



การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการล้างผักในโรงงานด้วยเทคโนโลยีพลาสมา

นัทพงศ์ ยาวิชัย และ คมกฤต เล็กสกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

* ผู้พิมพ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9700 4927 อีเมล: komgrit@eng.cmu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.001

รับเมื่อ 21 กรกฎาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 6 ตุลาคม 2564 ตอรับเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 7 กันยายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาเจ็ทชนิดคลื่นความถี่วิทยุ (Plasma Jet RF) ให้มีประสิทธิภาพเพียงพอในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^3) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้ 1) กำลังไฟฟ้าในช่วง 20–30 วัตต์ 2) อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนในช่วง 2–4 ลิตรต่อนาที และผสมก๊าซออกซิเจนในอัตราร้อยละ 1 ของก๊าซอาร์กอน และ 3) ระยะเวลาในการดิสชาร์จในช่วง 10–20 นาที ประเมินประสิทธิภาพของการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาจากปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ที่พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที และระยะเวลาในการดิสชาร์จ 10 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 54.07

คำสำคัญ: เทคโนโลยีพลาสมา บำบัดน้ำเสีย การออกแบบการทดลอง

การอ้างอิงบทความ: นัทพงศ์ ยาวิชัย และ คมกฤต เล็กสกุล, “การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการล้างผักในโรงงานด้วยเทคโนโลยีพลาสมา,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 234-045249, ต.ค.-ธ.ค. 2566.



Application of Experimental Design to Improve Wastewater Quality from the Process of Washing Vegetables in Factory by Plasma Technology

Nattapong Yawichai and Komgrit Leksakul*

Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering , Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9700 4927, E-mail: komgrit@eng.cmu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.001

Received 21 July 2021; Revised 6 October 2021; Accepted 23 November 2021; Published online: 7 September 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study wastewater treatment by Plasma jet RF to explore its effectiveness in improving wastewater quality. Full factorial designs with two levels and three center points at the 95% confidence level were applied for this purpose. Three factors were studied: 1) 20–30 Watts of the power; 2) Argon gas flow rate of 2–4 L/min and the addition of 1% oxygen to argon; and 3) the discharge time of 10–20 minutes. Then the performance of the plasma wastewater treatment system was evaluated based on the total viable plate count. As a result, the optimal parameter set was defined as the power of 20 Watts, argon gas flow rate of 4 L/min, 1% oxygen in argon and discharge time of 10 minutes. The optimal parameters could reduce the total viable plate count by 54.07%.

Keywords: Plasma Technology, Wastewater Treatment, Design of Experiment

Please cite this article as: N. Yawichai and K. Leksakul, "Application of experimental design to improve wastewater quality from the process of washing vegetables in factory by plasma technology," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–10, ID. 234-045249, Oct.–Dec. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ปัญหามลภาวะทางน้ำในปัจจุบันมักเกิดจากการระบายน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และกิจกรรมต่างๆ ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำเสียของแหล่งชุมชน ซึ่งเกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนและกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลาย ภายในครัวเรือนและอาคารประเภทต่างๆ เช่น อาคารบ้านเรือน โรงแรม ตลาดสด และโรงพยาบาล เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำ โดยในน้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบต่างๆ เช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก น้ำมัน และจุลินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เกิดการเน่าเสียและมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องบำบัดน้ำเสียนั้นให้มีประสิทธิภาพเพียงพอเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

[1] โดยทั่วไปสามารถแบ่งการบำบัดน้ำเสียตามกลไกการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ 1) การบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นวิธีการแยกเอาสิ่งเจือปนออกจากน้ำเสีย เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ เศษอาหาร ไขมันและน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้จะแยกตะกอนได้เพียงประมาณร้อยละ 50-65 2) การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีนี้จะใช้สำหรับน้ำเสียที่มีส่วนประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้ คือ ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ เป็นต้น แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ และ 3) การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้จุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสีย วิธีนี้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์

โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย [2]

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดมลพิษทางกายภาพ เคมี และชีวภาพจากน้ำเสีย ถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งการบำบัดโดยทั่วไปแล้วมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป [3] และในปัจจุบันเทคโนโลยีพลาสมาซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่มีการศึกษาและพัฒนาถูกนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น [4] การทำความสะอาดพื้นผิววงจรด้วยพลาสมาในการกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็กบนผิวชิ้นงานได้ดี รวมถึงการบำบัดน้ำเสียที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้

พลาสมาถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและทำลายการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปองค์ประกอบที่สำคัญของพลาสมาจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน, ไอออน โมเลกุล อะตอม โปรตอน และอนุภาคลิเธียม ซึ่งอนุภาคลิเธียมเป็นองค์ประกอบที่มีความไวต่อการออกซิเดชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคลิเธียมไฮดรอกไซด์ สำหรับพลาสมาในเฟสของเหลวนั้น อนุภาคลิเธียมไฮดรอกไซด์จะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำปฏิกิริยาในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ โดยกลไกการยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์จากพลาสมาที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ทางเคมีระหว่างผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์กับพลาสมาและการเกิดความเสียหายต่อสารพันธุกรรม (DNA) และโปรตีน [5]

รายงานของ Du และ Lin [6] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำสำหรับบำบัดน้ำเสีย โดยดิสชาร์จในเฟสของก๊าซหรือเฟสผสมของก๊าซและของเหลวทำให้เกิดไฮดรอกซิล โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำลายพันธะ C-C ของสารอินทรีย์ในน้ำเสียและสร้างพันธะ C-OH เพื่อให้โครงสร้างของสารอินทรีย์ถูกทำลายโดยมีงานวิจัยของทักษ์ไวย [7] ได้พัฒนาสร้างต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคพลาสมาได้น้ำ โดยการปล่อยแรงดันไฟฟ้าแรงสูงแบบพัลส์เพื่อให้เกิดการดิสชาร์จในน้ำพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพใน

การลดค่าบีโอดี และค่าซีโอดี นอกจากนี้ Sato [8] ยังพบว่าการทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสารอินทรีย์ และฆ่าเชื้อเชื้อแบคทีเรียในน้ำเสียได้ดีมากขึ้น

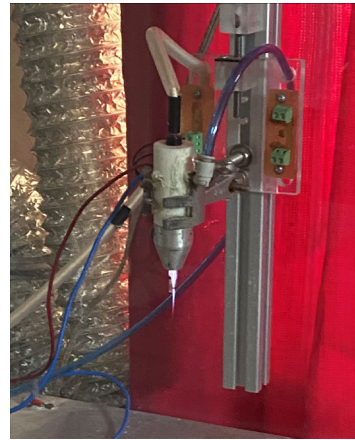
จากการศึกษาผลงานวิจัยต่างๆ ในอดีตที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของพลาสมาที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นหาประสิทธิภาพจากการนำพลาสมาเจ็ทชนิดคลื่นความถี่วิทยุ ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียร่วมกับ [9] ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ประเมินประสิทธิภาพด้วยปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการใช้พลาสมาเจ็ทชนิดคลื่นความถี่วิทยุ และสถานะที่เหมาะสมต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

