intraskul, S., Somboonsuke, B. and Phitthayaphinant, P., 2017, "Thai Para-rubber Industry: The Status and Development Suggestions towards ASEAN Economic Community," *Humanity and Social*

Science Journal, Ubon Ratchathani University, 8 (Special Edition), pp. 80-107.

3. Chinlee, S. and Dachapanya, W., 2022, "COD Removal Efficiency of Pararubber Wastewater by Ozonation using the Central Composite Design Model," *Thai Environmental Engineering Journal*, 36 (2), pp. 35-43.

4. Somboonsukea, B., Wisitpaiboon, S., Muneenamb, U. and Phitthayaphinan, P., 2019, "Problem Solving in Ribbed Smoke Sheet (RSS) Production by Environmentally Friendly Rubber Fund Cooperatives in Songkhla Province," *Kasetsart Journal of Social Sciences*, 40, pp. 528-538.

5. Puetpaiboon, U., Sridang, P., Chevakidagarn, P., Siriwong, J. and Danteravanich, S., 2011, "Utilization of Concentrated Latex Wastewater for Land Application in Oil Palm Plantation," [Online], Available: <https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/8626> [1 March 2023]

6. Tuprakay, S.R. and Tuprakay, S., 2015, "Wastewater Treatment from Rubbing Processing by Using Solar Distillation System," *SDU Research Journal Science and Technology*, 8 (2), pp. 35-52.

7. Chocejaroenrat, C. and Sakulthaew, C., 2017, Removing a Potent Natural Hormone (17 beta-Estradiol) from Water by Ultraviolet (UV) Light-Activated Persulfate Oxidation [Online], Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/7184/2/Fulltext.pdf>. [26 February 2023]

8. Dechapanya, W., Nontula, S., Phudthabun, S., Sanongraj, S. and Mattaraj, S., 2022, "Treatment of Gaseous Formaldehyde in a Gross Anatomy Laboratory Using Ozonation," *Ladkrabang Engineering Journal*, 39 (1), pp. 11-22.

9. Loysuangsin, W., 2021, "Treatment of Wastewater from Iso Tank Container Cleaning Process by Using High Pressure Plasma System Ozone," *Journal of Science and Technology*, 4 (1), pp.34-45.

10. Chiaplam, S., Kreetachat, T. and Kreetacha, N., 2018, "Treatment Efficiency of 17 Alpha-Methyltestosterone in Aqueous Solution by Advanced Oxidation Processes," *Thai Environmental Engineering Journal*, 32 (1), pp. 51- 60.

11. Kantacha, A., 2001, Wastewater Treatment by Using Ozone: A Case Study of Wastewater from Samrong Canal [Online], Available: <http://kb.tsu.ac.th/jspui/bitstream/123456789/595/1/71112.pdf> [19 January 2023]

12. Pollution Control Department, 2010, Procedure for Water Sampling from Pollution Sources [Online], Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4209> [10 September 2022]

13. Department of Industrial Works, 2017, Announcement of Ministry of Industry: Standards for Effluent Control from Industry [Online], Available: http://reg3.diw.go.th/diw_info/wp-content/uploads/m.94-9.pdf [23 October 2022]

14. Rungruang, N. and Babel, S., 2008, "Treatment of Natural Rubber Processing Wastewater by Combination of Ozonation and Activated Sludge Process," *Proceedings of International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT 2008)*, 28-30 May 2008, Parkroyal Penang, Malaysia, pp. 259-263.

15. Massoudinejad, M., Rabori, M.M. and Dehghani, M.H., 2015, "Treatment of Natural Rubber Industry Wastewater through a Combination of Physicochemical and Ozonation Processes" *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 3 (4), pp. 242-9. <https://doi.org/10.22102/jaehr.2015.40208>

16. Rice, E.W., Baird, R.B., Eaton, A.D. and Clesceri, L.S., 2012, American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 2012. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed., American Public Health Association, Washington D.C., pp. 50-51.

17. Jantana, Y. and Rattanawai, N., 2022, "Optimizing Factors for Lemongrass Slicer Using Design of Experiment," *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 14 (19), pp. 83-95.
18. Dechapanya, W. Taweewut, K. Mungkornkaew, P. and Lakawipat, T., 2019, "Treatment of Para Rubber Wastewater using Fenton Processes," *UBU Engineering Journal*, 12 (2), pp. 63-76.
19. Wongkamchao Y. and Dechapanya, W., 2021, "Optimization of Para Rubber Wastewater Treatment Using Fenton Process by Central Composite Design," *Proceedings of UBRC 15th: Future Trends of Research and Innovation*, 22-23 July 2021, Ubon Ratchathani University, Ubonratchathani, pp. 226-235.
20. Homon, P., Jongsuphanphong, M., Pankrib, T. and Chantawong, P., 2016, "The Development and Design of Wastewater Treatment from Battery Factory by High Pressure Plasma System of Ozone Technology," *The Journal of Applied Science*, 15 (1), pp. 1-13.
21. Somkerd, T. and Suwannawittaya, P., 2019, "The Study of Catalytic Ozonation in Effluent Pulp and Paper Industry," *Proceedings of 57th Kasetsart University Annual Conference: Science and Genetic Engineering, Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment*, 29 January – 1 February 2019, Bangkok, Thailand, , pp. 917-924.
22. Chodok, P., 2017, Optimization of Culture Conditions for Extracellular 5-Aminolevulinic Acid Production by *Rhodospseudomonas palustris* LBL15 Using Response Surface Methodology," *Burapha Science Journal*, 22 (2), pp. 300-316.
23. Phanyusoh, D., Somnuk, K. and Prateepchaitkul, G., 2019, "Optimization of Ethyl Ester Production from Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) Using Double-Step Esterification Process: A Response Surface Methodology Approach," *Engineering Journal Chiang Mai University*, 26 (1), pp. 107-120.
24. Kaewploy, S., 2016, "Optimal Parameter in Tempering of Alloy Steels Using Response Surface Methodology," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, 2 (2), pp. 49-55.
25. Mueanmas, C., 2022, "Study of Palm Oil Catalytic Cracking on ZSM-5 Zeolite for Production of Organic Liquid Product Using Response Surface Methodology," *Burapha Science Journal*, 27 (3), pp. 1911-1929.
26. Awapak, D., Mahae, N. and Pitchairat, D., 2013, "Optimization of Polysaccharide Extraction from *Gracilaria fisheri* Using Response Surface Methodology," *KKU Science Journal*, 41 (2), pp. 414-430.

