การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูกด้วยการปล่อยน้ำร้อนจากท่อแนวตั้ง

Inhibition of the Growth of *Ralstonia Solanacearum* in Field Soil by Releasing Hot Water from Vertical Pipe

ณัฐพงษ์ แกมทับทิม[1 *] และ ศิริชัย เทพา[2]

[1] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาพิษณุโลก 52 หมู่ 7 ตำบลบ้านกร่าง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

[2] ห้องปฏิบัติการพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการเกษตร สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Natthaphong Kaemthapthim[1 *] and Sirichai Thepa[2]

[1] Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok 52 Moo 7, Ban Krang, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

[2] Solar Energy in Agriculture Laboratory, Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi 126 Pracha-Uthit Road, Bang Mod, Thung khru, Bangkok, Thailand, 10140

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: natthaphong@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 081-965-9058

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูก ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคเหี่ยวเขียวของพืช โดยใช้เชื้อดังกล่าวจำนวน 4.7×10^7 colony forming unit/g soil ผลการทดลองพบว่าการปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อแนวตั้ง 3 รู สามารถกระจายความร้อนไปยังชั้นดินที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ความลึกดิน 40 cm เมื่อเวลาปล่อยน้ำร้อนผ่านไป 240 min ผลการนับ *Ralstonia solanacearum* ที่เหลือหลังการทดลอง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตได้ทั้งหมด

คำสำคัญ ท่อน้ำร้อน น้ำร้อน พื้นผิวดิน โรคเหี่ยวเขียว ใต้ดิน

Abstract

The purpose of this research to inhibit the growth of *Ralstonia solanacearum* bacteria, which is the cause of Wilt in plant using the bacteria at 4.7×10^7 colony forming unit/g soil. The results showed that releasing hot water from 3-holes vertical pipe method could increase efficacy of heat releasing to the soil at the distance of 5 and 10 cm with 40 cm depth of soil. After 240 minutes of hot water releasing, *Ralstonia solanacearum* was completely inhibited.

Keywords: Hot water, Hot water pipe, Soil surface, Underground, Wilt.

1. บทนำ

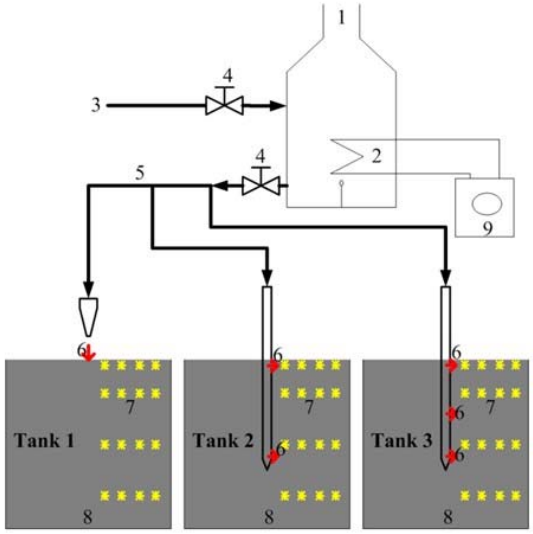
พืชไร่เศรษฐกิจหลายชนิดประสบปัญหาการเกิดโรคเหี่ยวเขียวที่มีสาเหตุจากเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ซึ่งเป็นโรคที่ทำความเสียหายตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต เชื้อสามารถเข้าทำลายพืชทุกระยะการเจริญเติบโต ทำให้เกษตรกรประสบปัญหาการเพาะปลูกพืชไร่ และเพื่อลดความเสียหายของเชื้อชนิดนี้ที่มีต่อพืชที่ผ่านมาได้มีการใช้พันธุ์ต้านทาน การปลูกพืชหมุนเวียน การใช้สารเคมี และการใช้ส่วนที่ไม่มีโรคมาเพาะปลูก แต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร *Ralstonia solanacearum* เป็นเชื้อที่เจริญเติบโตและเข้าทำลายพืชได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 - 35 °C ซึ่งอิทธิพลส่วนใหญ่เกิดจากอุณหภูมิดิน ดังนั้นในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ด้วยวิธีเพิ่มความร้อนดินจึงเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับนำไปใช้ควบคุมปริมาณเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่มีอยู่มากบริเวณรอบรากพืชที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

