การศึกษาผลของลมที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดิน

(The Effects of Wind on Heat Transfer from Surface Fire to Surface Mineral Soil)

ชยกร บุญศิริชัย[1] และ วัชรพงษ์ ธัชยพงษ์*

[1]ห้องวิจัยระบบอัตโนมัติและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200
*ติดต่อ: โทรศัพท์: 053-944-146, โทรสาร: 053-944-145
E-mail: wtacha@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

การชิงเผา (Early Burning) เป็นเครื่องมือสำคัญของนักป่าทั่วโลกในการลดปริมาณเชื้อเพลิงสะสมเพื่อป้องกันไฟป่า โดยการดำเนินการชิงเผาจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของผิวดินไม่ให้เกิน 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของอินทรียวัตถุและการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในผิวดิน (Surface Mineral Soil) การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในปัจจุบัน ความชื้นของดินได้ถูกใช้เป็นปัจจัยหลักในการวางแผนการป้องกันผิวดินเสียหายจากการชิงเผา อย่างไรก็ตาม ลมถือเป็นปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อความร้อนแรงของไฟซึ่งมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนลงสู่ผิวดิน การศึกษานี้จึงได้สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายขึ้นเพื่อศึกษาผลของลมที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดิน โดยทำการศึกษาไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม (Heading Fire) และไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม (Backing Fire) โดยกำหนดให้อัตราการลุกลามของไฟอยู่ในช่วง 0.002 – 0.03 เมตรต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการลุกลามที่ความเร็วลมในช่วง 0.12 – 0.30 เมตรต่อวินาที และกำหนดให้ดินมีค่าความชื้น 5.0 – 24% มาตรฐานแห้ง โดยถาดเชื้อเพลิงมีขนาดกว้าง 0.3 m ยาว 0.6 m และดินหนา 0.05 m โดยพบว่า ไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลมจะทำให้ผิวดินร้อนขึ้นมากกว่าไฟที่ลุกลามตามทิศทางของลม โดยไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางของลมจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดินที่ความลึก 0-0.02 m สูงขึ้นได้เท่ากับ 422.68 K และมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 472.03 K ในขณะที่ไฟที่ลุกลามตามทิศทางลมจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดินที่ความลึก 0-0.02 m สูงขึ้นได้เท่ากับ 393.95 K และมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 450.46 K แต่หากพิจารณาผิวดินที่ความลึก 0-0.05 m ความร้อนจากไฟจะไม่ทำให้อุณหภูมิของผิวดินสูงมาก โดยไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางของลมจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดินสูงขึ้นได้เท่ากับ 317.86 K และมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 327.13 K ในขณะที่ไฟที่ลุกลามตามทิศทางลมจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดินสูงขึ้นได้เท่ากับ 308.17 K และมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 318.91 K

คำหลัก: การชิงเผา, อุณหภูมิของผิวดิน

Abstract

Early Burning is an essential tool for foresters around the world to reduce fuel accumulation and prevent the occurrences of high intensity wildfires. To conduct early burning, it is necessary to control the surface mineral soil's temperature not to exceed 85 degree Celsius as it will affect the structure of organic matter and microbe in surface mineral soil. The calculation of heat transfer from surface fire to surface mineral soil is such a crucial thing. Currently, soil moisture content is used as an only factor for estimating surface mineral soil temperatures during the fire. However, wind is another factor that obviously influences surface fire behavior which in turn affects heat penetration into surface mineral soil. Therefore, a simplified model based on heat transfer was used to study the effects of wind on heat transfer from surface fire to surface mineral soil underneath the fire. The fuel bed size was 0.3 m width, 0.6 m length, and 0.05 m soil depth. It was found that the backing fire shows a higher effect on surface soil temperature increasing. At the soil depth of 0-0.02 m, the average and maximum temperatures of soil were 422.68 K and 472.03 K, respectively, for backing fire. While the average and maximum temperatures of soil were 393.95 K and 450.46 K, respectively, for heading fire. At the soil depth of 0-0.05 m, the average and maximum temperatures of soil were 317.86 K and 327.13 K, respectively, for backing fire. While the average and maximum temperatures of soil were 308.17 K and 318.91 K, respectively, for heading fire.