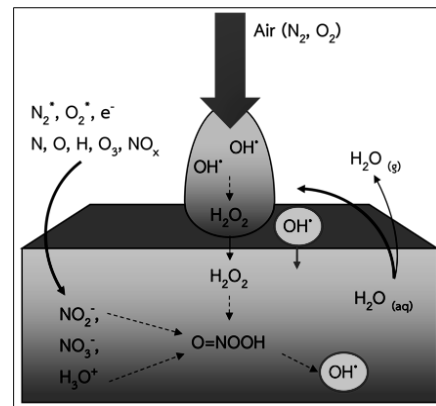
2.1 วัสดุและวิธีการทดลอง

2.3.1 น้ำเสียสำหรับการทดลองได้มาจากกระบวนการผลิต ล้างวัตถุดิบและอุปกรณ์ โดยน้ำเสียที่นำมาทำการทดลองนั้นได้เก็บมาจากบ่อพักรวมน้ำเสีย โดยทั่วไปแล้วขั้นตอนกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีวัตถุประสงค์หลักของแต่ละกระบวนการแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมในการนำเทคโนโลยีพลาสมาไปใช้บำบัดน้ำเสียนั้นจะเป็นการใช้ในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ซึ่งเป็นการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียก่อนที่จะลงสู่แหล่งน้ำภายนอก หรือนำกลับมาใช้ใหม่

2.3.2 ในการดำเนินงานวิจัยอุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องพลาสมาเจ็ทชนิดคลื่นความถี่วิทยุแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นพลาสมาเจ็ทความดันบรรยากาศ ถือเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ปริมาตรซิมแพร์ (Volumetric Diffuse Non-thermal Plasma) เป็นการรวมข้อดีของเทคนิคการประยุกต์ใช้พลาสมาความดันต่ำและแบบโคโรนาเข้าไว้ด้วยกัน หากแต่จะใช้หลักการดิสชาร์จข้ามฉนวน โดยเป็นการสร้างปริมาตรพลาสมาในระบบเปิดและมีการใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน ซีนอน หรือไนโตรเจน เป็นก๊าซพา (Carrier Gas) เข้าช่วยกระจายตัวพลาสมาและอาจมีก๊าซปฏิกิริยา (Reactive Gas) เช่น ออกซิเจน ไอน้ำ ผสมในปริมาณน้อย พลาสมาเกิด



รูปที่ 1 เครื่องพลาสมาเจ็ทชนิดคลื่นความถี่วิทยุ



รูปที่ 2 แสดงวิธีดิสชาร์จเหนือผิวของเหลวอนุพลพลาสมา อาทิ $\bullet OH$ O_3 NO_x แพร่ซึมผ่านผิวของเหลว

จากการให้กระแสไฟฟ้าผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ด้วยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าและการไหลของก๊าซ (Gas Flow) และจะถูกพ่นออกจากช่องปลายเปิดขนาดเล็ก ทำให้มีลักษณะเป็นลำพลาสมาหรือลำเจ็ทหรือมีรูปร่างคล้ายเข็ม ข้อดี คือ พลาสมาจะมีการกระจายตัวในลำเจ็ทสม่ำเสมอ และสามารถเข้าถึงพื้นผิวตัวอย่างหรือชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10]

จากรูปที่ 2 แสดงการดิสชาร์จเหนือผิวของเหลว โดยวิธีเจ็ทพลาสมาในการผลิตอนุพลก่อนที่อนุพลพลาสมาที่เกิดขึ้นจะแพร่ซึมเข้าสู่ผิวด้านบนของเหลวแล้วจึงละลาย (Dissolve) ในเนื้อของเหลวและนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเคมีลำดับอื่นๆ

ได้ต่อไป รวมถึงการคงอยู่ในของเหลวกลายเป็นสารละลายพลาสมา โดย [7] ประจุบวกและลบของพลาสมาจะเข้าไปจับรอบพื้นผิวอนุภาคของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสียหลังจากเข้าไปเกาะที่พื้นผิวรอบอนุภาคของเชื้อจุลินทรีย์แล้วประจุบวกและลบจะรวมกันเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกาะกันอย่างเหนียวแน่น ไฮโดรเจน (H) ที่อยู่ภายในเชื้อจุลินทรีย์จะถูกดึงเข้าไปรวมกันกับไฮดรอกไซด์ไอออน จะกลายเป็นน้ำ เมื่อเชื้อจุลินทรีย์ขาดองค์ประกอบของไฮโดรเจนโดยไฮโดรเจนคือ องค์ประกอบของโปรตีนภายในเชื้อจุลินทรีย์มีผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์ก็จะแตกสลายและเชื้อจุลินทรีย์ก็จะตายลง

