



# การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตีชันด้วยวิธีพื้นผิวดูดซับสอง

ธนกฤต นนท์ชนะ<sup>1</sup> นพรัตน์ อมัตริรัตน์<sup>2</sup> กุลเชษฐ เพียรทอง<sup>3</sup> และ อธิธิพล วรพันธ์<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาระบบราง, คณะระบบรางและการขนส่ง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

<sup>4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

\* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ittipon.wo@rmu.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 26 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตีชันเป็นตัวช่วย วิธีพื้นผิวดูดซับสองถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ จากผลการทดลองพบว่าคาวิตีชันที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์สามารถช่วยลดปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญคือระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ดีด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9462 และสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียคือระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตรทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงจาก 200 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตรเหลือ 0 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตร

**คำสำคัญ:** โคลิฟอร์มแบคทีเรีย; วิธีพื้นผิวดูดซับสอง; แผ่นออริฟิซแบบหลายรู; ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิตีชัน

# Optimization of Coliform Bacteria Removal in Surface Water using a Hydrodynamic Cavitation Reactor with the Response Surface Methodology

Thanakrit Nonchana<sup>1</sup> Nopparat Amattirat<sup>2</sup> Kulachate Pianthong<sup>3</sup> and Ittipon Worapun<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Railway Systems, Faculty of Railway Systems and Transportation,  
Rajamangala University of Technology Isan

<sup>2</sup> Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,  
Rajamangala University of Technology Isan

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,  
Rajamangala University of Technology Isan

\* Corresponding Author, E-mail: ittipon.wo@rmuti.ac.th

Received: 7 January 2025; Revised: 26 June 2025; Accepted: 1 July 2025

Online Published: 20 August 2025

**Abstract:** This research aims to determine the optimal conditions for eliminating coliform bacteria in surface water using a hydrodynamic cavitation reactor. The response surface methodology was employed to analyze the influence of variables on the amount of total coliform bacteria. The studied variables included the duration of coliform bacteria removal, the number of holes, and the diameter of the holes on the orifice plate. The experimental results showed that the cavitation occurring within the reactor effectively reduced the amount of total coliform bacteria. The key variables significantly affecting the reduction of total coliform bacteria were the duration of removal, the number of holes, and the diameter of the holes on the orifice plate. The developed mathematical model was found to predict the amount of total coliform bacteria with high accuracy, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9462. The optimal conditions for eliminating coliform bacteria were determined to be a removal duration of 89.33 minutes, an orifice plate with 5 holes, and a hole diameter of 3 mm. Under these conditions, the amount of total coliform bacteria in surface water was reduced from 200 CFU/100 ml to 0 CFU/100 ml.

**Keywords:** Coliform bacteria; Response surface methodology; Multi-hole Orifice plates; Hydrodynamics cavitation react



## 1. บทนำ

ความมั่นคงด้านทรัพยากรน้ำถือเป็นหนึ่งในความท้าทายระดับโลกที่สำคัญยิ่ง การเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้สร้างความต้องการน้ำปริมาณมหาศาลต่อแหล่งน้ำจืด โดยเฉพาะแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำและทะเลสาบ ซึ่งมีความเปราะบางสูงต่อการปนเปื้อนทางจุลชีววิทยา อันเป็นความเสี่ยงโดยตรงต่อสุขภาพของประชาชน การปนเปื้อนแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Coliform Bacteria) และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Escherichia coli* (*E. coli*) ในแหล่งน้ำ เป็นดัชนีชี้วัดที่ชัดเจนถึงการปนเปื้อนจากสิ่งปนเปื้อน ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะมีเชื้อก่อโรคอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยและอาจนำไปสู่การระบาดของโรคทางเดินอาหารที่รุนแรงได้ เพื่อรับมือกับความท้าทายนี้ กระบวนการฆ่าเชื้อ (Disinfection) จึงเป็นหัวใจสำคัญของระบบการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสีย วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือการใช้คลอรีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของคลอรีนกลับมามีข้อเสียที่นำกังวลหลายประการ ประการสำคัญที่สุดคือ เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ตามธรรมชาติในน้ำ ก่อให้เกิดผลผลิตพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (Disinfection By-products, DBPs) โดยกลุ่มที่เป็นที่รู้จักและน่ากังวลมากที่สุดคือไตรฮาโลมีเทน (THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ถูกจัดว่าเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์หากได้รับอย่างต่อเนื่อง [1,2] นอกจากนี้การใช้คลอรีนยังอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและอาจไม่สามารถกำจัดจุลินทรีย์บางชนิดที่มีความทนทานสูงได้

ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้การแสวงหาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) และไฮโดรไดนามิกสคาวิเทชัน (Hydrodynamic Cavitation, HC) มีความน่าสนใจในฐานะเทคโนโลยีที่อาศัยหลักการทางกล โดยไม่ต้องเติมสารเคมีใดๆ เพิ่ม ปรากฏการณ์ HC เกิดขึ้นเมื่อของเหลวไหลผ่านส่วนคอด เช่น แผ่นออริฟิซ (Orifice Plate) ด้วยความเร็วสูงทำให้ความดันลดลงต่ำกว่าความดันไอของของเหลว เกิดเป็นฟองไอน้ำขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อฟองเหล่านี้เคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความดันสูงขึ้น จะเกิดการยุบตัวลงอย่างรุนแรงและฉับพลัน [3] การยุบตัวนี้ปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมาเฉพาะจุด สร้างกลไกการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ที่ทรงพลังทั้งทางกายภาพและเคมีพร้อมกัน กลไกทางกายภาพประกอบด้วยแรงเฉือนรุนแรงที่ทำลายผนังเซลล์ ประกอบกับการเกิดจุดอุณหภูมิสูง (Hot Spots) ที่อุณหภูมิสูงถึง 3,000–5,000 K และคลื่นกระแทก (Shock Waves) ที่ความดันสูงกว่า 1,000 บาร์ ในขณะที่ตัวกันสภาวะนี้ยังก่อให้เกิดกลไกทางเคมีคือ การแตกตัวของโมเลกุลน้ำ ( $H_2O$ ) กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radicals) โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิล ( $OH\cdot$ ) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถทำลายองค์ประกอบสำคัญของเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว [4]

ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้พิสูจน์ศักยภาพของ HC ในการกำจัดจุลินทรีย์ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของตัวแปรเชิงการทำงาน เช่น ความดันและระยะเวลาในการบำบัด [3-6] แต่การศึกษาจำนวนมากยังคงใช้วิธีการ



ทดลองแบบดั้งเดิมคือการปรับเปลี่ยนตัวแปรทีละค่า (One Variable at a Time) ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถอธิบายผลกระทบเชิงอันตรกิริยา (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการที่ซับซ้อนเช่นนี้ [7,8] เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าว วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) จึงเป็นเครื่องมือทางสถิติและการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลลัพธ์ของกระบวนการ และช่วยในการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Conditions) ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว [9] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ RSM ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกสควิเทชัน โดยจะศึกษาอิทธิพลร่วมของตัวแปรสำคัญ 3 ตัว ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรอบบนแผ่นออร์ฟิซ (N) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออร์ฟิซ (D) พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการให้สูงสุด

## 2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

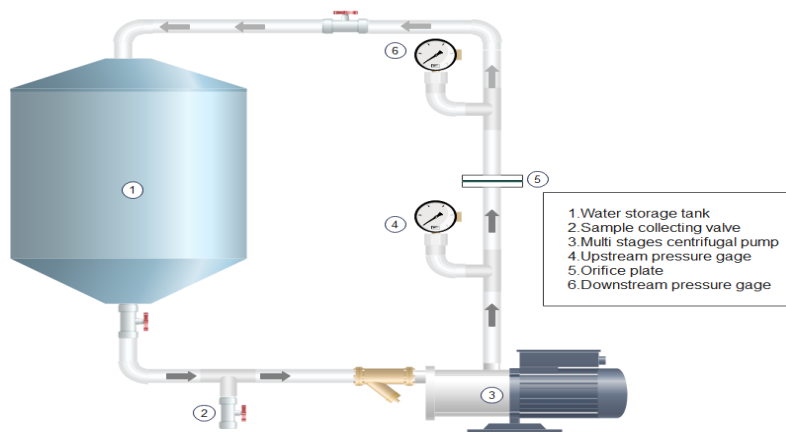
### 2.1 ชุดทดลองถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกควิเทชัน

งานวิจัยนี้อาศัยปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกสควิเทชันเพื่อกำจัดเชื้อโรคในน้ำ โดยเลือกใช้แผ่นออร์ฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำควิเทชันภายในถังปฏิกรณ์ ชุดทดลองที่ใช้ (ดังรูปที่ 1) ประกอบด้วย

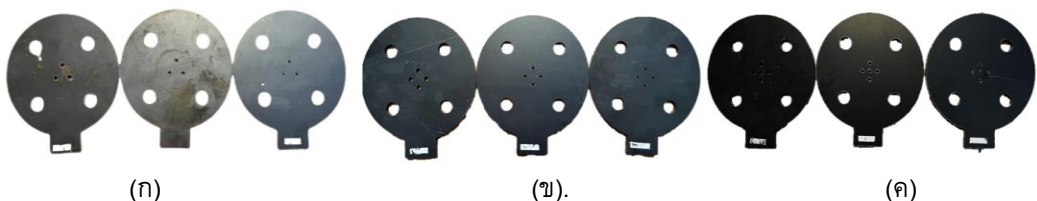
อุปกรณ์หลัก ได้แก่ ถังพักน้ำสแตนเลส (SUS 304) ขนาด 50 ลิตร และปั้มน้ำแรงดันสูง (Vertical Multi-stage, 0.75 kW) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มแรงดันให้น้ำสูงสุดถึง 0.8 เมกะปาสคาล ก่อนส่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ส่วนสำคัญของถังปฏิกรณ์คือท่อสำหรับติดตั้งแผ่นออร์ฟิซแบบหลายรู (ดังรูปที่ 2) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร แผ่นออร์ฟิซนี้เป็นหัวใจสำคัญในการสร้างควิเทชัน ชุดทดลองยังมีวาล์วเก็บตัวอย่างน้ำ และเกจวัดความดันทั้งทางด้านเข้าและทางออกเพื่อควบคุมและตรวจสอบสภาวะการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าชุดทดลองสามารถสร้างควิเทชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่า "เลขควิเทชัน" (Cavitation Number) ซึ่งเป็นตัวเลขไร้มิติที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของปรากฏการณ์ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) เพื่อยืนยันว่าสภาวะการทดลองเอื้อต่อการเกิดควิเทชันที่รุนแรงสำหรับการบำบัดน้ำ

$$\sigma = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \quad (1)$$

โดยที่  $\sigma$  คือเลขควิเทชัน,  $P_u$  คือความดันทางเข้าแผ่นออร์ฟิซ,  $P_d$  คือความดันทางออกจากแผ่นออร์ฟิซ และ  $P_v$  คือความดันไอของน้ำ จากการคำนวณหาเลขควิเทชันตามสมการที่ 1 พบว่าชุดทดลองที่ใช้แผ่นออร์ฟิซแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถสร้างปรากฏการณ์ควิเทชันได้แผ่นออร์ฟิซแต่ละแบบให้เลขควิเทชันอยู่ในช่วง 0.6-1.9 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ควิเทชันที่รุนแรง ทั้งนี้ค่าเลขควิเทชัน 0.2-0.8 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำผิวดิน [10]



รูปที่ 1 แผนผังแสดงรายละเอียดของชุดทดลองถึงปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาร์วี่เตชั่น



รูปที่ 2 ลักษณะของแผ่นออริฟิซแบบหลายรูที่ใช้ในงานวิจัยนี้:

(ก) แผ่นออริฟิซแบบ 3 รู (ข) แผ่นออริฟิซแบบ 4 รู และ (ค) แผ่นออริฟิซแบบ 5 รู

## 2.2 น้ำทิ้งผิวดินที่ใช้ในการทดลอง

น้ำผิวดินที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นน้ำผิวดินที่ได้มาจากน้ำทิ้งจากโรงอาหารกลางของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา ที่ปล่อยลงสู่บ่อบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย ในส่วนของการเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมดเริ่มต้นนั้นจะใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบจุด (Grab Sampling) โดยจุดเก็บตัวอย่างในระบบบำบัดน้ำเสียคือจุดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งนี้ สามารถหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบบคทีเรียทั้งหมดเริ่มต้นได้เท่ากับ 200 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร

## 2.3 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งทำให้สามารถหาเงื่อนไขของการทดลองทั้งหมด ( $n$ ) ได้จากสมการที่ (2)

$$n=2k(k-1)+c_0 \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า  $k$  คือ จำนวนของตัวแปรที่ทำการศึกษาและ  $c_0$  คือ จำนวนจุดศูนย์กลาง (Center Point) จากสมการที่ (2) งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งกำหนดให้มีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง



โดยใช้โปรแกรม Design-Expert® version 13 เป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) วัตถุประสงค์หลักของ RSM คือเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ หาสภาวะที่เหมาะสมและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาซึ่งคัดเลือกจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง มี 3 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ (N) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ (D) ส่วนผลตอบสนองที่สนใจคือปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ ตัวแปรแต่ละตัวถูกกำหนดไว้ 3 ระดับ คือระดับต่ำ (-1), กลาง (0), และสูง (+1) โดยมีช่วงการศึกษาดังนี้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 30-90 นาที จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ 3-5 รูน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งระดับและช่วงของค่าเหล่านี้อ้างอิงมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดสรุปในตารางที่ 1

## 2.4 วิธีการทดลอง

การทดลองดำเนินการโดยใช้ชุดทดลอง (รูปที่ 1) ตามเงื่อนไขทั้ง 17 รูปแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลอง (ตารางที่ 2) ในแต่ละการทดลอง จะเริ่มต้นด้วยการบรรจุน้ำทิ้งตัวอย่าง 20 ลิตรลงในถังพักน้ำ จากนั้นปรับค่าตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดเมื่อตั้งค่าตัวแปรแล้วทำการเปิดปั๊มน้ำแรงดันสูงและควบคุมความดันทางด้านเข้าให้มีค่าคงที่ที่ 0.8 เมกะ-ปาสคาล ตลอดการทดลอง เมื่อครบตามเงื่อนไขของแต่ละการทดลอง จะมีการทำซ้ำอีก 2 ครั้ง รวมเป็นการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำต่อหนึ่งเงื่อนไข จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด ค่าที่ได้จากทั้งสามซ้ำ จะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

| ตัวแปร                                      | หน่วย     | ระดับ    |          |          |
|---------------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|
|                                             |           | -1 (ต่ำ) | 0 (กลาง) | +1 (สูง) |
| ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T)    | นาที      | 30       | 60       | 90       |
| จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ (N)                   | รูน       | 3        | 4        | 5        |
| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ (D) | มิลลิเมตร | 2        | 3        | 4        |



ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขของการทดลองและค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (ค่าผลตอบสนอง)

| ลำดับการทดลอง | ตัวแปร                                      |                            |                                                     | ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร) |
|---------------|---------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|               | ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (นาที) | จำนวนรูปบนแผ่นออริฟิซ (รู) | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูปบนแผ่นออริฟิซ (มิลลิเมตร) |                                                         |
| 1             | 60                                          | 4                          | 3                                                   | 14.33                                                   |
| 2             | 60                                          | 4                          | 3                                                   | 15.33                                                   |
| 3             | 90                                          | 3                          | 3                                                   | 4.67                                                    |
| 4             | 60                                          | 4                          | 3                                                   | 13.67                                                   |
| 5             | 90                                          | 4                          | 4                                                   | 2.00                                                    |
| 6             | 60                                          | 5                          | 4                                                   | 3.67                                                    |
| 7             | 60                                          | 4                          | 3                                                   | 17.00                                                   |
| 8             | 90                                          | 5                          | 3                                                   | 1.33                                                    |
| 9             | 60                                          | 3                          | 4                                                   | 17.33                                                   |
| 10            | 30                                          | 4                          | 2                                                   | 21.67                                                   |
| 11            | 30                                          | 4                          | 4                                                   | 12.67                                                   |
| 12            | 60                                          | 4                          | 3                                                   | 15.67                                                   |
| 13            | 60                                          | 3                          | 2                                                   | 29.00                                                   |
| 14            | 30                                          | 5                          | 3                                                   | 9.33                                                    |
| 15            | 60                                          | 5                          | 2                                                   | 5.67                                                    |
| 16            | 90                                          | 4                          | 2                                                   | 3.67                                                    |
| 17            | 30                                          | 3                          | 3                                                   | 23.33                                                   |