Keywords: Early burning, Soil temperature

1. บทนำ

การชิงเผา (Early Burning) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงสะสมเพื่อป้องกันการเกิดไฟป่า โดยการดำเนินการชิงเผาจะต้องควบคุมให้ไฟที่ได้มีความรุนแรงต่ำและสามารถควบคุมการลุกลามของไฟได้ง่าย โดยการดำเนินการชิงเผาจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดิน (Surface Mineral Soil) ที่ความลึกช่วง 0-5 cm ไม่ให้เกิน 85 องศาเซลเซียส เนื่องจากจุลินทรีย์ในดินกลุ่มที่หมุนเวียนธาตุอาหารไนโตรเจน (N-cycling bacteria) เช่น Bacillus, Clostridium และ Thermoactinomyces ซึ่งเป็นกลุ่มที่สำคัญต่อพืช เป็นจุลินทรีย์ที่ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 85 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวดินไม่เกิน 85 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์เหล่านี้จะฟื้นตัวได้อย่างรวดเร็วหลังเกิดไฟ [1-3] นอกจากนั้น อุณหภูมิสูงสุดของผิวดิน ณ ตำแหน่งใดๆ ไม่ควรเกิน 300 องศาเซลเซียสเพราะจะทำให้โครงสร้างดินเสีย [4]

ที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาอุณหภูมิของผิวดินขณะเกิดไฟ โดยการศึกษาส่วนใหญ่ได้ทำการทดลองเก็บตัวอย่างดินจากสถานที่ต่างๆที่ความลึก 0-5 เซนติเมตร เพื่อนำมาทดลองในถาดการทดลองโดยใช้ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิแต่ละจุดเพื่อนำมามาสร้าง Temperature map [5, 6] ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้ Thermocouple วัดการกระจายอุณหภูมิในผิวดินยังคงเป็นเรื่องยากที่จะวัดได้ในการทดลอง

ในการศึกษานี้จึงได้สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายขึ้นเพื่อศึกษาผลของลมที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดิน โดยทำการศึกษาไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม (Heading Fire) และไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม (Backing Fire) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจริงสู่ผิวดินโดยพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นหลัก เพื่อคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนผ่านตัวกลางหนึ่งๆ ซึ่งทำให้ทราบการกระจายอุณหภูมิภายในตัวกลาง การแก้สมการการอนุรักษ์พลังงานและนำความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธี Finite Element Method (FEM) คือ เทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีนี้ทำโดยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ โดยสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณคือ สมการการอนุรักษ์พลังงาน และสมการการนำความร้อน ดังนี้

สมการการอนุรักษ์พลังงาน

$$(\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}) + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \qquad (1)$$

โดยที่

$\dot{E}_{in}$ คือ พลังงานความร้อนเข้า

$\dot{E}_{out}$ คือ พลังงานความร้อนออก

$\dot{E}_{gen}$ คือ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น

$\dot{E}_{st}$ คือ พลังงานความร้อนสะสม

สมการการนำความร้อน

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_0 = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (2)$$

โดยที่

T คือ อุณหภูมิของตัวกลาง

k คือ ค่าสภาพนำความร้อน

ในส่วนการระเหยของความชื้นในดิน ได้กำหนดให้อัตราการระเหยสัมพันธ์กับอุณหภูมิของดินตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) ดังนี้

$$k = A\exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \qquad (3)$$

โดยที่

A คือ แฟกเตอร์ความถี่

Ea คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิ

จากการใช้แบบจำลองนี้ได้ใช้เงื่อนไขขอบแบบ Free boundary condition และทำการตรวจสอบผลของจำนวนกริด (Grid independent) โดยทำการเพิ่มและลดจำนวนกริดลง 50% ผลที่ได้จากแบบจำลองมีความแตกต่างกันน้อยมาก

3. เงื่อนไขในการจำลอง

ในการศึกษานี้ ได้จำลองการถ่ายเทความร้อนลงสู่ผิวดิน โดยใช้ขนาดโดเมนของผิวดินกว้าง 0.3 m ยาว 0.6 m และสูง 0.05 m โดยมีการแบ่งจำนวนกริดเท่ากับ 150 x 300 x 25 และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้อุณหภูมิของดินเท่ากับ 300 K และความชื้นของดินเท่ากับ 10% มาตรฐานแห้ง และจำลองให้มีการถ่ายเทความร้อนจากไฟที่ลุกลามอยู่ทางด้านบน