โดยสิ่งสำคัญสำหรับการเพิ่มความร้อนดินประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น และระดับความลึกของดิน ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิดินโดยตรง [1,2] การ solarization ดินเป็นวิธีการที่ดีในการควบคุมเชื้อโรคและแมลงศัตรูพืชในดินที่มีการปลูกพืชในโรงเรือน อีกทั้งใช้เทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของดิน การ solarization ดินอุณหภูมิจะแปลผกผันกับความลึก โดยการ solarization ดินติดต่อกันสองหรือสามรอบต่อปีจะมีผลกระทบทางชีวภาพเพียงเล็กน้อยในดิน [3] จากการทดลอง solarization ดินเพื่อควบคุมเชื้อโรคในประเทศกรีซ โดยดินถูกคลุมด้วยพลาสติกโปร่งใส 4 - 6 สัปดาห์ ในช่วงฤดูร้อนเพื่อควบคุมเชื้อ *Pyrenochaeta lycopersici, Verticillium dahlia* และ *Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici* ที่เกิดกับมะเขือเทศ ทำให้เชื้อโรคในดินลดลงรวมทั้งยังสามารถเพิ่มผลผลิตได้อีกด้วย [4] ในการศึกษาการเพิ่มความร้อนต้องเลือกดินที่เหมาะสมซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์แก้ปัญหาการนำความร้อนเพราะดินแต่ละชนิดจะมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน [5] ดังนั้นเพื่อลดระยะเวลาในการ solarization ดิน จึงมีการใช้ท่อช่วยเพิ่มความร้อนดิน แต่ต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการส่งถ่ายความร้อนในดิน โดย อุณหภูมิของดินที่ใช้ทดลองจะมีค่าสูงในชั่วโมงแรก จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นข้อจำกัดของดินสำหรับการนำความร้อนจากท่อสู่ดิน [6] โดยมีองค์ประกอบที่ต้องศึกษาคืออัตราการไหลของน้ำในท่อ อัตราส่วนความพรุนและความจุความร้อนของดิน โดยการนำความร้อนของดินรอบท่อความร้อนมีการกระจายอุณหภูมิที่แตกต่างกัน รวมถึงระยะห่างการวางท่อที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความร้อนดินที่มีจำนวนหลายท่อซึ่งมีความสำคัญในการเพิ่มความร้อนดิน [7] จากข้อมูลเบื้องต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ควบคุมเชื้อโรคในดินได้ โดยเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ไม่สามารถรอดชีวิตอยู่ได้ที่อุณหภูมิ 37 – 40 °C พิจารณาการกระจายอุณหภูมิของดินในแต่ละชั่วโมงจะมีความสม่ำเสมอ ที่ระดับความลึก 2 cm มีค่ามากกว่า 40 °C [8] และมีการใช้ความร้อนเพื่อควบคุมเชื้อโรคในดินด้วยวิธีการเพิ่มความร้อนดินโดยใช้พาราโบราแบบไม่สมมาตรร่วมกับการหยดน้ำร้อนบนผิวดิน โดยที่ระดับความลึกไม่เกิน 50 cm จะมีค่าอุณหภูมิดิน 41.3 °C ซึ่งสามารถใช้ควบคุมเชื้อโรคในดินได้แต่ยังไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ทั้งหมด [9] นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มความร้อนดินที่ให้ผลรวดเร็วจากการใช้ไอน้ำร้อน แต่ความชื้นเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพการเพิ่มความร้อนของดินด้วยไอน้ำร้อน และมีความยุ่งยากรวมถึงมีค่าใช้จ่ายสูง [10,11] ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ความลึกดินเพิ่มขึ้น การใช้น้ำร้อนช่วยเพิ่มอุณหภูมิดินเป็นวิธีที่ดี โดยการเพิ่มอุณหภูมิดินที่เหมาะสมสำหรับใช้ยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในกรณีการปล่อยน้ำร้อนลงดิน จำเป็นต้องพิจารณาอัตราการไหลของน้ำร้อนใต้ดิน โดยเม็ดดินขนาดใหญ่จะมีผลต่ออัตราการแทรกซึมของน้ำเร็วขึ้น และมีรูปแบบการแทรกซึมที่ลึกและกว้างขึ้น [12] ซึ่งผลดังกล่าวเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการควบคุมโรคพืช และเป็นวิธีที่ง่ายต่อการทำงาน

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้เลือกใช้เชื้อ *Ralstonia solanacearum* 4.7×10^7 colony forming unit/g soil เนื่องจากเชื้อจะถูกเจือจางและนำตัวอย่างผสมกับดินทดลองในแต่ละถุง โดยประเมินการเปลี่ยนแปลงของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินตัวอย่างที่ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm ระยะห่างจากท่อ 5, 10, 15 และ 20 cm ที่ 30, 60 และ 240 min เพื่อทำการศึกษาหาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อด้วยวิธีการปล่อยน้ำร้อนเพื่อเพิ่มความร้อนในดิน

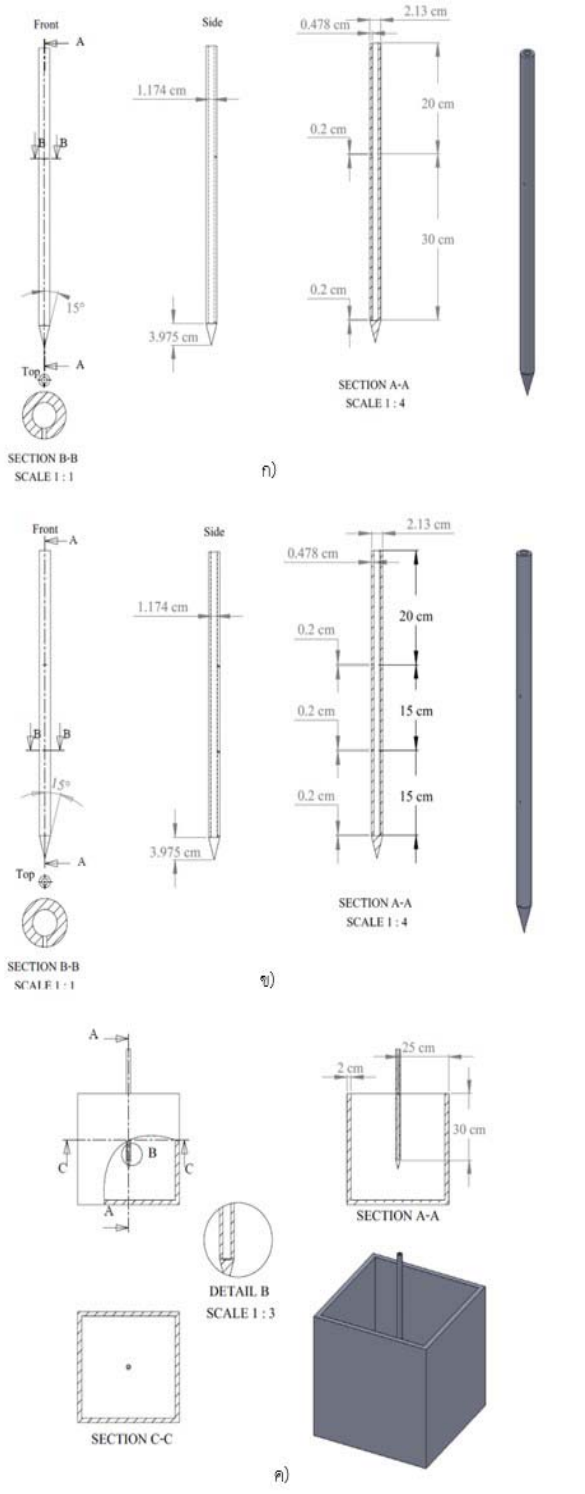
2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีการเพิ่มอุณหภูมิดินที่สูงพอสำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Ralstonia solanacearum* โดยวิธีการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินและวิธีการปล่อยน้ำร้อนใต้ผิวดินจากท่อแนวตั้งแบบ 2 และ 3 รู เพื่อศึกษาการกระจายความร้อนของดินจากการไหลแทรกซึมของน้ำร้อนไปยังดินและนำมาใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Ralstonia solanacearum*



