

Study on the efficiency of automatic village water disinfection system using ultraviolet radiation

Apaporn Sinthusarn^{1*}, Anucha Sinthusarn¹

¹Institute of Community Science Technology, Department of Science Service, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author's e-mail: apaporn@dss.go.th

Received: 24 May 2025, Revised: 29 July 2025, Accepted: 1 August 2025

Abstract

This research study aimed to evaluate the efficiency of an automatic ultraviolet (UV) disinfection system for village tap water, beginning with the system's design and development and followed by real-world application testing in target communities. The findings revealed that the automatic UV disinfection system effectively functioned and was appropriately designed for integration into various village tap water systems across Thailand. The system includes twelve low-pressure mercury UV lamps with a total power consumption of 658 watts. Lamps rated at 100, 75, and 18 watts produced UV doses of 9.314, 7.737, and 4.643 milliwatt-seconds per square centimeter, respectively, resulting in a significant microbiological reduction of *Escherichia coli* and most pathogens by 90% (1-log or D_{90}). At a water flow rate of 32 liters per second, the UV radiation achieved a 99% reduction (2-log or D_{99}) in microbial contamination. Field implementation was conducted at a large surface water village supply system in Moo 2, Phon Khrok Sub-district, Tha Tum District, Surin Province, where the system was installed at the main distribution pipe connected to the elevated water tank. The results confirmed effective disinfection; however, pathogen contamination was still detected at the endpoints due to pipeline recontamination. To address this, drinking water filtration systems developed by the Department of Science Service were installed to ensure compliance with the potable water quality standards of the Department of Health. This research is scalable for addressing village tap water quality nationwide and aligns with the 20-Year Master Plan for Water Resource Management (2018–2037), which mandates that every village have access to clean water for consumption and household use that meets quality standards.

Keywords: Efficiency, Disinfection system, Village tap water, Ultraviolet

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ โดยเริ่มจากการออกแบบและพัฒนาการทดสอบการใช้งานจริงในพื้นที่กลุ่มเป้าหมาย ผลการวิจัยสรุปได้ว่า ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ มีประสิทธิภาพการใช้งาน โดยระบบได้รับการออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ ระบบประกอบด้วยหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้า รวมเท่ากับ 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ สามารถผลิตปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต (UV dose) เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้จำนวนอีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางจุลชีววิทยา ร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90}) และที่อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) เมื่อทดสอบการใช้งานของระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพงแสน จังหวัดสุรินทร์ โดยดำเนินการติดตั้งระบบในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอดึงสูงของระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ระบบจึงมีประสิทธิภาพการใช้งานในพื้นที่ได้จริง ทั้งนี้ปัญหาการปนเปื้อนของเชื้อโรคในท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้าน ทำให้พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่จุดเก็บน้ำปลายทาง ดังนั้นจึงดำเนินการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อให้ น้ำประปาหมู่บ้านมีคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ขยายผลเพื่อแก้ปัญหาการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศได้ สอดรับกับแผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) ที่กำหนดให้ทุกหมู่บ้านมีน้ำสะอาดอุปโภค บริโภค มีคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ, ระบบฆ่าเชื้อโรค, น้ำประปาหมู่บ้าน, รังสีอัลตราไวโอเลต

1. บทนำ (Introduction)

การจัดการการเข้าถึงน้ำประปาดื่มได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ ยังคงเป็นความท้าทายอย่างหนึ่งของรัฐบาลไทย ในการพัฒนาไปสู่สถานะประเทศที่มีรายได้สูงและการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) เป้าหมายที่ 6 การเข้าถึงการใช้น้ำสะอาดและสุขาภิบาลที่ดี ทั้งนี้การผลิตน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในบางพื้นที่ที่อยู่นอกเขตการให้บริการของการประปาส่วนภูมิภาค โดยเฉพาะน้ำประปาหมู่บ้านยังประสบปัญหาคุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้อุปโภคบริโภค มีข้อมูลจากกรมอนามัยในการสุ่มเฝ้าระวังคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 – 2567 จำนวน 10,271 แห่ง พบว่ามีเพียง 420 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 4 เท่านั้น ที่ผ่านการรับรองเป็นน้ำประปาหมู่บ้านสะอาด ที่มีความปลอดภัยสำหรับนำมาบริโภคในครัวเรือน ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำประปาในเขตเมือง [1] และการรายงานจากศูนย์การเรียนรู้ชุมชนชาวไทยภูเขา “แม่ฟ้าหลวง” พบว่าคุณภาพน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย จากการปนเปื้อนโคลิฟอร์มแบคทีเรียสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 75 และปนเปื้อนอีโคไล คิดเป็นร้อยละ 36 [2] ซึ่งการปนเปื้อนของเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องมาจากผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาซึ่งเป็นผู้ปฏิบัติงานที่เป็นตัวแทนของหมู่บ้านในการดูแลระบบผลิตน้ำประปาไม่มีความเข้าใจเพียงพอในการเติมปริมาณของสารละลายคลอรีนที่เหมาะสมและเพียงพอกับคุณภาพน้ำดิบเพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อยู่ในน้ำและให้มีคลอรีนอิสระคงเหลือไว้ในน้ำตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม อีกทั้งไม่มีการบำรุงรักษาระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านอย่างต่อเนื่องและไม่มีการเฝ้าระวังคุณภาพน้ำ โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทดสอบคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐาน

เทคโนโลยีรังสีอัลตราไวโอเลตมีการนำมาใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1910 ที่เมืองมาร์กเซย ประเทศฝรั่งเศส ช่วงเวลานั้นยังมิได้รับความเชื่อถือต่อมาในปี ค.ศ. 1955 เทคโนโลยีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตในน้ำได้ถูกนำไปใช้ในประเทศออสเตรเลียและสวิตเซอร์แลนด์ และในปี ค.ศ. 1985 มีโรงงานประมาณ 1,500 แห่งทั่วยุโรปที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตสำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการค้นพบว่าโปรโตซัว เช่น คริปโตสปอริเดียม และจิอาเดียมีความอ่อนไหวต่อรังสีอัลตราไวโอเลตอย่างมาก ทำให้เทคโนโลยีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตมีการแพร่หลายในอเมริกาเหนือ ในปี ค.ศ. 2001 มีโรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยเทคโนโลยีรังสีอัลตราไวโอเลตมากกว่า 6,000 แห่ง ที่ดำเนินการอยู่ในยุโรป ในปี ค.ศ. 2009 ประเทศจีนนำวิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตมาใช้ในระบบประปาโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำหลินเจียงเซียงไฮ้ ถือเป็นครั้งแรก ๆ ในประเทศจีนที่ใช้รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นกระบวนการหลักในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ และในปี 2017 จีนได้สร้างโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำสาขานาจิน โดยใช้วิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นกระบวนการหลักที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของจีน [3] สำหรับในประเทศไทยมีการนำรังสีอัลตราไวโอเลตมาฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มโดยการติดตั้งร่วมกับเครื่องกรองน้ำขนาดต่าง ๆ เพื่อใช้ในอาคารบ้านเรือนต่าง ๆ แต่ยังไม่มีการนำมาใช้ในระบบการผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่และระบบประปาหมู่บ้าน ซึ่งยังคงใช้สารละลายคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเพียงอย่างเดียว

รังสีอัลตราไวโอเลต สามารถแบ่งประเภทตามช่วงความยาวคลื่นได้ 4 ช่วง ดังนี้

- 1.1 UV-A ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 315 – 400 นาโนเมตร
 - 1.2 UV-B ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 280 – 315 นาโนเมตร
 - 1.3 UV-C ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200 – 280 นาโนเมตร
 - 1.4 Vacuum UV (VUV) ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 100 – 200 นาโนเมตร
- การฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200 – 300 นาโนเมตร ปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นผลคูณของ

ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตและระยะเวลาที่สัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยของปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่พบมีทั่วไป เช่น จูลต่อตารางเมตร (J/m^2) หรือ มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร(mJ/cm^2) หรือ มิลลิวัตต์วินาทีต่อตารางเซนติเมตร (mWs/cm^2) โดยแปลงค่า $10 J/m^2 = 1 mJ/cm^2 = 1 mWs/cm^2 = 10 Ws/m^2$

รังสีอัลตราไวโอเลตทำให้เชื้อโรคไม่สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตจะทำลายสารพันธุกรรมทำให้ไม่สามารถแบ่งตัวได้ และเมื่อเชื้อโรคได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีปริมาณความเข้มสูงจะทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายและเซลล์ตายในที่สุด ข้อมูลปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมสามารถทำลายเชื้อโรคได้ แยกแต่ละประเภทเชื้อดังตารางที่ 1 ทั้งนี้สามารถประเมินประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้ค่าการลดลอการิทึม (Log reduction) หรือค่า D value ดังตารางที่ 2 โดยตัวอย่างการอธิบายค่าการลดลอการิทึม เช่น 1-log หรือ D₉₀ หมายถึง ค่าปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่ทำให้จำนวนเชื้อโรคตั้งต้นลดลง ร้อยละ 90 ดังนั้น 2-log จำนวนเชื้อโรคลดลง ร้อยละ 99 และ 3-log จำนวนเชื้อโรคลดลง ร้อยละ 99.9 เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำลายเชื้อโรคได้ [4]

Micro-organisms	90% (1 log reduction)	99% (2 log reduction)
Bacteria		
<i>Bacillus subtilis</i>	5.8	11
<i>Escherichia coli</i>	3	6.6
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.3	10.5
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3.3	6.6
<i>Salmonella enteritidis</i>	4	7.6
<i>Salmonella paratyphi</i> - Enteric fever	3.2	6.1
<i>Salmonella typhosa</i> - Typhoid fever	2.1	4.1
<i>Salmonella typhimurium</i>	8	15.2
<i>Sarcina lutea</i>	19.7	26.4
<i>Shigella dysenteriae</i> - Dysentery	2.2	4.2
<i>Shigella flexneri</i> - Dysentery	1.7	3.4
<i>Shigella paradynteriae</i>	1.68	3.4
<i>Staphylococcus aureus</i>	2.6	6.6
<i>Vibrio comma</i> - Cholera	3.4	6.5
Virus		
	90% (1 log reduction)	99% (2 log reduction)
<i>Bacteriophage</i> - E. Coli	2.6	6.6
<i>Infectious Hepatitis</i>	5.8	8
<i>Poliovirus</i> - Poliomyelitis	3.15	6.6

ตารางที่ 2 Log reduction แสดงปริมาณความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำลายเชื้อโรค [5]

Log reduction	Reduction factor	% Reduced
1	10	90%
2	100	99%
3	1,000	99.9%
4	10,000	99.99%
5	100,000	99.999%
6	1,000,000	99.9999%

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านในการลดจุลชีพที่เหมาะสมกับระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย โดยติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติไว้บริเวณจุดปล่อยน้ำประปาหมู่บ้านจากหอถังสูง เพื่อให้กระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านในขั้นสุดท้ายมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตก่อนการจ่ายน้ำสู่ท่อส่งน้ำประปา การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในระบบประปาหมู่บ้านของหมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพง จ.พัทลุง เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนา ปรับปรุงและขยายผลสำหรับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านได้ทั่วประเทศ เพิ่มโอกาสและทางเลือกใหม่สำหรับการพัฒนาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านของประเทศด้วยต้นทุนต่ำ

มีความปลอดภัย ทดแทนการใช้สารเคมี ด้วยเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และมนุษย์ เป็นการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่การดูแลประชาชน ทำให้ในอนาคตทุกพื้นที่ในประเทศไทยมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย สร้างคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นสังคมแห่งความสุขและยั่งยืนตลอดไป