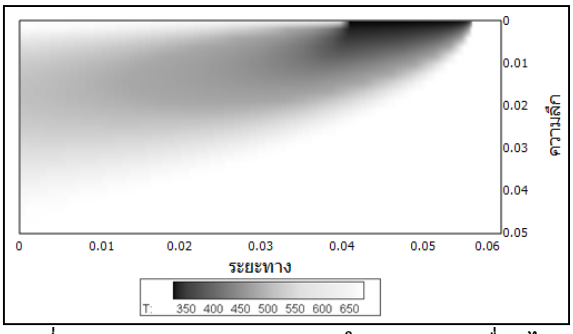
สำหรับเงื่อนไขในการจำลองการลุกลามของไฟผิวดิน ได้กำหนดให้อุณหภูมิของไฟเท่ากับ 700 K ความลึกของหน้าไฟเท่ากับ 0.3 m สำหรับไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม และเท่ากับ 0.15 m สำหรับไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม และมีการแบ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองโดยแบ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม (Heading Fire) และไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม (Backing Fire) โดยมีการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการลุกลามของไฟ (Rate Of Spread) ต่างๆกัน เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินโดยการนำความร้อน โดยการจำลองนี้ได้แบ่งเงื่อนไขออกเป็น 20 เงื่อนไข ดังนี้

ตารางที่ 1: แสดงเงื่อนไขในการจำลองการลุกลามของไฟ

ไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม			ไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม		
เงื่อนไข	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)	อัตราการลุกลาม (เมตร/วินาที)	เงื่อนไข	ความเร็วลม (เมตร/วินาที)	อัตราการลุกลาม (เมตร/วินาที)
1	0.12	0.012	11	0.12	0.020
2	0.14	0.014	12	0.14	0.018
3	0.16	0.016	13	0.16	0.016
4	0.18	0.018	14	0.18	0.014
5	0.20	0.020	15	0.20	0.012
6	0.22	0.022	16	0.22	0.010
7	0.24	0.024	17	0.24	0.008
8	0.26	0.026	18	0.26	0.006
9	0.28	0.028	19	0.28	0.004
10	0.30	0.030	20	0.30	0.002

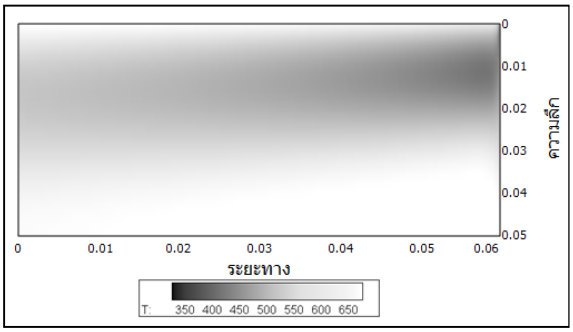
4. ผลการจำลอง

จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินด้วยเทคนิคไฟไนต์เอเลเมนต์ (Finite Element Method) ได้ผลการจำลองดังต่อไปนี้



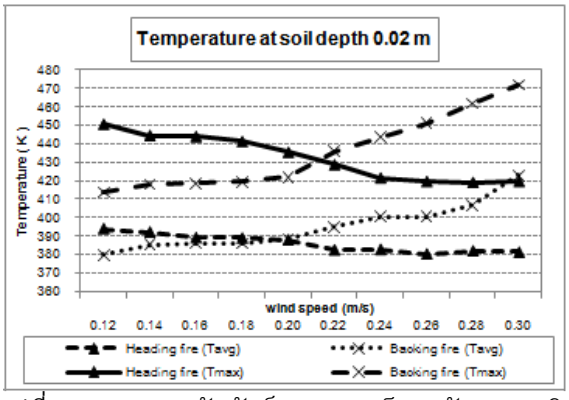
รูปที่1 แสดงการกระจายอุณหภูมิในผิวดินของเงื่อนไขที่ 20 ขณะที่ไฟอยู่บนผิวดิน

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินในขณะที่ไฟกำลังลามอยู่บนผิวดินของเงื่อนไขที่ 20 ซึ่งไฟมีอัตราการลุกลามต่ำสุด ซึ่งพบว่า การถ่ายเทความร้อนขณะที่ไฟกำลังลามอยู่บนผิวดินทำให้อุณหภูมิของผิวดินร้อนขึ้น โดยที่ความลึก 0-0.02 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะสูงขึ้น 133.27 K และที่ความลึก 0-0.05 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะสูงขึ้น 14.94 K เมื่อไฟลุกลามผ่านไปแล้วความร้อนจะค่อยๆ กระจายออกไปดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่2 แสดงการกระจายอุณหภูมิในผิวดินของเงื่อนไขที่ 20 ขณะที่ไฟลามพ้นผิวดินไปแล้ว

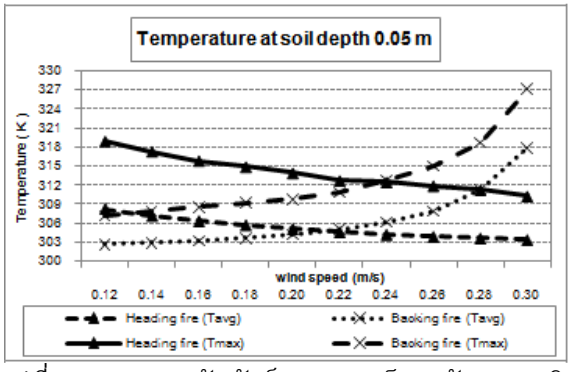
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณอุณหภูมิที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินในขณะที่ไฟลามผ่านผิวดินไปแล้วของเงื่อนไขที่ 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความลึก 0-0.02 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะสูงขึ้น 122.68 K โดยความร้อนจะถ่ายเทลงสู่ผิวดินชั้นที่ลึกลงไป โดยที่ความลึก 0-0.05 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะสูงขึ้น 17.86 K



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.02 m

รูปที่3 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.02 m ซึ่งพบว่าในกรณีของไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจาก 0.12 – 0.30 m/s จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของดินลดลง 13.57 K จาก 393.95 K เป็น 381.35 K ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในผิวดินลดลง 31.38 K จาก 450.46 K เป็น 419.56 K เพราะว่าความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการลุกลามของไฟเพิ่มขึ้น เวลาในการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินลดลง ส่วนในกรณี

ของไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจาก 0.12 – 0.30 m/s จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของดินเพิ่มขึ้นประมาณ 43.03 K จาก 379.66 K เป็น 422.68 K ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในผิวดินเพิ่มขึ้นประมาณ 58.30 K จาก 413.74 K เป็น 472.03 K เพราะว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการลุกลามของไฟลดลง เวลาในการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ดินเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของดินเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.05 m

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.05 m ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มเหมือนกับที่ความลึก 0-0.02 m โดยในกรณีของไฟที่ลุกลามตามทิศทางลม ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจาก 0.12 – 0.30 m/s จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของดินลดลงประมาณ 4.78 K จาก 308.17 K เป็น 303.39 K ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในผิวดินลดลงประมาณ 8.65 K จาก 318.91 K เป็น 310.26 K ส่วนในกรณีของไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นจาก 0.12 – 0.30 m/s จะทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของดินเพิ่มขึ้นประมาณ 15.22 K จาก 302.64 K เป็น 317.86 K ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในผิวดินเพิ่มขึ้นประมาณ 19.97 K จาก 307.15 K เป็น 327.13 K

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ไฟที่ลุกลามในทิศทางย้อนกับทิศทางลมมีผลต่อความเสียหายของจุลินทรีย์มากกว่าไฟที่ลามตามทิศทางของลม ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของดินจะมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในผิวดินโดยเฉพาะในชั้นที่ลึก 0-0.02 เมตรซึ่งมีจุลินทรีย์ในปริมาณมาก โดยจากผลข้อมูลพบว่า ที่ความลึกของดิน 0-0.02 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะเพิ่มขึ้นได้สูงถึง 420 K ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ เช่น กลุ่ม Nitrosomonas (กลุ่มหมุนเวียนธาตุไนโตรเจน) เสียหายเนื่องจากสามารถทนความร้อนสูงสุดได้เพียง 363 K [7] เท่านั้น อีกทั้งรากและเมล็ดพืชจะได้รับความเสียหายเนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้เพียง 343 K[8] แต่อย่างไรก็ตาม ความร้อนที่เพิ่มขึ้นกลับช่วยทำลายเชื้อราที่ผิวดินซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ 353 K [9] ส่วนการลุกลามของไฟตามทิศทางลม อุณหภูมิของผิวดินจะเพิ่มขึ้นได้ถึง 390 K ซึ่งสูงพอที่จะสร้างความเสียหายต่อชั้นผิวดินด้านบนได้แต่ไม่มากเท่าในกรณีของไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลม แต่หากพิจารณาที่ความลึกของดิน 0-0.05 m อุณหภูมิเฉลี่ยของดินจะเพิ่มขึ้นได้สูงสุดถึง 315 K ซึ่ง จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่ได้รับความเสียหาย ซึ่งถึงแม้ว่าจุลินทรีย์ที่รอดจะมีปริมาณน้อยเนื่องจากอยู่ในชั้นผิวดินที่ลึกกว่า 0.02 เมตร แต่เมื่อเวลาผ่านไปจุลินทรีย์ที่รอดนี้จะช่วยทำให้จุลินทรีย์ในชั้นบนสามารถเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายหลังจากการเกิดไฟ ซึ่งสอดคล้องกับหลายการศึกษาก่อนหน้านี้ [10]

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการจำลองการถ่ายเทความร้อนจากไฟลงสู่ผิวดินเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของผิวดินสำหรับไฟที่ลุกลามตามทิศทางของลมกับไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางของลม พบว่า

(1) ไฟที่ลุกลามตามทิศทางลมจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.02 m เท่ากับ 393.95 K โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 450.46 K และอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.05 m เท่ากับ 308.17 K โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 318.91 K

(2) ไฟที่ลุกลามย้อนทิศทางลมจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.02 m เท่ากับ 422.68 K โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 472.03 K และอุณหภูมิเฉลี่ยของดินที่ความลึก 0-0.05 m เท่ากับ 317.86 K โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 327.13 K

การศึกษานี้อยู่ในระยะเริ่มต้น ผลการคำนวณที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาในรายละเอียดและเปรียบเทียบความถูกต้องกับการทดลองต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Acea, M.J. and T. Carballas, *Changes in physiological groups of microorganisms in soil following wildfire.* FEMS Microbiol. Ecol., 1996. 20: p. 30-39.
2. DeLuca, T.H. and K.L. Zouhar, *Effects of selection harvest and prescribed fire on the soil nitrogen status of ponderosa pine forests.* For. Ecol. Manag. , 2000. 138: p. 263-271.
3. Va´zquez, F.J., M.J. Acea, and T. Carballas, *Soil microbial populations after wildfire.* FEMS Microbiol. Ecol. , 1993. 13: p. 93-104.
4. DeBano, L.F., D.G. Neary, and P.F. Ffolliott, *Fire's Effect on Ecosystems.* 1998, New York, NY, USA: John Wiley and Sons.
5. Gimeno-Garcia, E., V. Andreu, and J.L. Rubio, *Spatial patterns of soil temperatures during experimental fires.* GEODERMA, 2004. 118: p. 17-38.
6. Lugassi, R., E. Ben-Dor, and G. Eshel, *A spectral-based method for reconstructing spatial distributions of soil surface temperature during simulated fire events.* Remote Sensing of Environment, 2010. 114: p. 322-331.
7. Dunn, P.H. and L.F. Debano, *Fire's effect on biological and chemical properties of chaparral soils.* In: Mooney, H.A., Conrad, C.E. (Technical. Coordinators), Proceedings of a Symposium on Environmental Conservation: Fire and Fuel Management in Mediterranean Ecosystems, August 4±5, 1988, Palo Alto, CA. Washington, D.C. USDA For. Serv. WO-3. pp. 75±84, 1977.
8. Hare, R.C., *Heat effects on living plants.* USDA For. Serv., Occ. Pap. 183, USDA For. Serv. South. For. Exp. Stn., New Orleans, LA., 1961.
9. Dunn, P.H., *Soil moisture affects survival of micro-organisms in heated chaparral fire.* Soil Biol. Biochem. 17, 143±148., 1985.
10. Neary, D.G., et al., *Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis.* Forest Ecology and Management, 1999. 122: p. 51-71.