1. Hot water tank
2. Heater
3. Water inlet
4. Control valve
5. Hot water pipe
6. Hot water outlet
7. Measurement points of temperatures
8. Soil tank
9. Control heater

รูปที่ 1 แผนภาพการทดลองกระจายความร้อนในดิน



รูปที่ 2 อุปกรณ์ทดลอง (ก) ท่อ 2 รู (ข) ท่อ 3 รู (ค) การวางท่อจ่ายน้ำร้อนในถังใส่ดิน

2.1 ข้อมูลการทดลอง

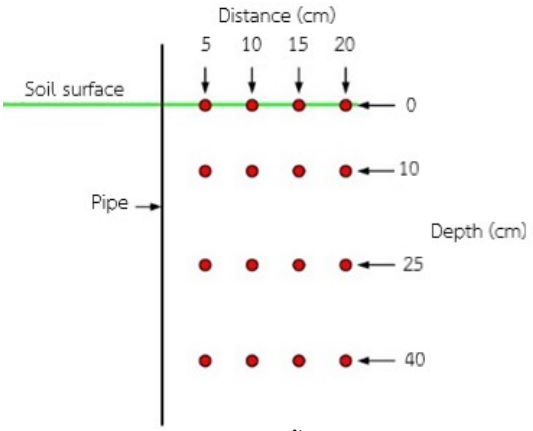
การทดลองกระจายความร้อนในดินจำนวน 3 ถัง ถังที่ 1 ใช้สำหรับปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน ถังที่ 2 ใช้สำหรับท่อปล่อยน้ำร้อนใต้ผิวดินแบบ 2 รู และถังที่ 3 ใช้ท่อแบบ 3 รู แสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C อัตราการไหลของน้ำ 9.35×10^{-6} m^3 s^{-1} และวัดอุณหภูมิห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5, 10, 15 และ 20 cm ที่ระดับความลึกดิน 0, 10, 25 และ 40 cm ใช้เวลาในการทดลอง 30, 60, 120, 180 และ 240 min โดยมีปริมาตรดินภายในถัง 0.10157 m^3 ความหนาแน่นของดิน 886.09 kg m^{-3} โดยมีส่วนประกอบของดินที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็นดินชนิด sand 32%, silt 28% และ clay 40% ความชื้นของดิน 47.2% และค่าการนำความร้อน 0.85 W (m K)$^{-1}$

2.2 ท่อและถังใส่ดิน

ท่อปล่อยน้ำร้อนใต้ดิน มีขนาดความยาว 50 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.13 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.174 cm ความหนาของผนังท่อ 0.478 cm โดยท่อปล่อยน้ำร้อน 2 รู กำหนดให้รูที่ 1 อยู่บนผิวดินและรูที่ 2 อยู่ใต้ดินระยะห่าง 30 cm และท่อปล่อยน้ำร้อน 3 รู กำหนดให้รูที่ 1 อยู่บนผิวดิน รูที่ 2 และ 3 อยู่ใต้ดินระยะห่างของรู 15 cm ท่อทั้ง 2 แบบ ฝังในถังดินแนวตั้งลึก 30 cm และการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินโดยปล่อยน้ำร้อนที่ศูนย์กลางของถังดิน ที่ทางออกน้ำร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm และถังใส่ดินขนาดภายนอก 50 × 50 × 50 cm ความหนาผนัง 2 cm แสดงในรูปที่ 2

2.3 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ

ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ภายในถังใส่ดิน แสดงในรูปที่ 3 ท่อปล่อยน้ำร้อนติดตั้งกลางถังดิน และวัดระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5, 10, 15 และ 20 cm ที่ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิและฝังเชื้อ 1 ถุงต่อตำแหน่ง ทั้งหมด 16 ตำแหน่งต่อการทดลอง



รูปที่ 3 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ และฝังเชื้อ *Ralstonia solanacearum*

2.4 การเพาะเชื้อและทดสอบ

การยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพื่อศึกษาการใช้น้ำร้อนยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคพืช *Ralstonia solanacearum* เป็นสาเหตุของโรคเหี่ยวเขียวในรากพืชที่ถูกฝังอยู่ในดินที่ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm ตัวอย่างเชื้อแบคทีเรีย *Ralstonia solanacearum* (from Bacteriology group, Plant Disease Research and Development Department of Agriculture, Thailand) ได้มาจากการเพาะเลี้ยงเชื้อด้วยการเขย่าที่ 30 °C และหมุนเหวี่ยง 6,000 × g ที่ 20 min แล้วนำเชื้อไปล้างในน้ำกลั่นสองครั้ง หลังจากที่ล้างเชื้อครั้งสุดท้าย พักไว้ในน้ำกลั่นปลอดเชื้อ (SDW) การกำหนดจำนวนของเซลล์ ได้จากการวัดความหนาแน่นของแสงด้วย OD600 เชื้อจะถูกเจือจางเพื่อให้ได้จำนวนของเซลล์ที่ต้องการ และนำตัวอย่างเชื้อไปผสมกับดินทดลอง การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในดินที่มีจำนวน 4.7×10^{7} cfu g^{-1} จากการเพาะเชื้อสายพันธุ์ *Ralstonia solanacearum* ถูกผสมกับดินแต่ละถุงและเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อ ผลของการประเมินการเปลี่ยนแปลงของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินตัวอย่างที่ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5, 10, 15 และ 20 cm ที่ 30, 60 และ 240 min หลังการทดลองทำการวิเคราะห์โดยวิธีเจือจางบนแผ่นมันฝรั่งในอาหารเลี้ยงเชื้อสังเคราะห์ (PSA) เชื้อในดินจะถูกนับจำนวน *Ralstonia solanacearum* ที่เจริญเติบโตบน PSA และนำมาเปรียบเทียบกับการควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบน PSA

