บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การชิงเผาในสภาวะที่เชื้อเพลิงติดไฟได้ยาก หมายถึง การเผาเชื้อเพลิงป่าเพื่อลดปริมาณเชื้อเพลิงในเงื่อนไขที่อุณหภูมิอากาศต่ำและความชื้นของเชื้อเพลิงสูง ทำให้ไฟที่ได้มีอัตราการลุกลามต่ำและควบคุมได้ง่าย แต่ก็เป็นสภาวะที่ไฟอาจจะไม่สามารถลุกลามได้เช่นกัน โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลุกลามได้ของไฟนั้น ได้แก่ ความเร็วและทิศทางของลม ชนิดและความชื้นของเชื้อเพลิง ความชันของพื้นที่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปสู่เชื้อเพลิงโดยการพาและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งทำให้อุณหภูมิเชื้อเพลิงสูงขึ้นในขณะที่ความชื้นของเชื้อเพลิงลดลงก่อนที่ไฟจะลุกลามไปถึงเชื้อเพลิง โดยในบทนี้จะอธิบายถึงกระบวนการลุกลามของไฟ การคำนวณกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการลุกลามของไฟและผลของลมที่มีต่อการลุกลามของไฟ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 กระบวนการลุกลามของไฟ

กระบวนการลุกลามของไฟหมายถึง การที่เชื้อเพลิงได้รับความร้อนจากไฟ โดยการถ่ายเทความร้อน เพียงพอต่อกระบวนการเผาไหม้จึงทำให้เกิดการลุกลามของไฟ ซึ่งปัจจัยสำคัญในการลุกลามของไฟคือกระบวนการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดความร้อน (Heat Source) แหล่งรับความร้อน (Heat Sink) และการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ดังนี้

2.1.1 แหล่งกำเนิดความร้อน

แหล่งกำเนิดความร้อน หมายถึง แหล่งผลิตหรือปล่อยพลังงานความร้อน ซึ่งในการศึกษานี้ก็คือ ไฟหรือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยปริมาณพลังงานความร้อนที่แหล่งกำเนิดความร้อนปล่อยออกมาสามารถคำนวณได้จาก [10]

$$Q_{source} = H \cdot W \cdot R \cdot t \quad (1)$$

โดย Q_{source} คือค่าความร้อนที่ได้จากแหล่งความร้อนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของหน้าไฟ มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อเมตร, H คือค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating value) มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม, W คือน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตาราง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมตร, R คืออัตราการลุกลามของไฟ (Rate of spread) มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที, และ t คือเวลาในการลุกลามของไฟ มีหน่วยเป็น วินาที

2.1.2 แหล่งรับความร้อน

แหล่งรับความร้อน หมายถึง แหล่งรับพลังงานความร้อนซึ่งในการศึกษานี้หมายถึงเชื้อเพลิงที่ยังไม่ถูกเผาไหม้ที่อยู่ข้างหน้าของไฟ โดยในเชื้อเพลิงประกอบด้วย เชื้อเพลิงแห้งและความชื้นในเชื้อเพลิง ดังนั้น พลังงานความร้อนที่เชื้อเพลิงที่ได้รับจะถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและการระเหยของความชื้นในเชื้อเพลิง โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{\sin k} = (m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{fuel} + (m \cdot L)_{moisture} + (m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{moisture} \quad (2)$$

โดย Q_{sink} คือค่าความร้อนที่เชื้อเพลิงต้องการต่อหนึ่งหน่วยความยาวของหน้าไฟ มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อเมตร, m คือมวลของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของหน้าไฟมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อเมตร, c_p คือค่าความจุความร้อนของเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน, ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิมีหน่วยเป็น เคลวิน, L คือค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำมีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยดัชนีล่าง fuel หมายถึงเชื้อเพลิง และ moisture หมายถึงความชื้น