2.2 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k (Full Factorial design) โดยปัจจัยที่ศึกษาและระดับของปัจจัยที่ศึกษานั้นผู้วิจัยได้ทำการสอบถามจากวิศวกรผู้ชำนาญการประจำเครื่องและทำการศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรม จึงได้ข้อสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทั้งหมด 3 ปัจจัยแสดงดังตารางที่ 1 โดยมีปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้ 1) กำลังไฟฟ้า 2) อัตราการไหลของก๊าซ และ 3) ระยะเวลาในการดิสชาร์จ และตัวแปรตามในการทดลอง คือ ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ รวมทั้งทำการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 3 จุด จำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ เพื่อเป็นการเช็คความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีความสม่ำเสมอและมีความเพียงพอของการทดลองหรือไม่ และมีลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่ม จะทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองรวมทั้งหมด $(2^3 \times 3) + 3 = 27$ การทดลอง และสร้างตารางการออกแบบการทดลองจากโปรแกรมมินิแทป 19 แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	ต่ำ	กลาง	สูง	
กำลังไฟฟ้า (A)	20	25	30	วัตต์
ระยะเวลาในการดิสชาร์จ (B)	10	15	20	นาที
อัตราการไหลของก๊าซ (C)	2	3	4	ลิตร/นาที

2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีพลาสมา

2.4.1 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

นำตัวอย่างน้ำเสียโดยปิเปตตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ไปทำความสะอาดที่ระดับ $10^{-1} - 10^{-5}$ เนื่องจากโดยปกติการนับเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีการ Spread Plate Method จะนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ 30-300 โคโลนี และจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่ระดับความเจือจาง 10^{-2} สามารถนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ได้ระหว่างจำนวน 30-300 โคโลนี จากนั้นปิเปตตัวอย่างปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ที่ระดับความเจือจาง 10^{-2} ไปบนพื้นผิวของอาหารวุ้นเลี้ยงเชื้อ NA ที่แข็งตัวแล้วใช้แท่งแก้วรูปร่างตัวแอล (L) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วโดยการจุ่มใน 95 เปอร์เซ็นต์ เอทานอล ลนไฟ และทำให้เย็นแล้วทำการให้เชื้อกระจายในจานเพาะเชื้อ ให้ทั่วผิวอาหารวุ้น จากนั้นนำไปบ่มตู้บ่มเชื้อ (Incubator) อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญและคำนวณปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในหน่วย Log CFU/ml ดังสมการที่ (1) [11]

$$CFU/ml = \frac{\text{Numbers of colony}}{\text{Quantity plated}} \times \frac{1}{\text{Total dilution}} \quad (1)$$

2.4.2 คุณภาพน้ำเสีย

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย โดยทำการส่งตัวอย่างวิเคราะห์ค่าบีโอดีและค่าซีโอดี ซึ่งเทคนิคในการวิเคราะห์และวิธีที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 [12] ซึ่งเป็นการนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดไปทดสอบเพื่อต้องการทราบปริมาณคุณภาพน้ำเสียหลังจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียด้วยพลาสมาแล้ว

ตารางที่ 2 เทคนิคในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

ตัวแปร	หน่วย	LOQ	LOD	วิธีทดสอบ
BOD	mg/L	-	-	**part 5210 B and part 4500-O C
COD	mg/L-O ₂	-	-	**part 5220

หมายเหตุ: **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF, 23rd edition, 2017. ND = Not Detected (ไม่พบ), LOQ = Limit of Quantitation, LOD = Limit of Detection

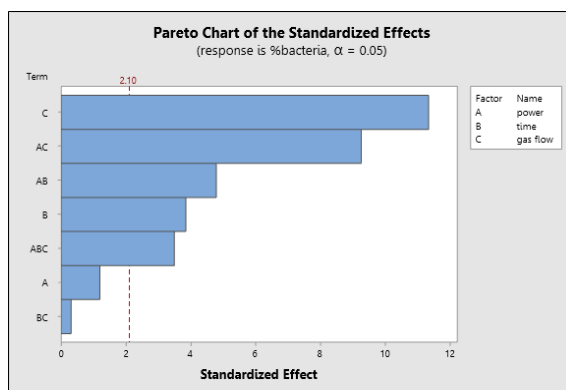
ตารางที่ 3 ผลการออกแบบการทดลองของร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

ลำดับ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	อัตราการไหลของก๊าซ (ลิตร/นาที)	เวลา (นาที)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (Log CFU/มิลลิลิตร)	ค่าเฉลี่ยของ %โคลนที่เปลี่ยนไป (%)
ตัวแปรควบคุม	-	-	-	16,400	-
1	20	2	10	16,233.33	1.02
2	30	2	10	13,233.33	19.31
3	20	2	20	22,666.67	-38.21
4	30	2	20	13,000	20.73
5	20	4	10	6,466.67	60.57
6	30	4	10	11,633.33	29.07
7	20	4	20	9,166.67	44.11
8	30	4	20	10,666.67	34.96
9	20	2	10	15,100	7.93
10	30	2	10	14,900	9.15
11	20	2	20	24,600	-50
12	30	2	20	11,433.33	30.28
13	20	4	10	6,766.67	58.74
14	30	4	10	11,566.67	29.47
15	20	4	20	10,400	36.59
16	30	4	20	14,850	9.45
17	20	2	10	16,033.33	2.24
18	30	2	10	15,733.33	4.07
19	20	2	20	20,100	-22.56
20	30	2	20	12,800	21.95
21	20	4	10	7,133.33	56.50
22	30	4	10	12,200	25.61
23	20	4	20	8,566.67	47.76
24	30	4	20	13,500	17.68
25	25	3	15	14,833.33	9.55
26	25	3	15	16,266.67	0.81
27	25	3	15	13,433.33	18.09

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

ผลของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในหน่วย Log CFU/ml และคำนวณปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดคิดเป็นร้อยละเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ได้ผลแสดงดังตารางที่ 3 และจากการทดลองนำเสียชุดควบคุมเปรียบเทียบกับชุด



รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

ทดลองที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ซึ่งมีจำนวนจุลินทรีย์ตั้งต้น 16,400 Log CFU/ml พบว่า พารามิเตอร์ที่กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที และก๊าซผสมก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 ที่ระยะเวลา 10 นาที จากการทดลอง 3 ซ้ำ สามารถนับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ 7,533.33 Log CFU/ml หรือคิดเป็นร้อยละ 54.07

จากตารางที่ 3 ค่าที่ได้เป็นลบพบว่า มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในหน่วย Log CFU/ml มากกว่าชุดควบคุม ส่งผลให้การคำนวณค่าร้อยละการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมีค่าลดลง

3.2 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

3.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการวิเคราะห์ที่ความผันแปรหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทดลองกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha = 0.05$) จากโปรแกรมมินิแทป 19

จากรูปที่ 3 แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) แสดงปัจจัยส่งผลต่อร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยแผนภูมิจะแสดงค่าสัมบูรณ์ของผลกระทบ (Standardized Effect) ถ้ากราฟของปัจจัยใดมีค่าเกินเส้นอ้างอิงที่ค่าเท่ากับ 2.10 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยนั้นส่งผลต่อร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

จากผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรมมินิแทป 19 ที่แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อชี้ให้เห็นถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดแล้ว