2. วัสดุและวิธีวิจัย (Materials and methods)

2.1 กำหนดกลุ่มเป้าหมายในการวิจัย

2.2 การออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนา (Development) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่

2.3 การทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ โดยทำการศึกษาปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมกับปริมาณและอัตราการไหลของคุณภาพน้ำดิบตามสมการ Keitz และสูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต ดังนี้

$$E_{UV} = \frac{P_{UVc}(2\alpha + \sin 2\alpha)}{2LD\pi^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{2D}$$

เมื่อ P_{UVc} คือ กำลังไฟฟ้าของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต
หน่วยเป็น วัตต์ (W)

L คือ ระยะห่างช่วงหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต
หน่วยเป็น เมตร (m)

D คือ ระยะห่างของจุดที่ต้องการให้โดนรังสี
หน่วยเป็น เมตร (m)

E_{UV} คือ ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต หน่วยเป็น
วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

α คือ ครึ่งหนึ่งของมุมที่รับโดยหลอดอัลตราไวโอเลต
หน่วยเป็น เรเดียน

สูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต $D = It$

เมื่อ D คือ ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต (UV dose)
หน่วย $mW\cdot s/cm^2$ หรือ $W\cdot s/m^2$ หรือ mJ/cm^2

I คือ ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเลต (UV intensity)
หน่วย mW/cm^2 หรือ W/m^2

T คือ ระยะเวลาสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต (exposure time) หน่วย วินาที (s)

รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีโดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ตามมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัยและวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางจุลชีววิทยาโดยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย มีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

2.3.1 สำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.2 ทดสอบคุณภาพน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.3 ติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน พร้อมเก็บน้ำประปาต้นทางและปลายทาง

2.3.4 ทดสอบคุณภาพน้ำประปาต้นทางและปลายทาง ภายหลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

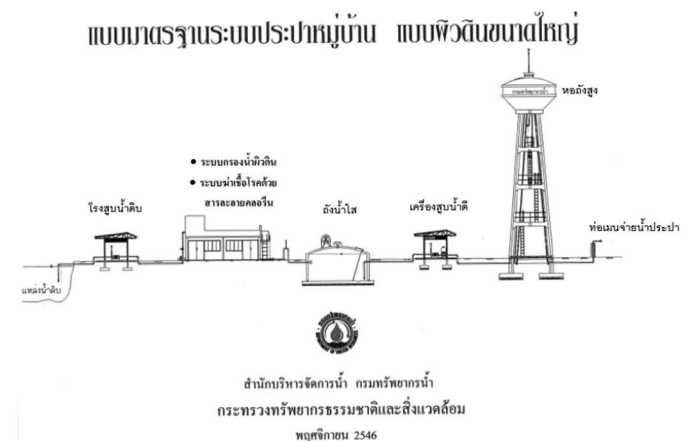
2.4 การติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทาง

2.5 การอภิปรายผลและสรุปผลการดำเนินงาน

3. ผลและวิจารณ์ (Results and discussion)

3.1 กลุ่มเป้าหมายในการศึกษาวิจัยประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต คือ ระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ตั้งอยู่ที่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดสุรินทร์

3.2 ผลการออกแบบ (Design) การสร้างและพัฒนา (Development) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ กรมทรัพยากรน้ำได้ออกแบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ซึ่งมีลักษณะรูปแบบเป็นระบบประปาที่นำน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำ คลอง สระน้ำขนาดใหญ่ โดยใช้เครื่องสูบน้ำแบบหยोज์นำมาผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยการทำให้น้ำดิบตกตะกอน ซึ่งใช้สารละลายสารส้มหรืออาจต้องเติมสารละลายปูนขาวเพิ่ม ขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ เมื่อผ่านกรรมวิธีการรวมตะกอนและการตกตะกอนแล้ว นำน้ำเข้าสู่ระบบกรองต่อไป และนำน้ำที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วเข้าสู่ถังน้ำใส และทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารละลายคลอรีน โดยสูบน้ำไปยังถังน้ำใสหรืออัดเข้าเส้นท่อขึ้นหอถังสูง จากนั้นทำการสูบน้ำจากถังน้ำใสด้วยเครื่องสูบน้ำแบบหยोज์ขึ้นหอถังสูง แล้วจ่ายน้ำสะอาดจากหอถังสูงสู่ท่อจ่ายน้ำประปาเพื่อจ่ายน้ำให้แก่ประชาชนในหมู่บ้านได้นำน้ำใช้ในการอุปโภคและบริโภค โดยการจ่ายน้ำตามท่อผ่านมาตรวัดน้ำ [6]



รูปที่ 1 แบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่ กรมทรัพยากรน้ำ

คณะนักวิจัยมีผลงานวิจัยการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ในการทดลองใช้งานระดับห้องปฏิบัติการ พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ มีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 27.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้อิโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) และเมื่อทดลองใช้กับตัวอย่างน้ำดิบที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ผลการตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างน้ำดิบดังกล่าวไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงขยายผลโดยการออกแบบและพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานเชิงพื้นที่ โดยการศึกษาปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต (E_{UV}) ของหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต

ลำดับ	ขนาดกำลังไฟฟ้า (วัตต์)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ผลิต (ร้อยละ 35 ของกำลังไฟฟ้า) (วัตต์) (P_{UV})	จำนวนที่ใช้จำนวน (หลอด)	ระยะห่างระหว่างหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต (L) (เมตร)	กำหนดระยะระหว่างหลอดผลิตรังสีกับจุดที่ต้องการให้โดนรังสี (D) (เมตร)	ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลต (E_{UV}) มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) (คำนวณค่าเฉพาะ 1 หลอด)
1	100	0.042	35	4	0.59	0.10	9.314
2	75	0.055	26.25	2	0.53	0.10	7.737
3	18	0.055	6.3	6	0.16	0.10	4.643