## 2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลผลการทดลองของค่าผลตอบสนอง (ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย) ที่ได้จากรายการที่ 2 จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการพหุนามอันดับสอง (Second Order Polynomial Equation) ดังแสดงตามสมการที่ (3)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i>j}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า  $Y$  คือผลตอบสนองที่ทำการศึกษา (ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย)  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}$  และ  $\beta_{ij}$  คือ ค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสองและค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรร่วม ตามลำดับ โดยที่  $X_i$  และ  $X_j$  คือ ค่าตัวแปรอิสระและ  $k$  คือ จำนวนตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้การทดสอบค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนค่าความเหมาะสมและความพอเพียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) และค่านัยสำคัญทางสถิติของแต่ละพจน์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นพิจารณาจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาใช้วิธีการแก้ปัญหาจากการแก้สมการถดถอยและวิเคราะห์ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง

## 2.6 การหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ

การหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจะใช้วิธีการนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏจากชุดตรวจสอบแบบสำเร็จรูป Compact Dry EC for *E.coli* / Coliform ของบริษัท ออสคอน จำกัด ซึ่งชุดตรวจสอบมีลักษณะเป็นจานอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปสำหรับตรวจเชื้ออีโคไลน์ (*E.coli*) และโคลิฟอร์ม (Coliform) ประกอบไปด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อแบบ Selective ที่มีการเติม Chromogenic enzyme substrate 2 ชนิด คือ (1) X-Glue ที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์  $\beta$ -glucuronidase ทำให้โคโลนีอีโคไลน์เป็นสีน้ำเงินและ (2) Magenta-GAL ที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์  $\beta$ -galactosidase ทำให้โคโลนีโคลิฟอร์มเป็นสีม่วง โดยมีขั้นตอนในการวัดค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจะเริ่มจากการเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วหยดลงตรงกลางของจานอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นปิดฝา

จานอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วนำเข้าตู้บ่มเพื่อทำการบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงทำการนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏบนด้านหลังของจานเพาะเชื้อ โดยโคโลนีที่มีสีม่วงบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามการหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มโดยวิธีนี้ (ชุดตรวจสอบ Compact Dry EC) เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method 966.24 ในการนับจำนวนอีโคไลน์และโคลิฟอร์มแบคทีเรียพบว่า Compact Dry EC มีความคลาดเคลื่อนจากวิธีมาตรฐานประมาณ 7% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ สำหรับการใช้งานกับน้ำ (CFU/100mL) ความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในช่วง 5-15% ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของเชื้อ [11]

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 3.1 ตัวแบบจำลองและสมการถดถอย

จากผลการทดลองที่ได้ตามตารางที่ 2 เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกตัวแบบจำลองที่เหมาะสมจะได้ผลการวิเคราะห์ในรูปผลสรุปทางสถิติของแบบจำลอง (Model Summary Statistic) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ทั้งนี้ การยืนยันว่ารูปแบบสมการใดเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) โดยพบว่าตัวแบบจำลองกำลังสาม (Cubic) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุดคือเท่ากับ 0.9937 รองลงมาคือตัวแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9462 จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตัวแบบจำลองกำลังสามเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ แต่หากพิจารณาที่หมายเหตุ (Remark) จะพบว่าการแจ้งเตือนการเป็นคู่แฝด (Aliased)

หมายความว่า การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่เลือกใช้มีจำนวนของการทดลองไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดตัวแบบจำลองกำลังสามได้ ดังนั้นจึงเลือกตัวแบบจำลองกำลังสองเป็นตัวแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับการทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน ทั้งนี้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 เราสามารถนำผลการทดลองดังกล่าวมาเขียนเป็นสมการถดถอยสำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรที่ทำการศึกษากับค่าผลตอบสนองโดยได้รูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมดังแสดงตามสมการที่ (4)

$$Y=15.20-6.92T-6.79N-3.04D-4.72T^2 \quad (4)$$

### 3.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 4) ได้มีการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีผลดังแสดงในตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่ได้มีความสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.0012 ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวแปรที่ใช้ศึกษามีอิทธิพลต่อผลการทดลองจริง คุณภาพของแบบจำลองได้รับการยืนยันด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่สูงถึง 0.9462 ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้ถึง 94.62% ส่วนอีก 5.38% เป็นผลจากปัจจัยอื่นที่ควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ ( $Adj. R^2$ ) ก็มีค่าสูงถึง 0.8761 ซึ่งเป็น

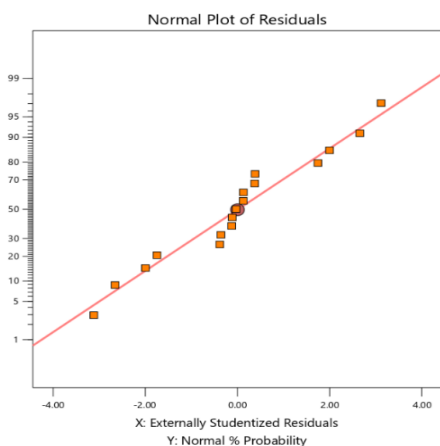
การยืนยันความเหมาะสมของแบบจำลองเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์พบว่าค่าความสมรูปของสมการ (Lack of Fit) มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\text{-value} = 0.0244$ ) ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ซับซ้อนกว่าที่แบบจำลองกำลังสองนี้จะสามารถอธิบายได้ทั้งหมด แต่เนื่องจากค่า  $R^2$  ที่สูงมากแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงมีความสามารถในการทำนายผลได้ดีเยี่ยมและเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย ( $Pred. R^2$ ) อยู่ที่ 0.229 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยสรุปแม้จะมีประเด็นเรื่อง Lack of fit แต่ด้วยค่า  $R^2$  และ  $Adj. R^2$  ที่สูงทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความน่าเชื่อถือและเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานควรคำนึงถึงข้อจำกัดคือไม่ควรนำแบบจำลองไปใช้ทำนายผลนอกช่วงของตัวแปรที่ทำการทดลองและควรพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น

### 3.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

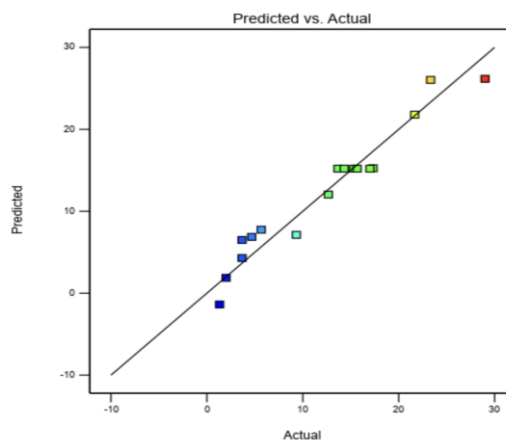
สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้มีการประเมินอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวผ่านการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า p-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 5) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ต่อการลดลงของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ได้แก่ พจน์เชิงเส้นของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรอบบนแผ่นออริฟิช (N) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอบบนแผ่นออริฟิช (D) และพจน์กำลังสองของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ( $T^2$ ) ในขณะที่พจน์อิทธิพล



รวมและพจน์กำลังสองของตัวแปรอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองผ่านกราฟวินิจฉัยในรูปที่ 3 โดยกราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้าง (รูปที่ 3 ก) แสดงข้อมูลที่กระจายตัวบนแนวเส้นตรง ซึ่งยืนยันว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและไม่มีค่าผิดปกติอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ทำนายโดยแบบจำลอง (รูปที่ 3 ข) แสดงให้เห็นว่าจุดข้อมูลมีการเกาะกลุ่มใกล้กับเส้นทแยงมุมเป็นอย่างดี สิ่งนี้บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการทำนายผลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่สูงถึง 0.9462 ดังนั้นการวิเคราะห์ทั้งหมดจึงเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน



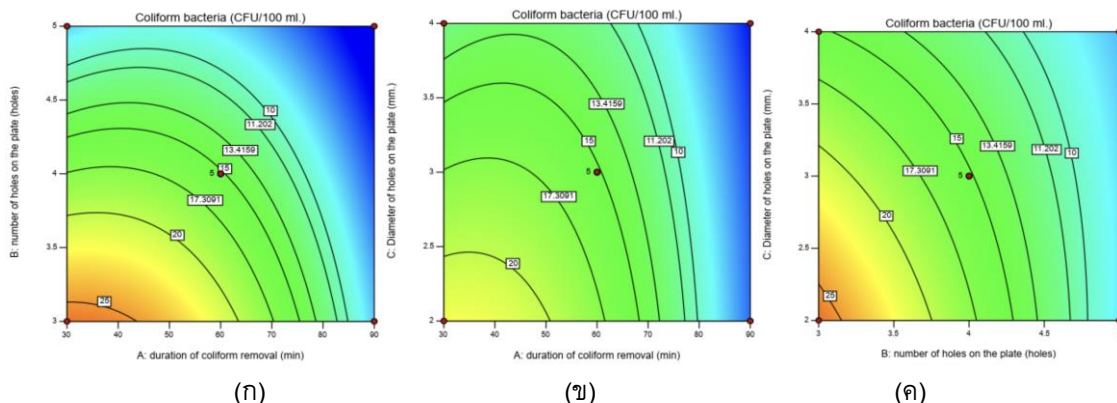
(ก)



(ข)

รูปที่ 3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง และ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย



รูปที่ 4 (ก) อิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (ข) อิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ และ (ค) อิทธิพลของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ

ทั้งนี้เมื่อใช้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียนานขึ้นจะทำให้ค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันกับจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับของตัวแปรทั้งสองที่ค่าสูง ๆ จะให้ค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่มีค่าต่ำ โดยค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 1.33 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตรที่ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 90 นาทีและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู เมื่อพิจารณารูปที่ 4 (ข) เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของค่าระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด โดยกำหนดให้ระดับของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซอยู่ที่ระดับกลางคือ 4 รูพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียนานขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์ม

แบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงอย่างต่อเนื่องและเมื่อเราพิจารณาที่ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซก็จะมีลักษณะของแนวโน้มที่คล้ายกันกับระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย กล่าวคือถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4 (ค) เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด โดยกำหนดให้ระดับของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียอยู่ที่ระดับกลางคือ 60 นาทีพบว่าจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงเช่นกัน



### 3.5 สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน

จากการคำนวณโดยใช้สมการถดถอยที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดพบว่าค่าที่ดีที่สุดตามทฤษฎีคือระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 4.911 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 2.867 มิลลิเมตร ซึ่งคาดว่าจะลดปริมาณแบคทีเรียเหลือ 0 ซีเอฟยู/100

มิลลิเมตรด้วยค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1.000 อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าจำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซเป็นเลขทศนิยมซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง จึงมีการปรับค่าเพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ โดยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมใหม่เป็น ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน

| Source    | Standard Derivative | R <sup>2</sup> | Adj. R <sup>2</sup> | Pred. R <sup>2</sup> | Remark    |
|-----------|---------------------|----------------|---------------------|----------------------|-----------|
| Linear    | 4.14                | 0.7874         | 0.7389              | 0.5977               | Suggested |
| 2FI       | 3.97                | 0.8495         | 0.7593              | 0.4049               |           |
| Quadratic | 2.84                | 0.9462         | 0.8761              | 0.2290               | Suggested |
| Cubic     | 1.28                | 0.9937         | 0.9978              |                      | Aliased   |

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

| Source          | Sum of square | df | Mean square | F-value | p-value |
|-----------------|---------------|----|-------------|---------|---------|
| Model           | 992.23        | 9  | 110.25      | 13.67   | 0.0012  |
| Residual        | 56.47         | 7  | 50.47       |         |         |
| Lack of fit     | 49.90         | 3  | 16.63       |         | 0.0244  |
| Pure error      | 6.58          | 4  | 1.64        | 10.12   |         |
| Corrected total | 1048.70       | 16 |             |         |         |

C.V. = 22.96%, R<sup>2</sup> = 0.9462, Adj. R<sup>2</sup> = 0.8769, Pred. R<sup>2</sup> = 0.229

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

| Source         | Coefficients | Standard error | p-value |
|----------------|--------------|----------------|---------|
| intercept      | 15.20        | 1.27           |         |
| T              | -6.92        | 1.00           | 0.0002  |
| N              | -6.79        | 1.00           | 0.0003  |
| D              | -3.04        | 1.00           | 0.0199  |
| T <sup>2</sup> | -4.72        | 1.38           | 0.0112  |