2.1.3 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งการติดไฟในแต่ละครั้งนั้นปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงได้รับมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนจะต้องมีค่ามากกว่าค่าปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงต้องการในการติดไฟ ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนปล่อยพลังงานความร้อนออกมาน้อยกว่าที่เชื้อเพลิงต้องการเชื้อเพลิงก็ไม่สามารถติดไฟได้แต่ถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนปล่อยพลังงานความร้อนออกมามากกว่าความร้อนที่เชื้อเพลิงต้องการ ก็จำเป็นต้องพิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนบางส่วนให้กับสิ่งแวดล้อม แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและมีการเรียงตัวไม่ต่อเนื่อง ดังนั้น การนำความร้อน จึงมีค่าต่ำมากและไม่ได้นำมารวมในการคำนวณ จึงคำนวณเฉพาะการพาและการแผ่รังสีความร้อนดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การพาความร้อน หมายถึง การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอาศัยตัวกลางที่เคลื่อนที่ได้ สามารถคำนวณได้โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($\overline{h_D}$) จากสมการดังนี้

$$\overline{h_D} = \frac{\overline{Nu_D}.k}{L} \tag{3}$$

โดย L คือความยาวของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นเมตร, k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และ $\overline{Nu_D}$ คือค่าเลขนัสเซลต์ (Nusselt Number) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยและสามารถหาได้จากสมการของทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\overline{Nu_D} = \frac{\overline{h_D}.D}{k} = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} ; \; 0.7 \le Pr \le 10^6 \tag{4}$$

โดยถ้าค่าของ Pr มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 0.37 และถ้า Pr มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 10 ค่า n จะมีค่าเท่ากับ 0.36 และ Re_D คือค่าเลขเรย์โนล์ด (Reynolds Number) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วย สำหรับการไหลแบบราบเรียบควรมีค่าไม่เกิน 2300 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Re_D = \frac{\bar{v}.D}{\nu} \tag{5}$$

โดย $\bar{v}$ คือค่าความเร็วลมบริเวณผิวของเชื้อเพลิงซึ่งสมมุติให้มีความเร็วต่ำมาก มีหน่วยเป็น, ν คือค่าความหนืดเชิงจลศาสตร์ของอากาศ มีหน่วยเป็น ตารางเมตรต่อวินาที จากสมการ (5) สามารถหาค่าของ Re_D ซึ่งทำให้สามารถทราบค่า C กับค่า m ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.75, 0.4 ตามลำดับ [11] Pr คือเลขพรันด์เทิล (Prandlt Number) ซึ่งไม่มีหน่วย สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \tag{6}$$

โดย α คือค่าการแพร่ของความร้อน มีหน่วยเป็น ตารางเมตรต่อวินาที

การคำนวณหาค่าความร้อนของการพาความร้อนหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_{conv} = \overline{h_D}.A.\left(T_{air} - T_s \right) \tag{7}$$

โดย Q_{conv} คือค่าความร้อนของการพาความร้อน มีหน่วยเป็นวัตต์, A คือพื้นที่หน้าตัดของเชื้อเพลิง มีหน่วยเป็นตารางเมตร, T_{air} - T_s คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิผิวหน้าของเชื้อเพลิง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การแผ่รังสีความร้อน หมายถึง การถ่ายเทความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางโดยอัตราในการแผ่รังสีความร้อนมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิของระหว่างแหล่งความร้อน ในการคำนวณการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสามารถใช้วิธีของ Discrete Coordinate (DO) แบบสามมิติ ซึ่งเป็นวิธีการสร้างกริดเพื่อพิจารณาหาค่าความร้อนของการแผ่รังสีแต่ละตำแหน่ง โดยพิจารณาถึงผลของความร้อนที่มีผลต่อ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาเพื่อคำนวณหาค่าความร้อน ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งวิธีการนี้จะทำการคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีทุกตำแหน่ง โดยค่าความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี มีหน่วยเป็น วัตต์

2.1.4 สัดส่วนของรังสีที่ถ่ายเท (View Factor)