2.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

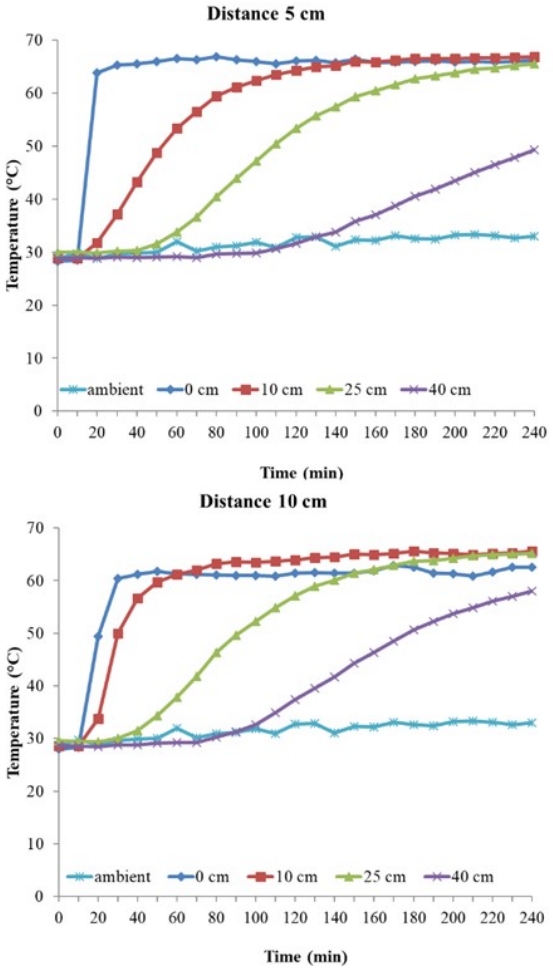
การทดลองกระจายความร้อนดินด้วยน้ำร้อนทั้ง 3 วิธี เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมดินใส่ถังก่อนการทดลองทิ้งไว้ 48 hr (ทำซ้ำทุกการทดลอง) การเก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินใช้เครื่องบันทึกข้อมูล Yokogawa DX230-3-2 ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล ทุก 10 min ที่ระยะเวลา 240 min และตั้งค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ 70 °C ด้วยกล่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติก่อนการทดลอง 30 min และปรับตั้งอัตราการไหลของน้ำร้อน เริ่มบันทึกข้อมูลอุณหภูมิดินก่อนปล่อยน้ำร้อน 10 min หลังจากนั้นจึงเริ่มปล่อยน้ำร้อนลงดิน หลังจากครบเวลาที่กำหนด นำผลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายความร้อนในดินทั้ง 3 วิธี และนำวิธีการปล่อยน้ำร้อนที่ใช้เวลาเพิ่มความร้อนดินน้อยที่สุด มาใช้สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูก โดยทดลองที่ระยะเวลา 30, 60 และ 240 min โดยฝังถุงดินและ *Ralstonia solanacearum* ตัวอย่างในดินที่ระยะห่างและความลึกที่กำหนด หลังจากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนวิธีการปล่อยน้ำร้อนลงดินข้างต้น เมื่อครบกำหนดเวลาทดลองทำการเก็บถุงตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลโดยการเพาะเชื้อและนับจำนวนเชื้อที่เหลือหลังการทดลองในห้องปฏิบัติการ

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

พิจารณาผลการทดลองที่ระยะเวลาปล่อยน้ำร้อนเนื่องจากต้องการลดเวลาการเพิ่มความร้อนดินที่ระยะห่างและระดับความลึกต่าง ๆ

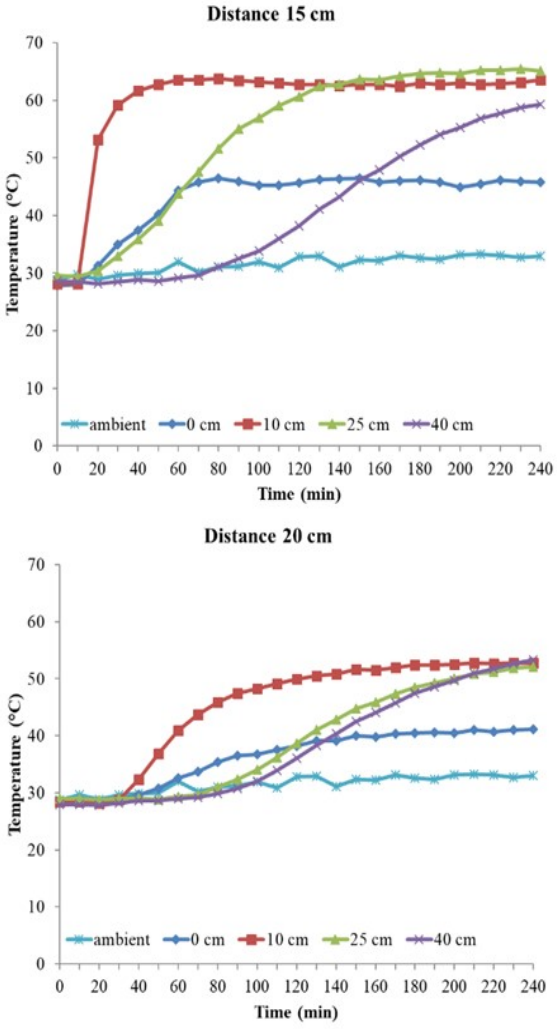
3.1 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน

อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 28.2 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 31.7 °C พบว่าอุณหภูมิดินขึ้นอยู่กับเวลาการปล่อยน้ำร้อน โดยพิจารณาอุณหภูมิดินที่เหมาะสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ต้องใช้เวลาปล่อยน้ำร้อน 180 min โดยมีอุณหภูมิดินเรียงตามลำดับความลึกที่ระยะห่าง 5 cm แสดงดังรูปที่ 4

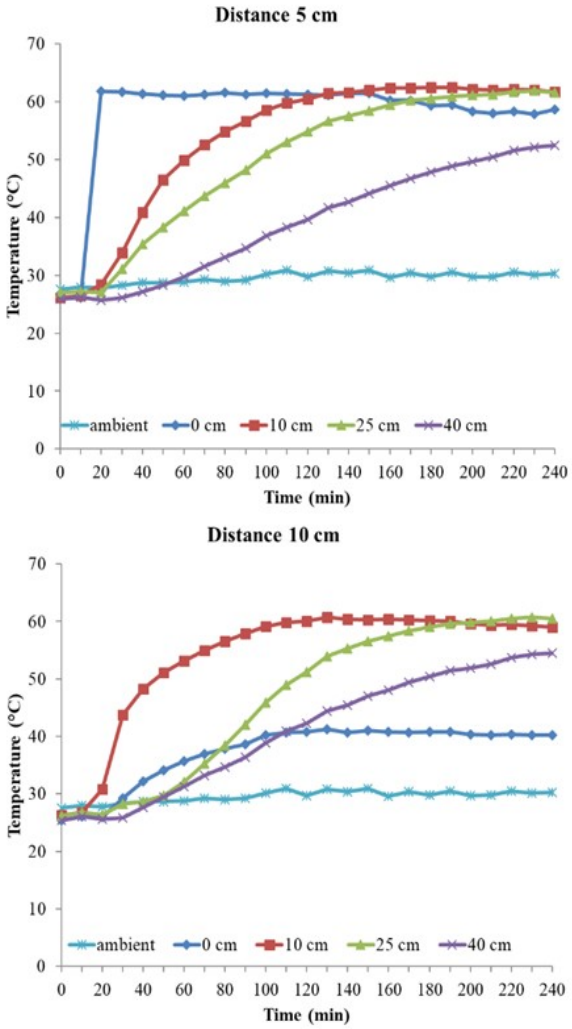


รูปที่ 4 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

อุณหภูมิดินเท่ากับ 66, 66.5, 62.7 และ 40.6 °C ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 62.6, 65.6, 63.7 และ 50.7 °C ระยะห่าง 15 cm แสดงดังรูปที่ 5 อุณหภูมิดินเท่ากับ 46.1, 63, 64.6 และ 52.3 °C ระยะห่าง 20 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 40.5, 52.4, 48.5 และ 47.5 °C แสดงให้เห็นว่าเวลามีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิดิน และอุณหภูมิผิวดินต่ำกว่าที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมีการสูญเสียความร้อนจากการพาสู่สิ่งแวดล้อมบริเวณผิวดิน และเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นการไหลอิสระของน้ำตามแรงโน้มถ่วงของโลกในดินที่เป็นวัสดุพรุนจะแทรกซึมลงสู่ดินด้านล่างมากกว่าด้านข้าง และน้ำยังมีการถ่ายเทความร้อนสู่ชั้นดินที่ไหลผ่านจึงส่งผลต่ออุณหภูมิดินที่ความลึกเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 5 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนบนผิวดินที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

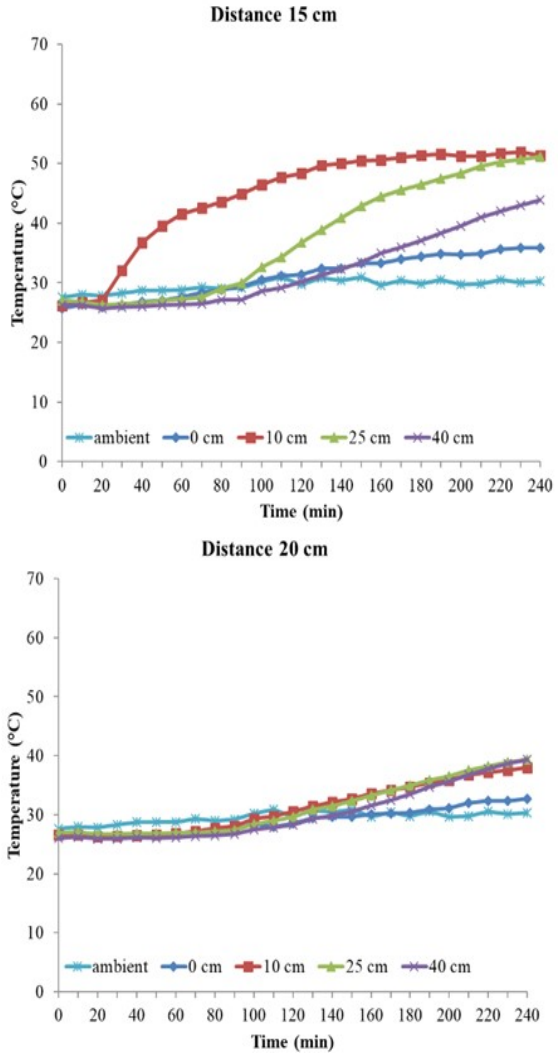


รูปที่ 6 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู ที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.2 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 2 รู

อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 26.1 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.7 °C พบว่าผิวดินบริเวณท่อปล่อยน้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วคล้ายกับการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน พิจารณาที่อุณหภูมิดินสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ต้องใช้เวลาปล่อยน้ำร้อน 120 min ตามลำดับความลึกดิน แสดงดังรูปที่ 6 ระยะห่าง 5 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 61.3, 60.5, 54.8 และ 39.7 °C ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 40.8, 60.1, 51.2 และ 42.3 °C แต่ที่ระยะห่าง 15 cm แสดงดังรูปที่ 7 สามารถเพิ่มความร้อนดินได้เฉพาะที่ความลึก 10 cm เท่ากับ 48.3 °C และที่ระยะห่าง 20 cm ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ แต่เมื่อเพิ่มเวลาปล่อยน้ำร้อนเป็น 240 min ที่ระยะห่าง 15 cm ความลึก 10, 25 และ

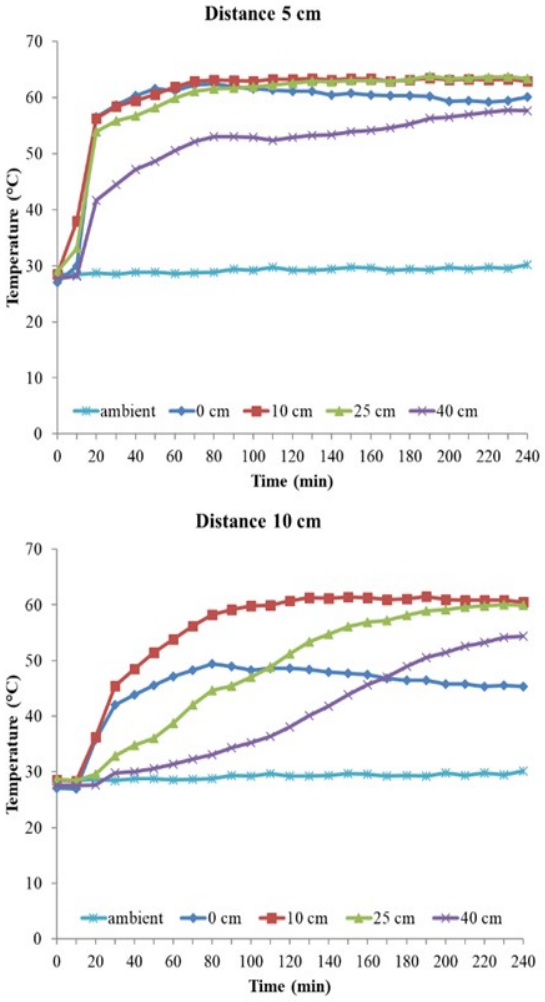
40 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นเป็น 51.4, 51.1 และ 43.9 °C ตามลำดับ และที่ระยะห่าง 20 cm ที่ความลึก 25 และ 40 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้นเป็น 39.4 °C เท่ากัน จากผลการทดลองสามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระยะห่างจากท่อ 5 และ 10 cm ทุกระดับความลึกเพื่อใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* และใช้เวลาน้อยกว่าการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน แต่น้ำร้อนยังมีการสูญเสียความร้อนระหว่างไหลผ่านชั้นดินเช่นเดียวกับการปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน



รูปที่ 7 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.3 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 3 รู

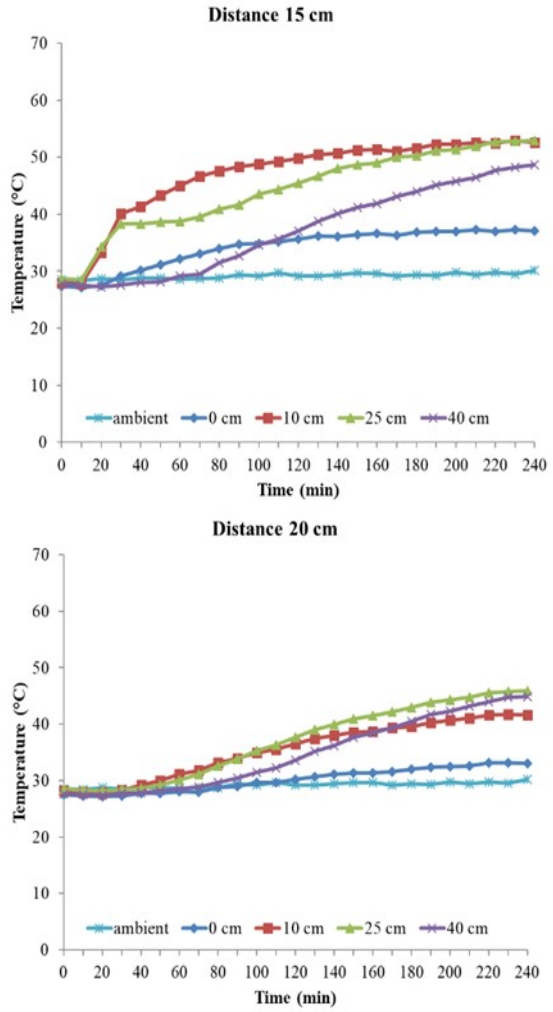
อุณหภูมิดินก่อนการทดลองเฉลี่ย 27.7 °C และอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ย 29.3 พบว่าอุณหภูมิดินที่ระยะห่าง 5 cm ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm แสดงในรูปที่ 8 อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งดีกว่า 2 วิธีแรก และพิจารณาที่อุณหภูมิดินสำหรับยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ใช้เวลาเพียง 30 min ที่ระยะห่าง 5 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดิน 58.7, 58.4, 55.9 และ 44.5 °C เรียงตามลำดับความลึก แต่ที่ระยะห่าง 10 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ที่ความลึก 0 และ 10 cm เท่านั้น ที่อุณหภูมิ 42.1 และ 45.4 °C ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 5 และ 10 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

และที่ระยะห่าง 15 cm แสดงในรูปที่ 9 สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ความลึก 10 cm เท่านั้น ที่อุณหภูมิดิน 40.1 °C และที่ระยะห่าง 20 cm ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิเพื่อยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทุกระดับความลึกดิน แต่เมื่อเพิ่มเวลาปล่อยน้ำร้อน 180 min ตามลำดับความลึกดิน ที่ระยะห่าง 5 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้น 60.4, 63.2, 63.3 และ 55.3 °C ที่ระยะห่าง 10 cm อุณหภูมิดินเพิ่มขึ้น 46.5, 61.1,

58.1 และ 48.9 °C แต่ที่ระยะห่าง 15 cm ความลึก 10, 25 และ 40 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดิน 51.6, 50.3 และ 44 °C ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 20 cm ความลึก 10, 25 และ 40 cm อุณหภูมิดินเท่ากับ 39.6, 42.9 และ 40.5 °C ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มเวลาปล่อยน้ำร้อน 240 min ที่ระยะห่างและความลึกดินทั้งหมดมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเช่นเดียวกับระยะเวลา 180 min แต่อุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 1 ถึง 5 °C การปล่อยน้ำร้อนจากท่อจำนวน 3 ตำแหน่ง ที่ผิวดินและที่ระดับความลึกใต้ดิน 15 และ 30 cm สามารถลดการสูญเสียความร้อนและเวลาการซึมของน้ำร้อนสู่ชั้นดินที่มีความลึกเพิ่มขึ้น โดยสามารถถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนสู่ดินเร็วกว่าการนำความร้อนของดินที่สภาวะปกติ แต่มีข้อจำกัดเรื่องระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน เนื่องจากน้ำร้อนมีการไหลแบบอิสระจึงสามารถแทรกซึมสู่ดินด้านข้างได้ไม่เกิน 10 cm



รูปที่ 9 ผลการทดลองปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm ที่ความลึกของดิน 0, 10, 25 และ 40 cm บันทึกอุณหภูมิทุก 10 min

3.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองปล่อยน้ำร้อน 3 แบบ

อุณหภูมิน้ำ 70 °C อัตราการไหลของน้ำ 9.35×10^{-6} $m^3 s^{-1}$ เวลา 30 min ระยะห่าง 5 cm ความลึกดิน 0, 10, 25 และ 40 cm การปล่อยน้ำร้อนบนผิวดิน อุณหภูมิเท่ากับ 65.3, 37.2, 30.2 และ 29.1 °C ตามลำดับความลึกดิน การปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 2 รู อุณหภูมิเท่ากับ 61.7, 33.9, 31.1 และ 26.2 °C ตามลำดับความลึกดิน การปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู อุณหภูมิเท่ากับ 58.7, 58.4, 55.9 และ 44.5 °C ตามลำดับความลึกดิน จากผลการทดลองพบว่าท่อแบบ 3 รู ที่ระดับความลึกดิน 40 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินสูงกว่า 2 แบบแรกที่เงื่อนไขเดียวกัน

3.5 ผลการทดลองยับยั้งเชื้อ Ralstonia solanacearum

การทดลองยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ทำการทดลองกับการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู (ผลการทดลองเพิ่มความร้อนดินใช้เวลาน้อยที่สุด) เก็บข้อมูลที่เวลา 30, 60 และ 240 min ตามลำดับ โดยมีจำนวนเชื้อ *Ralstonia solanacearum* เริ่มต้น 4.7×10^7 cfu g^{-1} soil (cfu =colony forming unit) คิดเป็น 100% ก่อนการทดลอง พิจารณาผลการยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในตารางที่ 1 เป็นจำนวนที่เหลือหลังการทดลอง

ตารางที่ 1 *Ralstonia solanacearum* ที่เหลือหลังการทดลอง

Distance 5 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.2×10^7	5.2×10^4	0
10	3.7×10^6	1.6×10^3	0
25	1.2×10^7	2.7×10^5	0
40	4.6×10^7	3.5×10^4	0
Distance 10 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^7	2.3×10^4	1.2×10^2
10	4.4×10^7	7.6×10^3	0
25	4.1×10^5	6.1×10^4	0
40	4.6×10^7	2.2×10^6	3.9×10^3

Distance 15 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^{7}	4.6×10^{7}	4.4×10^{7}
10	4.5×10^{7}	4.3×10^{7}	5.3×10^{6}
25	4.7×10^{7}	2.1×10^{7}	3.6×10^{3}
40	2.4×10^{6}	2.9×10^{5}	1.4×10^{2}
Distance 20 cm			
Depth of soil (cm)	Time (min) and Population of *R. solanacearum* (cfu g^{-1})		
	30	60	240
0	4.7×10^{7}	4.1×10^{7}	4.5×10^{7}
10	4.1×10^{7}	4.3×10^{7}	4.7×10^{7}
25	4.3×10^{7}	4.2×10^{7}	4.3×10^{7}
40	2.4×10^{7}	3.7×10^{6}	2.2×10^{6}

แสดงให้เห็นว่าการปล่อยน้ำร้อนลงดินที่เวลา 240 min ที่ระยะห่าง 5 cm ความลึกดิน 0, 10, 25 และ 40 cm และที่ระยะห่าง 10 cm ความลึกดิน 10 และ 25 cm สามารถยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทั้งหมด แต่ที่ระยะห่าง 15 และ 20 cm สามารถลดจำนวนเชื้อเหลือเพียง 1.4×10^{2} และ 2.2×10^{6} cfu g^{-1} ที่ความลึกของดิน 40 cm สังเกตว่าจำนวน *Ralstonia solanacearum* ลดลงโดยขึ้นอยู่กับเวลาและน้ำร้อนที่ไหลผ่านชั้นดิน ที่เวลา 30, 60 และ 240 min ยังมีจำนวน *Ralstonia solanacearum* เหลืออยู่ทั้งหมด 71.5%, 32.3% และ 24.8% ตามลำดับเวลา

3.6 อภิปรายผลการวิจัย

การปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อ 3 รู สามารถลดเวลาการไหลของน้ำร้อนผ่านชั้นดิน และถ่ายเทความร้อนจากการนำของน้ำร้อนสู่ดินชั้นล่างได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 cm สามารถเพิ่มอุณหภูมิผิวดินสูงสุด 58.7 °C และต่ำสุดที่ความลึกของดิน 40 cm อุณหภูมิ 44.5 °C ที่เวลา 30 min เมื่อเพิ่มเวลาการปล่อยน้ำร้อนเป็น 60, 120, 180 และ 240 min พิจารณาความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 40 cm เท่ากับ 50.6, 52.9, 55.3 และ 57.7 °C ตามลำดับเวลา และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มความร้อนดินแบบอื่น ตัวอย่างเช่น การคลุมดินด้วยพลาสติกเพื่อเก็บความร้อนและการทำ solarization ทั่วไปปกติอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุด ที่ความลึก 10 cm เท่ากับ 37 และ 50 °C และที่ความลึก 20 cm เท่ากับ 38 และ 43 °C ที่อุณหภูมิอากาศ 20 ถึง 35 °C [1] และการใช้พาราโบลาแบบไม่สมมาตรรวมกับการหยดน้ำบนผิวดินระดับความลึกไม่เกิน 50 cm อุณหภูมิเฉลี่ย 41.3 °C [9] และการใช้ไอน้ำร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิดินได้ไม่เกินระดับความลึก 16 cm [10,11] จากข้อมูลดังกล่าว เมื่อพิจารณาวิธีการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ผลการทดลองที่ระยะห่างท่อ 5 cm อุณหภูมิดินสูงขึ้นมากกว่า 50 °C อย่างรวดเร็วถึงระดับความลึก 40 cm ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิและความลึกดินที่ดีกว่าวิธีอื่น

การนำวิธีปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* โดยพิจารณาจำนวนที่เหลือหลังจากการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้พาราโบลาแบบไม่สมมาตรรวมกับการหยดน้ำบนผิวดิน ผลการทดลองที่ผิวดิน และที่ความลึก 5 cm เหลือ *Ralstonia solanacearum* หลังการทดลอง 4.1×10^{3} และ 7.5×10^{3} cfu g^{-1} ตามลำดับ [9] และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แอมโมเนียไบท์คาร์บอเนตยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum (FOC), F. oxysporum f. sp. niveum (FON),* และ *F. oxysporum f. sp. melonis (FOM)* ในดิน โดยใช้เวลาในการทดลอง 5, 7 และ 3 วัน ตามลำดับ [13] และเปรียบเทียบกับการใช้ความร้อนยับยั้งเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินผสมกับเศษซากมะเขือเทศ ที่อุณหภูมิ 25 และ 45 °C โดยใช้เวลา 1 ถึง 6 สัปดาห์ [14] แต่วิธีการปล่อยน้ำร้อนจากท่อ 3 รู ที่ระยะห่าง 5 cm ความลึก 0, 10, 25 และ 40 cm ใช้เวลาเพียง 240 min สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ได้ทั้งหมด

ข้อเสนอแนะจากผลการทดลอง สามารถนำผลการทดลองมาพัฒนาต่อโดยการเพิ่มจำนวนท่อปล่อยน้ำร้อนและจัดเรียงท่อที่ระยะห่างระหว่างท่อ 5 cm (แนวระนาบ) เพื่อลดปัญหาความร้อนของดินที่ระยะห่างเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นอีกวิธีที่สามารถนำไปใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินที่มีการระบาดของเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. บทสรุป

ในการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญจากการทดลองดังนี้

- วิธีการปล่อยน้ำร้อนใต้ดินจากท่อแนวตั้งแบบ 3 รู สามารถเพิ่มอุณหภูมิดินที่ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5, 10, 15 และ 20 cm ที่ความลึกดิน 0, 10, 25 และ 40 cm
- เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *Ralstonia solanacearum* ในดินเพาะปลูกที่เวลา 30, 60 และ 240 min สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ

Ralstonia solanacearum ที่ 28.5%, 67.7% และ 75.2% ตามลำดับเวลา แต่ที่ระยะเวลา 240 min ระยะห่างจากท่อปล่อยน้ำร้อน 5 cm ทุกระดับความลึกดิน และที่ระยะห่าง 10 cm ความลึกดิน 10 และ 25 cm นั้นสามารถยับยั้งเชื้อได้ทั้งหมด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และโครงการวิจัยแห่งชาติสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา สำหรับการสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Stapleton J. Soil solarization in various agricultural production systems. Crop Protection. 2000;19:837–841.

[2] Al-Karaghouli AA, Al-Kayssi AW. Influence of soil moisture content on soil solarization efficiency. Renewable Energy. 2001;24:131-144.

[3] Scopa A, Candido V, Dumontet S, Pasquale V, Miccolis V. Repeated solarization and long-term effects on soil microbiological parameters and agronomic traits. Crop Protection. 2009;28: 818-824.

[4] Tjamos EC, Antoniou P, Tjamos SE. Implementation of soil solarization in Greece: conclusions and suggestions. Crop Protection. 2000;19:843-846.

[5] Pulat E, Coskun S, Unlu K, Yamankaradeniz N. Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey. Energy. 2009;34:1284-1295.

[6] Koyun A, Demir H, Torun Z. Experimental study of heat transfer of buried finned pipe for ground source heat pump applications. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2009;36:739-743.

[7] Gao P, Zhou G. Study on temperature field around heat pipe underground based on line heat source theory. Energy and Buildings. 2011;43:2483-2487.

[8] Scopa A, Candido V, Dumontet S, Miccolis V. Greenhouse solarization: effects on soil microbiological parameters and agronomic aspects. Scientia Horticulture. 2008;116:98-103.

[9] Phitthayarachasak T, Thepa S, Kongkiattikajorn J. Solar energy system reduces time taken to inhibit microbial growth in soil. Renewable Energy. 2009;34:2467-2473.

[10] Gay P, Piccarolo P, Aimonino D, Tortia C. A high efficiency steam soil disinfestation system, part I: Physical background and steam supply optimization. Biosystems engineering. 2010;107:74-85.

[11] Gay P, Piccarolo P, Aimonino D, Tortia C. A high efficacy steam soil disinfestations system, part II: Design and testing. Biosystems engineering. 2010;107:194-201.

[12] Suttisong S, Rattanadecho P. The experimental investigation of heat transport and water infiltration in granular packed bed due to supplied hot water from the top: Influence of supplied water flux, particle sizes and supplied water temperature. Experimental Thermal and Fluid Science. 2011;35:1530-1534.

[13] Sun L, Song S, Fu L, Deng X, Wang D, Liang X, Li R, Shen Q. Exploring a soil fumigation strategy based on ammonium bicarbonate to control *Fusarium* wilts of cucurbits. Crop Protection. 2015;70:53-60.

[14] Zanón MJ, Font MI, Jordá C. Use of tomato crop residues into soil for control of bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. 2011;30:1138-1143.