**ตารางที่ 6** การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

| ค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร                         |       | ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด<br>(ซีเอฟยูต่อ 100 มิลลิลิตร) |                      | ค่าอคติ <sup>1</sup><br>(Bias) |
|-----------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
|                                                     |       | ค่าที่ได้จากการทดลอง                                          | ค่าที่ได้จากการทำนาย |                                |
| ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (นาท)          | 89.33 |                                                               |                      |                                |
| จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ (รู)                          | 5     | 0                                                             | 0                    | 0                              |
| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ (มิลลิเมตร) | 3     |                                                               |                      |                                |

ค่าอคติ หาได้จาก  $[(ค่าที่ได้จากการทำนาย - ค่าที่ได้จากการทดลอง)/ค่าที่ได้จากการทำนาย] \times 100$

**3.6 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ มาทำการทดลองจริง ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้หรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6 จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ได้จากการทำนายทำให้ค่าอคติ (Bias) มีค่าเป็นร้อยละ 0 จึงเป็นการยืนยันว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและอนุมานได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินต่อไป

**4. สรุปผลการวิจัย**

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวดมบสนองสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาได้สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินคือที่ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูนบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูนบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตร จากสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินได้จนหมด กล่าวคือจากปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดเริ่มต้นในน้ำถึง 200 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตรก่อนเริ่มทดลองจนเหลือ 0 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร หลังจากทำการทดลอง



ตามสภาวะที่เหมาะสมแล้วเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลพบว่ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าเท่ากันซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ตรงกับผลการทดลองจริงและเป็นการยืนยันได้ว่าสมารถที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานจริงได้ต่อไป

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Parveen, S. Chowdhury and S. Goel, Environmental impacts of the widespread use of chlorine-based disinfectants during the COVID-19 pandemic, *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29, 85742-85760.
- [2] A. Ahmed, T. Noonari, H. Magsi and D. A. Mahar, Risk assessment of total and faecal coliform bacteria from drinking water supply of badin city, Pakistan, *Journal of Environmental Professionals Sri Lanka*, 2013, 2(2), 52-64.
- [3] M. Sivakumar and A. B. Pandit, Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2002, 9(3), 123-131.
- [4] S.S. Save, A.B. Pandit and J.B. Joshi, Use of hydrodynamic cavitation for large scale microbial cell disruption, *Ultrasonics-Sonochemistry*, 1997, 36(4), 259-264.
- [5] E. Karamah, F. Amalia, R. Ghaudenson and S. Bismo, Disinfection of escherichia coli bacteria using combination of ozonation and hydrodynamic cavitation method with venturi injector, *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 2018, 8(3), 811-817.
- [6] E. Burzio, F. Bersani, G.C.A. Caridi, R. Vesipa, L. Ridolfi and C. Manes, Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation, *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2020, 60, 104740.
- [7] S. Charoenrat, Y. Pookamnerd and S. Prasomthong, Consideration of the optimizing condition in welding hardfacing on wear resistance with hot-wire gas tungsten arc welding process by response surface methodology (RSM), *The Journal of Industrial Technology*, 2021, 17(2), 87 – 102. (in Thai)
- [8] P. Peasura and P. Laophasit, Mathematic model by response surface methodology and artificial neural network for predict result of tensile shear and nugget size of zinc coated steel JIS G3313 welded by resistance spot welding, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(3), 42-60. (in Thai)

- [9] I. Worapun, C. Chooppava and C. Thinvongpituk, Optimal conditions of friction welding process for AISI 1015 steel using response surface methodology, KKU Research Journal, 2013, 18(6), 909-924. (in Thai)
- [10] I. Worapun and A. Boonjaei, The study effect of orifice plates on intensifies degree of cavitation phenomenon inside hydrodynamic cavitation reactor, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(1), 78-92. (in Thai)
- [11] H. Kodaka, S. Mizuochi, H. Teramura, T. Nirazuka, D. Goins. J. Odumaru and Y. Kobubo, Comparison of the compact dry EC with the most probable number method (AOAC Official Method 966.24) for enumeration of escherichia coli and coliform bacteria in raw meats, Journal of AOAC International, 2006, 89(1), 100-114.