ค่าสัดส่วนของรังสีที่ถ่ายเท (เปล่ง และ สะท้อน) ออกจากพื้นที่ผิวหนึ่งไปอีกพื้นที่อีกผิวหนึ่ง โดยในการหาค่าสัดส่วนของการแผ่รังสี (View Factor) ใชสมการดังนี้ [12]

$$F_{i\rightarrow j} = 1 - \sin\frac{1}{2}\alpha \qquad (8)$$

โดย $F_{i\rightarrow j}$ คือค่าสัดส่วนของรังสีที่ถ่ายเทจากพื้นที่ผิว i ไปยังพื้นที่ผิว j และค่า α คือมุมที่พื้นที่ผิว i กระทำกับพื้นที่ผิว j

2.2 การคำนวณกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการลุกลามของไฟ

เนื่องจากการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีและการพาความทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายที่สูงมากดังนั้นในการอธิบายกระบวนการของการถ่ายเทความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) เป็นเครื่องมือในการจำลองการลุกลามของไฟเพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องจากแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนของการเผาไหม้จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณที่ละเอียดและใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่นาน เนื่องจากจำเป็นต้องใช้กริดในการคำนวณที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น แบบจำลองแบบ Large Eddy Simulation (LES) จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการวิเคราะห์การเผาไหม้ของไฟผิวดินเนื่องจากลดระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ โดย LES จะใช้การแก้สมการควบคุมการไหล (Navier - Stokes Equations) เฉพาะการไหลปั่นป่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวกรอง Spatial Filter และใช้ Sub Grid Scale Models (SGS) ในการคำนวณผลของการไหลปั่นป่วนขนาดเล็ก (เล็กกว่าตัวกรอง Spatial filter) ที่มีต่อการไหลโดยรวม

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ LES มีสมการหลักที่ใช้ในการควบคุมการไหลของของไหล คือ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการอนุรักษ์ชนิดของสาร ดังนี้ [9]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i}=\bar{S}_{s-g} \tag{9}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\rho} u_j u_i}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{-\bar{\rho}\left(u_i u_j-u_i u_j\right)\right\}-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}+\bar{\rho} g_i-\bar{F}_{s,i} \tag{10}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{h}}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\rho} u_j \tilde{h}}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{-\bar{\rho}\left(u_i h-u_i \tilde{h}\right)\right\}-\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial x_i}-\bar{q}_{conv}-\bar{q}_{rad}+\left(1-X_c\right)\bar{\dot{m}}_{s,char} L^{char} \tag{11}$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} Y_K}{\partial t}+\frac{\partial \bar{\rho} u_j Y_K}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{-\bar{\rho}\left(u_j Y_K-u_j Y_K\right)\right\}+\frac{\partial \bar{q}_{Y_{K,i}}}{\partial x_i}+\bar{S}_{s-g,K}+\bar{\omega}_K \tag{12}$$

โดย $\bar{\rho}$ คือค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของก๊าซผสม u_i คือค่าเฉลี่ยของความเร็วโดย Favre-filtered ตาม x_i, t คือเวลา $\bar{S}_{s-g}$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดมวล $\bar{p}$ คือค่าค่าเฉลี่ยของความดัน $\bar{\tau}_{ij}$ คือแรงเฉือนเฉลี่ยที่เกิดในแนว i ขนานกับแนว j, g_i คือค่าความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก $\bar{F}_{s,i}$ คือค่าเฉลี่ยของแรงต้านในแนวแกน i โดยสามารถคำนวณได้จาก $F_{s,i}=0.5\cdot C_D\cdot\bar{\rho}\cdot|u|\cdot u_i$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานคือ $C_D=24\cdot\left(1+0.15\cdot \mathrm{Re}^{0.687}\right)/\mathrm{Re}$ และค่าของ Re หาได้จากสมการที่ (5) $\tilde{h}$ คือค่าเฉลี่ยโดย Favre-filtered ของเอลทัลปีของก๊าซ $\bar{q}_i$ คือค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ความร้อนโดย $\bar{q}_{conv}$ และ $\bar{q}_{rad}$ คือค่าเฉลี่ยของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อปริมาตรระหว่างก๊าซและของแข็งตามลำดับ X_c คืออัตราส่วนระหว่างมวลของถ่าน (Char) กับมวลทั้งหมด L^{char} คือความร้อนจากการเผาไหม้ถ่าน Y_K คือค่าเฉลี่ยโดย Favre-filtered ของอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซ K (โดย K คือชนิดของก๊าซ) $\bar{Y}_K$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนโดยมวลของก๊าซ K, $\bar{q}_{Y_{K,i}}$ คือค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ความร้อนของก๊าซ K ในแนวแกน i, $\bar{\omega}_K$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของก๊าซ K โดยคำนวณตามหลักของ Flame Surface Density (FSD) ซึ่งประมาณค่าจากอัตราการเผาไหม้ต่อพื้นที่ผิว