ที่เหมาะสมกับปริมาณและอัตราการไหลของคุณภาพน้ำดิบ ตามสมการ Keitz และสูตรคำนวณปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ ดำเนินการออกแบบและพัฒนาโดยใช้หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ จำนวนรวม 12 หลอด ขนาดกำลังไฟรวม 658 วัตต์ เมื่อคำนวณตามสมการ Keitz พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100 , 75 และ 18 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ดังรายละเอียดตามตารางที่ 3 หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่ออ้างอิงจากตารางที่ 1 พบว่า หลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 และ 75 วัตต์ มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต สูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตที่สามารถทำให้อิโคไลลดลงที่ 6.6 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) ส่วนหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟ 18 วัตต์ มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสูงกว่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต

ที่สามารถทำให้อิโคไลลดลงที่ 3 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร หรือร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90})

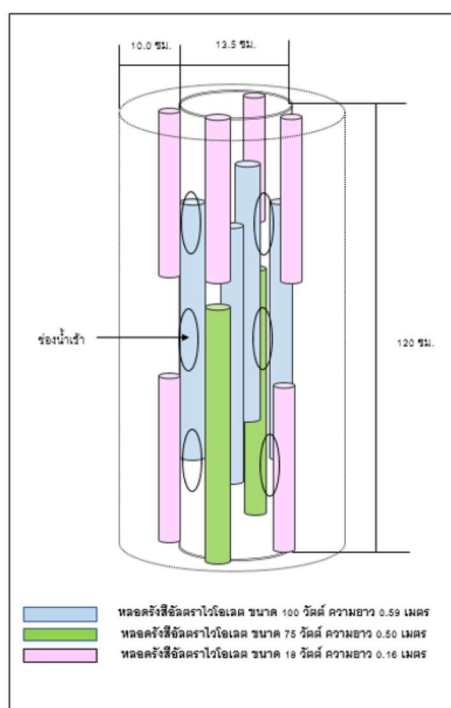
ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่ ประกอบด้วย

3.2.1 หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต จำนวน 12 หลอด ขนาดกำลังไฟรวม 658 วัตต์

3.2.2 ท่อติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 เซนติเมตร มีความสูง 120 เซนติเมตร มีช่องให้น้ำไหลผ่าน จำนวน 12 ช่อง ภายในติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ จำนวน 4 หลอด เว้นระยะห่างเท่ากัน

3.2.3 ขาตั้งยึดท่อติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว และข้อต่อสำหรับประกอบเป็นขาตั้งยึดท่ออะคริลิกให้มั่นคง เพื่อเป็นที่ยึดติดตั้งหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้า 75 วัตต์ จำนวน 2 หลอด และขนาดกำลังไฟฟ้า 18 วัตต์ จำนวน 6 หลอด เว้นระยะห่างเท่ากันโดยจุดยึดติดอยู่ใกล้ช่องให้น้ำไหลผ่านท่ออะคริลิกใส

3.2.4 ระบบตั้งเวลา (Timer) เปิดปิดการทำงานอัตโนมัติ



รูปที่ 2 แบบท่อรวมหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3 ตำแหน่งติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

การคำนวณพื้นที่หรือปริมาตรน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตครอบคลุมเบื้องต้น พบว่า บริเวณภายในท่ออะคริลิกที่ติดตั้งหลอดรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาด 100 วัตต์ ครอบคลุมปริมาตรน้ำเท่ากับ 0.0084 ลูกบาศก์เมตร หรือ 8.4 ลิตร ส่วนบริเวณภายนอกด้านบนและด้านล่าง มีปริมาตรน้ำเท่ากัน คือ 0.0118 ลูกบาศก์เมตร หรือ 11.8 ลิตร รวมปริมาตรน้ำทั้งหมด เท่ากับ 32 ลิตร ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่า ในเวลา 1 วินาที มีน้ำปริมาตร 32 ลิตร ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีค่าปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99})

3.3 ผลการทดลองใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติสำหรับการใช้งานในพื้นที่

3.3.1 ผลสำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบฟิวตินขนาดใหญ่ พร้อมเก็บตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คัดเลือกระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอดำรงวิทยารัษฎนคร จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งได้รับงบประมาณในการก่อสร้าง ปี พ.ศ. 2565 ซึ่งน้ำดิบเป็นแหล่งน้ำผิวดินขนาดใหญ่ในพื้นที่ น้ำประปาต้นทางเป็นน้ำประปาที่ได้จากจุดปล่อยน้ำจากหอถังสูง ณ บริเวณระบบประปาหมู่บ้าน และน้ำประปาปลายทางเป็นน้ำประปา ณ โรงเรียนบ้านโพธิ์ขาว ตำบลโพนครก

อำเภอดำรงวิทยารัษฎนคร จังหวัดสุรินทร์ ปัจจุบันน้ำประปาหมู่บ้านที่ผลิตได้ไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาที่ได้ของกรมอนามัย จากการสังเกตเบื้องต้นพบว่า น้ำประปาหมู่บ้านมีความขุ่นไม่เหมาะสมนำมาบริโภค แหล่งน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาหมู่บ้านมีความขุ่นสูง ผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาไม่เข้าใจในกระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านและไม่ปฏิบัติตามคู่มือการผลิตน้ำประปา โดยเฉพาะในขั้นตอนการเติมสารส้มเพื่อตกตะกอน ใช้วิธีวางก้อนสารส้มให้น้ำดิบไหลผ่านเท่านั้น ทำให้การตกตะกอนไม่สมบูรณ์ มีตะกอนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากปนอยู่ในน้ำ น้ำจึงมีความขุ่นสูง เมื่อปล่อยน้ำเข้าขั้นตอนกรองทรายและส่งผลต่อเข้าสู่ถังน้ำใส น้ำที่ผ่านกรองทรายยังมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ จากนั้นตามระบบการทำงานปั๊มน้ำจะสูบน้ำจากถังน้ำใสเข้าสู่หอถังสูง โดยเติมสารละลายคลอรีนผ่านปั๊มเติมสารเคมีเพื่อผสมกับน้ำที่สูบขึ้นหอถังสูง แต่จากการตรวจสอบพบว่า ผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาดำเนินการเพียงเติมน้ำเข้าไปในถังที่เตรียมสำหรับบรรจุสารละลายคลอรีนเท่านั้น ไม่มีการเตรียมสารละลายคลอรีนขึ้นมาใหม่ เนื่องจากไม่มีการจัดซื้อเก็บไว้ มีเพียงสารส้มเท่านั้นที่ซื้อมาเก็บไว้ใช้งาน จึงทำให้น้ำประปาหมู่บ้านที่ผลิตได้ไม่เหมาะสมแก่การนำมาใช้บริโภค ชุมชนใช้น้ำประปาสำหรับการอุปโภค ส่วนการบริโภคใช้วิธีซื้อน้ำดื่มบรรจุขวด ทำให้มีค่าใช้จ่ายในครัวเรือนเพิ่มขึ้น และยังไม่มีความสนใจในการแก้ปัญหาประปา

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลตในระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

ลำดับ	บริเวณ	ขนาดกำลังไฟฟ้า (วัตต์)	จำนวนหลอดที่ใช้	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	ระยะห่างช่วงหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต (เมตร)	กำหนดระยะระหว่างหลอดผลิตรังสีกับจุดที่ต้องการให้โดนรังสี (เมตร)	ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตรวม (E_{UVF}) (มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)	ปริมาณน้ำที่ได้รับรังสีอัลตราไวโอเลต (ลูกบาศก์เมตร)
1	ภายในท่ออะคริลิก	100	4	0.135	0.59	0.10	37.256	0.0084
2	ภายนอกด้านบน	18	4	0.235	0.16	0.10	18.572	0.0118
3	ภายนอกด้านล่าง	75	2	0.235	0.16	0.10	15.474	0.0118
		18	2				9.286	

หมู่บ้านให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ปัญหาคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านดังกล่าว คณะนักวิจัยจึงวางแผนการดำเนินงานเพื่อแก้ปัญหาในกระบวนการตกตะกอนของน้ำดิบด้วยการออกแบบและพัฒนากระบวนการเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่มีความแม่นยำใช้งานสะดวกและง่ายขึ้นกว่าเดิม ทำให้กระบวนการตกตะกอนสมบูรณ์ขึ้น สภาพของน้ำดิบมีความขุ่นลดลง จากนั้นจึงทำการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ เพื่อทดแทนการใช้สารละลายคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน เพิ่มความสะดวกใช้งานง่ายให้กับผู้ควบคุมการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน ทำให้สามารถ ผลิตน้ำประปาหมู่บ้านสำหรับชุมชนให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ชุมชนสามารถใช้น้ำอุปโภคบริโภคได้ปลอดภัย ช่วยลดรายจ่ายจากค่าน้ำดื่มบรรจุขวด พร้อมมีสุขภาวะอนามัยที่ดีขึ้น ชุมชนมีความอยู่และมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

3.3.2 ผลทดสอบคุณภาพน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง

ผลการทดสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมีทั่วไป โลหะหนักทั่วไป และแบคทีเรีย ของตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง ในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพง จังหวัดสุรินทร์ โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ เมื่อเทียบกับเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย (ตารางที่ 5) พบว่า

3.3.2.1 ตัวอย่างน้ำดิบ มีคุณภาพน้ำที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในรายการความขุ่น สีปรากฏ ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และเหล็ก ซึ่งเป็นผลคุณภาพ

น้ำดิบตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคได้โดยใช้กระบวนการผลิตตามคู่มือของระบบประปาหมู่บ้านของกรมทรัพยากรน้ำ

3.3.2.2 ตัวอย่างน้ำประปาต้นทางและปลายทาง มีคุณภาพน้ำที่ไม่ผ่านค่ามาตรฐานในรายการความขุ่น ความเป็นกรดและด่าง เหล็ก โคลิฟอร์มแบคทีเรีย และอีโคไล ซึ่งในรายการความขุ่นและเหล็ก พบว่า มีค่าเกินค่ามาตรฐานแต่มีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างน้ำดิบ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำประปาทั้ง 2 จุด เมื่อได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพจากกระบวนการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านแล้ว ทำให้ค่าความขุ่นและเหล็กลดลง แต่ยังไม่มีเพียงพอที่จะทำให้คุณภาพน้ำได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน จึงควรต้องปรับปรุงหรือตรวจสอบกรรมวิธีการผลิตน้ำประปาหมู่บ้านอย่างละเอียดเพื่อแก้ไขคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานในส่วนของการรายการความเป็นกรดและด่างที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำดิบซึ่งมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน อาจมาจากสาเหตุการปนเปื้อนของสารเคลือบท่อประปาซึ่งต้องสำรวจท่อประปาและเปลี่ยนใหม่ นอกจากนี้การพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียและอีโคไลในตัวอย่างน้ำประปาที่จุดต้นทางและจุดปลายทาง จึงควรต้องปรับปรุงระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเพื่อให้ น้ำประปาหมู่บ้านมีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย (ตารางที่ 6) พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในตัวอย่างน้ำดิบ น้ำประปาหมู่บ้านจุดต้นทางและปลายทาง จึงไม่เหมาะสมสำหรับการบริโภคควรมีกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในระบบการผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน



รูปที่ 4 การสำรวจระบบประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ ในพื้นที่หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพง จังหวัดสุรินทร์

ตารางที่ 5 ผลทดสอบคุณภาพด้านกายภาพและเคมีของน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

ลำดับ	รายการทดสอบคุณภาพน้ำ	หน่วยวัด	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบน้ำดิบ/น้ำประปา		
				น้ำดิบ	น้ำประปาต้นทาง	น้ำประปาปลายทาง
1	ความขุ่น (Turbidity)	เอ็นทียู	ไม่เกิน 5	238.0	16.8	5.32
2	สีปรากฏ (Apparent color)	แพลตตินัมโคบอลท์	ไม่เกิน 15	33	17	6
3	ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5	7.6	6.6	5.1
4	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 500	608	257	252
5	ความกระด้าง (Hardness)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as CaCO ₃)	ไม่เกิน 300	37.8	37.0	35.7
6	ซัลเฟต (Sulfate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	10.5	43	44
7	คลอไรด์ (Chloride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	88.7	97	97
8	ไนเตรท (Nitrate)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO ₃)	ไม่เกิน 50	0.85	2.7	8.9
9	ไนไตรท์ (Nitrite)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO ₂)	ไม่เกิน 3	-	ไม่พบ	0.03
10	ฟลูออไรด์ (Fluoride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.7	0.46	0.20	0.19
11	เหล็ก (Iron)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	5.9	0.533	0.171
12	แมงกานีส (Manganese)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	0.01	น้อยกว่า 0.010	น้อยกว่า 0.010
13	ทองแดง (Copper)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1	0.01	น้อยกว่า 0.010	ไม่พบ
14	สังกะสี (Zinc)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 3	ไม่พบ	0.021	น้อยกว่า 0.010
15	ตะกั่ว (Lead)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	0.007	ไม่พบ	ไม่พบ
16	โครเมียมรวม (Total chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.05	0.01	ไม่พบ	ไม่พบ
17	แคดเมียม (Cadmium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.003	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
18	สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
19	ปรอท (Mercury)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.001	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
20	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliforms bacteria)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	-	มากกว่า 23	มากกว่า 23
21	อีโคไล (<i>Escherichia coli</i>)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	-	1.1	1.1

หมายเหตุ : “-” หมายถึง ไม่ได้ส่งตรวจวิเคราะห์

ตารางที่ 6 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำดิบ น้ำประปาต้นทางและปลายทาง ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

กิจกรรม	ตัวอย่างน้ำ	ผลทดสอบ	
ก่อนการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรค ในน้ำประปาหมู่บ้าน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	น้ำดิบ	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	น้ำประปาต้นทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	น้ำประปาปลายทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

3.3.3 ผลการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน พร้อมเก็บน้ำประปาต้นทางและปลายทาง

3.3.3.1 ตัวอย่าง อุปกรณ์ และสารเคมี

- 1) ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ น้ำดิบ น้ำประปาต้นทาง และน้ำประปาปลายทาง
- 2) ระบบเติมสารละลายสารส้มแบบอัตโนมัติ

3) ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

4) ชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

5) สารส้มก้อน

6) ถังพลาสติกขนาดบรรจุ 100 ลิตร

3.3.3.2 ขั้นตอนการทดลอง

1) ทำความสะอาดระบบประปาหมู่บ้าน โดยล้างระบบตกตะกอน ระบบกรองทราย ถังเก็บน้ำใส และท่อถังสูง

2) ติดตั้งชุดอุปกรณ์เติมสารส้มแบบอัตโนมัติ

3) เตรียมสารละลายสารส้ม เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวนปริมาตร 100 ลิตร พร้อมกำหนดอัตราการไหลสารละลายสารส้ม ที่ปริมาตร 0.5 ลิตรต่อวินาที สำหรับตกตะกอนน้ำดิบที่มีความขุ่นมากกว่า 200 เอ็นทียู

4) ติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติบนท่อถังสูง โดยวางในตำแหน่งครอบท่อจ่ายน้ำประปาหมู่บ้าน ขนาด 4 นิ้ว

5) เชื่อมต่อสายไฟฟ้าเข้ากับระบบตั้งเวลา (Timer) เปิดปิดการทำงานอัตโนมัติ ทำการตั้งเวลาเปิดการทำงานที่ 05.00 น. และปิดการทำงานที่ 21.00 น. (ครอบคลุมช่วงเวลากาใช้ของชุมชน)

6) เก็บตัวอย่างน้ำประปาต้นทางและน้ำประปาปลายทางสำหรับการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 และการทดสอบคุณภาพน้ำตามเกณฑ์น้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย

ทีมนักวิจัยดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการตกตะกอน โดยการติดตั้งระบบเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่โรงสูบน้ำดิบ เพื่อให้มีการเติมสารละลายสารส้มในความเข้มข้นและอัตราการไหลที่เหมาะสม ทำให้น้ำดิบมีการตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอน น้ำใสที่ผ่านการตกตะกอนจะไหลออกจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังกรองเพื่อกรองตะกอนขนาดเล็กที่หลุดมาจากถังตกตะกอน น้ำที่ผ่านการกรองไหลเข้ามาเก็บในถังน้ำใสและส่งน้ำขึ้นท่อถังสูง ซึ่งมีการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตไว้ในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนท่อถังสูง เพื่อจัดส่งน้ำไปยังผู้ใช้น้ำประปาหมู่บ้านตามระบบจ่ายน้ำต่อไป

3.3.4 ผลทดสอบคุณภาพน้ำประปาต้นทางและปลายทาง ภายหลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย (ตารางที่ 7) พบว่า น้ำประปาจุดต้นทาง ผลไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่น้ำประปาจุดปลายทาง ผลพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปนเปื้อนของเชื้อโรคในระบบท่อน้ำประปา จึงทำให้จุดเก็บน้ำประปาปลายทางมีการตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

3.4 ผลการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทาง

จากผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำ ณ จุดเก็บน้ำประปาปลายทางที่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ จุดปลายทางของระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่โรงเรียนบ้านโนนขาว หมู่ 2 ตำบลโนนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ เพื่อให้เด็กนักเรียน ครู และประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงได้มีน้ำดื่มที่มีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำบริโภคด้วยความเชื่อมั่น ลดค่าครองชีพในการซื้อน้ำดื่มและมีสุขภาพที่ดี โดยมีผลการทดสอบคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9



รูปที่ 5 การติดตั้งระบบเติมสารส้มแบบอัตโนมัติที่โรงสูบน้ำดิบ



รูปที่ 6 การติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติเข้ากับระบบประปาหมู่บ้าน

3.5 การอภิปรายผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ โดยมีกลุ่มเป้าหมายในการวิจัย คือ ระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโนนครก อำเภอท่าตูม จังหวัดสุรินทร์ ซึ่งผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

3.5.1 การออกแบบและพัฒนา โดยใช้ชุดอุปกรณ์รวมหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ จำนวน 4, 2 และ 6 หลอด ตามลำดับ รวมมีขนาดกำลังไฟฟ้า 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด เมื่อคำนวณตามสูตร Keitz พบว่า ความเข้มรังสีอัลตราไวโอเลตที่หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ มีค่าเท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ หากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อโรค 1 วินาที จะมีปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์. วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99})

3.5.2 การใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ เนื่องจากระบบประปาหมู่บ้านกลุ่มเป้าหมายยังมีปัญหาคุณภาพน้ำทั้งด้านกายภาพ เคมีทั่วไป และแบคทีเรีย จึงทำให้นักวิจัยจำเป็นต้องดำเนินงานแก้ปัญหาในกระบวนการตกตะกอนของน้ำดิบ ด้วยการออกแบบและพัฒนาระบบเติมสารส้มที่มีความแม่นยำใช้งานสะดวก และง่ายขึ้นกว่าเดิม ทำให้กระบวนการตกตะกอนสมบูรณ์ขึ้น สภาพของน้ำดิบมีความขุ่นลดลง จากนั้นจึงทำการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนท่อถังสูงของระบบประปาหมู่บ้าน เพื่อทดแทนการใช้สารละลายคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้าน ผลการตรวจสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย พบว่า น้ำประปาจุดต้นทางไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แต่น้ำประปาจุดปลายทางพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย แสดงว่าระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ แต่ภายในท่อส่งน้ำประปาอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อโรคอยู่ ดังนั้นจึงควรเพิ่มขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคในระบบท่อน้ำประปาด้วยสารละลายคลอรีนก่อนการใช้งานระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและควรมีการบำรุงรักษาให้ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านทั้งระบบอย่างสม่ำเสมอ

3.5.3 การติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งมีระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ณ จุดปลายทางของระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่โรงเรียนบ้านโนนขาว ทำให้มีการฆ่าเชื้อโรคที่ปะปนในระบบท่อส่งน้ำประปา ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำประปาหมู่บ้านจึงเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย สามารถแก้ปัญหาการพบเชื้อโรคในน้ำประปาที่จุดปลายทาง ดังนั้นในกรณีที่ระบบท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้านไม่มีความสะอาดปลอดภัยเพียงพอ จึงควรติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตไว้บริเวณจุดจ่ายน้ำสำหรับบริโภค เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพน้ำดื่มตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ทำให้

เด็กนักเรียน ครู และประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงได้บริโภคน้ำสะอาด รวมทั้งช่วยลดค่าครองชีพในการซื้อน้ำดื่มและเพิ่มสุขภาวะที่ดีให้กับประชาชนในพื้นที่

3.5.4 ระบบประปาหมู่บ้านไม่มีผู้ที่มีความรู้ความเข้าใจและมีประสบการณ์เชี่ยวชาญเป็นผู้ดูแลระบบ ทำให้ไม่สามารถรักษาคุณภาพน้ำให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานได้อย่างต่อเนื่อง จึงเป็นข้อจำกัดในการวิจัย อีกทั้งระบบเดิมสารส้มที่ผู้วิจัยพัฒนาติดตั้งเป็นเพียงระบบต้นแบบ จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาให้สามารถทำงานได้คงที่และต่อเนื่อง มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการใช้งานในการควบคุมคุณภาพน้ำของผู้ดูแลระบบประปาหมู่บ้าน

ตารางที่ 7 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำประปาต้นทางและปลายทางด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย หลังติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยแสงอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ

กิจกรรม	น้ำประปา	ผลทดสอบ	
หลังการติดตั้งระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ	ต้นทาง	(-) สีแดงจางเล็กน้อย	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย
	ปลายทาง	(+) สีเหลืองมีความขุ่น	พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

ตารางที่ 8 ผลทดสอบคุณภาพด้านกายภาพและเคมีของน้ำประปาหมู่บ้านจุดปลายทาง ณ โรงเรียนบ้านโนนขาว โดยห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

ลำดับ	รายการทดสอบคุณภาพน้ำ	หน่วยวัด	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบ
1	ความขุ่น (Turbidity)	เอ็นทียู	ไม่เกิน 5	2.0
2	สีปรากฏ (Apparent color)	แพลตตินัมโคบอลท์	ไม่เกิน 15	น้อยกว่า 5
3	ความเป็นกรดและด่าง (pH)	-	6.5 – 8.5	7.0
4	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 500	264
5	ความกระด้าง (Hardness)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as CaCO ₃)	ไม่เกิน 300	ไม่พบ
6	ซัลเฟต (Sulfate)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	67.4
7	คลอไรด์ (Chloride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 250	85.2
8	ไนเตรท (Nitrate)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO ₃)	ไม่เกิน 50	ไม่พบ
9	ไนไตรท์ (Nitrite)	มิลลิกรัมต่อลิตร (as NO ₂)	ไม่เกิน 3	ไม่พบ
10	ฟลูออไรด์ (Fluoride)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.7	0.57
11	เหล็ก (Iron)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	ไม่พบ
12	แมงกานีส (Manganese)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.3	ไม่พบ
13	ทองแดง (Copper)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 1	0.01
14	สังกะสี (Zinc)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 3	ไม่พบ
15	ตะกั่ว (Lead)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ
16	โครเมียมรวม (Total chromium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.05	0.002
17	แคดเมียม (Cadmium)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.003	ไม่พบ
18	สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.01	ไม่พบ
19	ปรอท (Mercury)	มิลลิกรัมต่อลิตร	ไม่เกิน 0.001	ไม่พบ
20	โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliforms bacteria)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	ไม่พบ
21	อีโคไล (<i>Escherichia coli</i>)	เอ็มพีเอ็นต่อ 100 มิลลิลิตร	น้อยกว่า 1.1	ไม่พบ

ตารางที่ 9 ผลทดสอบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำประปาหมู่บ้านจุดปลายทาง ณ โรงเรียนบ้านโพนขาว ด้วยชุดตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อ.11 ของกรมอนามัย

ตัวอย่างน้ำ	ผลทดสอบ	ข้อแนะนำ
โรงเรียนบ้านโพนขาว	(-) สีแดงจางเล็กน้อย	ไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย



รูปที่ 7 ติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีกรมวิทยาศาสตร์บริการ ณ โรงเรียนบ้านโพนขาว หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพง จังหวัดสุรินทร์

4. สรุป (Conclusions)

ระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติ ได้รับการออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบประปาหมู่บ้านในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศ โดยระบบประกอบด้วยผลิตหลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดไอปรอทแรงดันต่ำ ขนาดกำลังไฟฟ้า รวมเท่ากับ 658 วัตต์ จำนวน 12 หลอด พบว่า หลอดผลิตรังสีอัลตราไวโอเลต ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 100, 75 และ 18 วัตต์ สามารถผลิตปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต เท่ากับ 9.314, 7.737 และ 4.643 มิลลิวัตต์.วินาทีต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทำให้จำนวนอีโคไลและเชื้อโรคส่วนใหญ่ลดลงในภาพรวม ร้อยละ 90 (1-log หรือ D_{90}) และที่อัตราการไหล 32 ลิตรต่อวินาที น้ำจะได้รับปริมาณรังสีอัลตราไวโอเลต ที่สามารถฆ่าอีโคไลและเชื้อโรคอื่น ๆ ได้ถึงร้อยละ 99 (2-log หรือ D_{99}) เมื่อทดสอบการใช้งานของระบบฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาหมู่บ้านด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแบบอัตโนมัติในพื้นที่ประปาหมู่บ้านแบบผิวดินขนาดใหญ่ หมู่ 2 ตำบลโพนครก อำเภอกำแพง จังหวัดสุรินทร์ โดยดำเนินการติดตั้งระบบในตำแหน่งที่ติดกับท่อเมนจ่ายน้ำประปาบนหอดึงสูงของระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ทำให้คุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาดื่มได้ของกรมอนามัย ระบบจึงมีประสิทธิภาพการใช้งานในพื้นที่ได้จริง แต่เนื่องจากระบบท่อส่งน้ำประปาหมู่บ้านยังมีการปนเปื้อนของเชื้อโรค จึงทำให้พบโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่จุดเก็บน้ำปลายทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องกรองน้ำดื่มเทคโนโลยีของกรมวิทยาศาสตร์บริการ เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพและความปลอดภัยของน้ำดื่มให้กับเด็กนักเรียน ครูและประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียง เป็นการนำวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมสู่การดูแลประชาชน ทำให้ทุกพื้นที่ในประเทศไทยมีน้ำสะอาดเพื่อการอุปโภคบริโภคและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มของกรมอนามัย สร้างคุณภาพชีวิตที่ดี เป็นสังคมแห่งความสุขและยั่งยืนตลอดไป และควรมีการวิจัยพัฒนาระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตสำหรับประปาหมู่บ้านให้มีประสิทธิภาพถึงระดับ 4-Log หรือ $D_{99.99}$ เพื่อทดแทนการใช้คลอรีนอย่างถาวรในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้นิพนธ์บทความวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรสถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความร่วมมือสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] กรุงเทพมหานคร. น้ำประปาหมู่บ้าน แค่ 4% ผ่านรับรองความปลอดภัย [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.bangkokbiznews.com/health/public-health/1162649>
- [2] ศูนย์การศึกษาเพื่อชุมชนในเขตภูเขา. รายการข้อมูลที่น่าสนใจ (วิเคราะห์สถานการณ์) ตัวชี้วัดที่ 3.32 : รอบ 5 เดือนแรก ประจำปีงบประมาณ 2568 ศูนย์การเรียนรู้ชุมชนชาวไทยภูเขา “แม่ฟ้าหลวง” เข้าถึงน้ำบริโภคสะอาดตามมาตรฐานกรมอนามัย [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://hhdc.anamai.moph.go.th/web-upload/40x2bbc9a2164f1c536be9c0394dc58f0e6/filecenter/pa/pa2568/3.32/01_First_Round/3.32-01.pdf
- [3] Sun W, Ao X, Lu D, Zhang Y, Xue Y, He S, et al. Ultraviolet technology application in urban water supply and wastewater treatment in China: Issues, challenges and future directions. Water Research X. 2024;23:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100225>
- [4] Paidalwar AA, Khedikar IP. Overview of water disinfection by UV technology – A review. International Journal of Science Technology & Engineering. 2016;2(9):213-219. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30976.25608>
- [5] Caroline K. Misleading math: Kill claims and log reduction [Internet]. 2019 [cited 2024 Dec 12]. Available from: <https://infectioncontrol.tips/2019/06/17/kill-claims-and-log-reduction/>
- [6] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรมทรัพยากรน้ำ, สำนักบริหารจัดการน้ำ. แบบมาตรฐานระบบประปาหมู่บ้าน แบบผิวดินขนาดใหญ่. กรุงเทพฯ: สำนักบริหารจัดการน้ำ; 2546.