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value
Model	8	17270.5	2158.81	33.76	0.000
Linear	3	9277.7	3092.57	48.36	0.000
A	1	92.2	92.20	1.44	0.245
B	1	949.3	949.29	14.84	0.001
C	1	8236.2	8236.21	128.78	0.000
2-Way	3	6967.2	2322.39	36.31	0.000
A*B	1	1467.7	1467.66	22.95	0.000
A*C	1	5493.4	5493.40	85.90	0.000
B*C	1	6.1	6.12	0.10	0.761
3-Way	1	783.2	783.18	12.25	0.003
A*B*C	1	783.2	783.18	12.25	0.003
Curvature	1	242.4	242.40	3.79	0.067
Error	18	1151.2	63.95		
Total	26	18421.6			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)		
7.99708	93.75%	90.97%	85.94%		

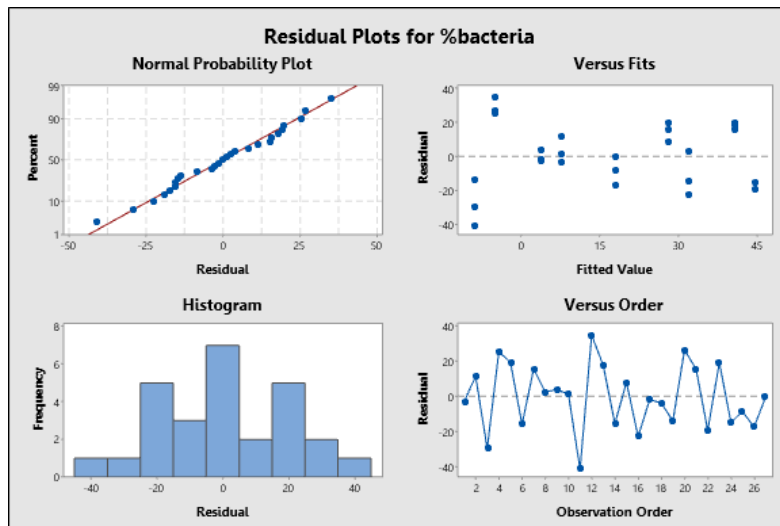
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจากการทดลองจากตารางที่ 4 มีค่า R-square เท่ากับ 93.75 เปอร์เซ็นต์ และค่า Adjusted R-square เท่ากับ 90.97 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้มีความเหมาะสมและมีจำนวนเพียงพอต่อการประมาณค่าพารามิเตอร์ของร้อยละการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และการตรวจสอบ Curvature แสดงให้เห็นว่าการทดสอบเส้นโค้งด้วยจุดตรงกลาง (Center Points) นั้นไม่มีนัยสำคัญ (ค่า p -value = 0.067) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามนี้กับปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดนั้นเป็นเส้นตรง

จากนั้นคัดกรองผลกระทบที่มีต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญพบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ B และ C ส่วนปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้แก่ AB, AC, และ ABC ซึ่งมีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัย A, B, C, AB, AC, ABC มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และผลกระทบร่วม AB, AC และ ABC มีนัยสำคัญจึงรวมผลกระทบหลัก A ด้วย ดังนั้นสร้างแบบจำลองได้ดังสมการที่ (2)

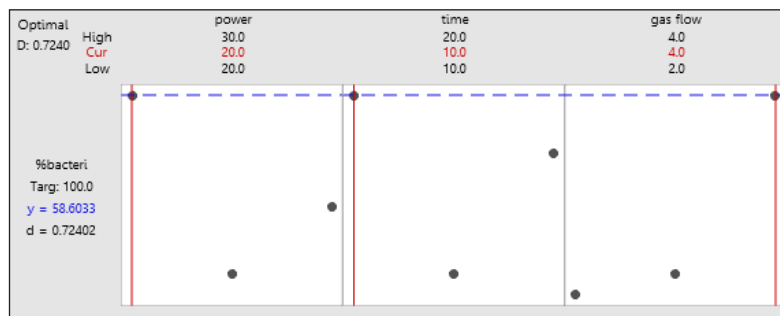
$$\text{ร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด} = 124.5 - 5.51A - 26.52B + 7.0C + 0.998AB + 0.40AC - 0.2285ABC - 9.53CtPt \quad (2)$$

3.2.3 การตรวจสอบความความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เป็นการตรวจสอบรูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งสามารถบ่งบอกความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้แสดงดังรูปที่ 4 โดยที่ 1) เป็นการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) พบว่า มีการกระจายตัวของข้อมูลตามแนวเส้นตรง จึงสามารถประมาณได้ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนจากแผนภูมิการกระจาย (Versus Fits) ของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าส่วนตกค้างพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่มทั้งทางบวกและทางลบและไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่แน่นอน 3) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติจากแผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram) พบว่า ข้อมูลมีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และ 4) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจาย (Versus Order) พบว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและมีรูปแบบของข้อมูลที่ไม่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลส่วนตกค้างไม่ขึ้นกับลำดับของการทดลอง

3.2.4 การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยทำการกำหนดค่า Target แสดงดังตารางที่ 5 เป็นค่าที่สูงที่สุดของการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในหน่วยร้อยละ ซึ่งกำหนดค่าเท่ากับร้อยละ 100 จากผลการทดลองที่ได้สามารถ



รูปที่ 4 การตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง



รูปที่ 5 ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

พยากรณ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้เท่ากับร้อยละ 58.60 แสดงดังรูปที่ 5 และจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที และก๊าซผสมก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 ที่ระยะเวลา 10 นาที

ตารางที่ 5 เงื่อนไขที่ดีที่สุดจาก Response Optimizer

เป้าหมาย	ค่าต่ำ	ค่าเป้าหมาย	ค่าสูง
ร้อยละปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด	-50	100	110

3.3 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ในการทดลองเพื่อยืนยันผลบนค่าเหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีปัจจัย กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที และก๊าซผสมก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 ที่ระยะเวลา 10 นาที แล้วทำการทดลองทั้งหมด 5 ซ้ำ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่นับได้ในหน่วย Log CFU/ml มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 9,500 แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ที่แสดงดังรูปที่ 5 คือ 8,866.67 Log CFU/ml พบว่า ผลการทดลองเพื่อยืนยันผลต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในหน่วย Log CFU/ml มากกว่าค่าที่ได้จากการพยากรณ์ร้อยละ 7

ตารางที่ 6 การทดลองเพื่อยืนยันผล

ลำดับการทดลอง	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (Log CFU/ml)
ชุดควบคุม	25,666.67
1	15,200
2	17,300
3	16,000
4	18,700
5	19,500
ค่าเฉลี่ย	16,166.67

3.4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยค่าบีโอดีและซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดพบว่า ค่าบีโอดีและซีโอดี เท่ากับ 1,494.13 และ 2,476.19 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมแสดงให้เห็นว่า ค่าซีโอดีมีค่าลดลง คิดเป็นร้อยละ 23.08 และค่าบีโอดีมีค่าเท่าเดิมจากการวิเคราะห์โดยค่าบีโอดีเป็นค่าความต้องการออกซิเจนของเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อใช้ในการออกซิโดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย เมื่อใช้พลาสมาไปบำบัดน้ำเสียแล้ว พลาสมาจะไปลดการใช้ออกซิเจนของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในการออกซิโดซ์สารอินทรีย์ที่ปนอยู่ในน้ำเสียได้ ทำให้ค่าบีโอดีไม่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของปัจจัยทางด้านจุลินทรีย์ เช่น ชนิดและลักษณะทางกายภาพของจุลินทรีย์อาจมีผลต่อการต้านทานของสารฆ่าเชื้อชนิดต่างๆ หรือปริมาณสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียมีปริมาณมาก เป็นต้น

4. อภิปรายผลและสรุป

4.1 สรุปผลการศึกษาค้นคว้า

จากผลการทดลองพบว่า การนำวิธีการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูป (2^3) กับการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียด้วยพลาสมาเจ็ตชนิดคลื่นความถี่วิทยุ สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลดปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ คือ กำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ อัตราการไหลของก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที และก๊าซผสมก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1 ที่ระยะเวลา 10 นาที

โดยจากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียด้วยวิธีพลาสมาพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสามารถทำให้เกิดองค์ประกอบของพลาสมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคลิเธียมไฮดรอกไซด์ที่ทำให้สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนอยู่ในน้ำเสียได้ คิดเป็นร้อยละ 54.07

4.2 อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลการทดลองงานวิจัยครั้งนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนกับผลลัพธ์ที่ได้จริง ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุและองค์ประกอบในหลายๆ ส่วน เช่น ความสมบูรณ์ของกระบวนการปล่อยพลาสมาอาจมีความคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้ หรือปัจจัยรบกวนอื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมให้อยู่ในพารามิเตอร์ที่ต้องการได้โดยตรง เช่น ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องพลาสมาเจ็ต ระยะเวลา หรือปัจจัยทางด้านจุลินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ในการทดลองได้

ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยในอนาคต คือ การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยพลาสมาเจ็ตชนิดคลื่นความถี่วิทยุหรือเทคนิคอื่นๆ มากขึ้น เพื่อหาข้อดีและข้อเสียแล้วนำมาปรับปรุงหรือประยุกต์ใช้ร่วมกันกับการบำบัดน้ำเสียแบบดั้งเดิมและใช้ได้จริง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความคุ้มค่าหรือค่าใช้จ่าย เป็นต้น ซึ่งอาจทำให้เกิดองค์ประกอบต่างๆ ของพลาสมาที่ดียิ่งขึ้นและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์หรือลดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีได้มากยิ่งขึ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เครื่องพลาสมาเจ็ต และห้องปฏิบัติการสำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollution Control Department. *Domestic Wastewater Treatment System Guide*. [Online].



- (in Thai) Available: <https://www.pcd.go.th/publication/4241/>
- [2] Encare Innovation Co., Ltd. *Wastewater treatment system*. [Online]. (in Thai) Available: <https://www.xn--l3ckbaaa2db3etccke7b7kwfqcg.net/>
- [3] King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. *Documentation according to the scope of employment of TOR clause 4.2*. [Online]. (in Thai) Available: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/BibA11335-3.Documentation.pdf>
- [4] N. Jornsano, C. Jaturanonda, and V. Tangwarodomnukun, "Optimization of surface cleaning process for flexible printed circuit substrates using plasma," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 567–576, 2018 (in Thai).
- [5] S. Janthima, C. Sawangrat, D. Boonyawan, S. Lumyong, J. Kumla, and N. Suwannarach, "Appropriate parameters of plasma activated water for growth inhibition of *E. coli* by Box-Behnken design," *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 26, no. 2, pp. 179–189, 2019 (in Thai).
- [6] Z. Du and X. Lin, "Research progress in application of low temperature plasma technology for wastewater treatment," presented at the IOP Conference Series Earth and Environmental Science, Hangzhou, China, 2020.
- [7] T. Supanrnp, "A Prototype development of wastewater treatment system by using underwater plasma technique," M.S. Thesis, Department of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 2018 (in Thai).
- [8] M. Sato, "Degradation of organic contaminants in water by plasma," *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 8–14, 2009.
- [9] S. Shevasuthisilp, *Design and Analysis of Experiments Strategies in Engineering*. Chiang Mai: Faculty of Engineering Chiang Mai University Book, 2014, pp. 331–386 (in Thai).
- [10] D. Boonyawan, *Physics of plasma*. Chiang Mai: Science CMU Printing Service, 2018 (in Thai).
- [11] e-Learning PSRU, *Total Viable Plate Count Method*. [Online]. (in Thai) Available: http://elearning.psu.ac.th/courses/192/31_บทปฏิบัติการที่%203.pdf
- [12] Science and Technology Service Center (STSC-CMU), "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF, 23rd edition, 2017," Faculty of Science, Chiang Mai University, Rep. TR 64 (0632-34), May. 2021.