สำหรับเชื้อเพลิงในสถานะของแข็ง ได้สมมุติให้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกับไม้จิ้มฟัน และการเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (Char) แต่ไม่เกิดขี้เถ้า การเผาไหม้ของไฟผิวดินจะมีการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนไปสู่เชื้อเพลิง ทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการระเหยของความชื้น และการไพโรไรซิสซึ่งย่อยสลายของเซลลูโลสซึ่งทำให้เกิดก๊าซที่ติดไฟได้ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงพอจะทำให้เชื้อเพลิงลุกไหม้และทำให้ไฟผิวดินลุกลามต่อไป ซึ่งอัตรา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การสูญเสียของมวลและอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้ [9]

$$\frac{\partial \bar{m}_s}{\partial t} = -\bar{\dot{m}}_{s,H_2O} - \bar{\dot{m}}_{s,pyr} - \bar{\dot{m}}_{s,char} \tag{13}$$

$$\frac{\partial \bar{c}_{p,s} \bar{m}_s \bar{T}_s}{\partial t} = \bar{q}_{conv} + \bar{q}_{rad} + \bar{q}_{mass} \tag{14}$$

โดยที่ $\bar{m}_s$ คือค่าเฉลี่ยของมวลของของแข็ง $\bar{\dot{m}}_s$ คืออัตราการลดลงของมวลของเชื้อเพลิงซึ่งเกิดจาก การระเหยของความชื้น การเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายเนื้อไม้ด้วยความร้อนหรือปฏิกิริยาไพโรไรซิส (Pyrolysis) และการเผาไหม้ของถ่าน $\bar{c}_{p,s}$ คือค่าเฉลี่ยของความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง และ $\bar{q}_{mass}$ คือค่าเฉลี่ยของอัตราการสูญเสียความร้อนจากการระเหยของความชื้น ปฏิกิริยาไพโรไรซิสและการเผาไหม้ของถ่าน โดยการแผ่รังสีความร้อนได้คำนวณโดยใช้วิธีการ Discrete Ordinates (DO) แบบสามมิติ

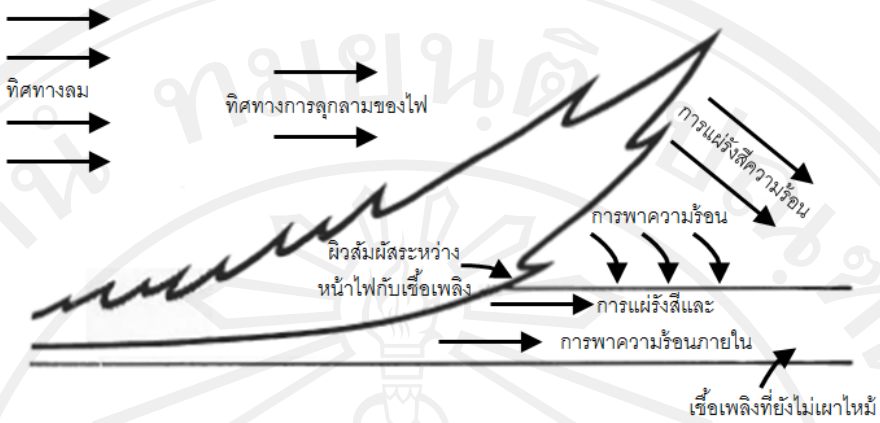
การแก้สมการควบคุมการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady flow) ทำได้โดยสร้างกริดสามมิติระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian) แล้วคำนวณการเปลี่ยนแปลงในแต่ละกริดโดยใช้วิธี Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms (QUICKEST) [13] และใช้การสุ่มค่าหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วของของไหล (Coupling) ด้วยวิธี Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Revised (SIMPLER) [14] และสมมติให้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพียงอย่างเดียว และค่าคงที่ต่างๆของปฏิกิริยาการเผาไหม้สำหรับใบไม้ใช้ตามค่าที่ Porterie et al. ใช้ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับใบสน

2.3 ผลของลมที่มีต่อการลุกลามของไฟ

2.3.1 ไฟที่ลุกลามในทิศทางเดียวกันกับการลุกลามของไฟ (Heading Fire)

การลุกลามของไฟที่มีทิศทางเดียวกันกับลม ส่งผลให้หน้าไฟเอียงเข้าหาเชื้อเพลิงมากขึ้น ซึ่งทำให้การแผ่รังสีความร้อนไปยังเชื้อเพลิงมีมากขึ้น ผนวกกับลมทำให้เกิดการพาความร้อนไปยังเชื้อเพลิง ส่งผลให้เชื้อเพลิงติดไฟได้ง่าย ทำให้การลุกลามของไฟเกิดเร็วขึ้นและมีความรุนแรงมากขึ้นเช่นกัน โดยมีลักษณะการลุกลามดังรูปที่ 1 [8]

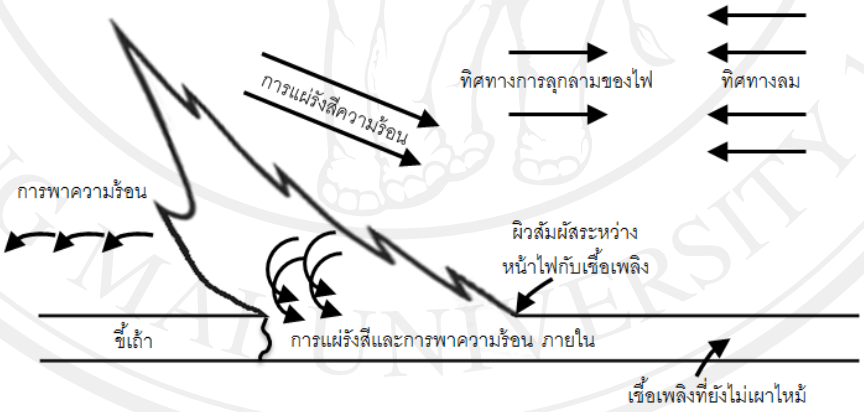
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 1 : ลักษณะของการลุกลามของไฟในทิศทางเดียวกันกับลม

2.3.2 ไฟที่ลุกลามในทิศทางย้อนกับการลุกลามของไฟ (Backing Fire)

การลุกลามของไฟที่มีทิศทางย้อนกันกับลม ส่งผลให้หน้าไฟเอียงออกห่างจากเชื้อเพลิงมากขึ้น ซึ่งทำให้การแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนไปยังเชื้อเพลิงลดลง แต่ความร้อนที่เชื้อเพลิงได้รับยังมีค่ามากพอที่ทำให้เกิดการจุดติดของไฟ ส่งผลให้การลุกลามของไฟช้าลงและมีความรุนแรงน้อยลงเช่นกัน โดยมีลักษณะการลุกลามดังรูปที่ 2 [8]



รูปที่ 2 : ลักษณะของการลุกลามของไฟในทิศทางย้อนกันกับลม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved