



แบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอด

A Crown Fire Initiation Model

วัชรพงษ์ ทัชชพงษ์

Watcharapong Tachajapong

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University, 50200, Thailand

Corresponding author: wtacha@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการทบทวนแบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอดซึ่งมีสองประเภทคือ แบบจำลองกึ่งกายภาพและแบบจำลองกายภาพ แบบจำลองกึ่งกายภาพถูกออกแบบให้ใช้ในการคำนวณการเกิดไฟเรือนยอดจากค่าอัตราการลุกลามของไฟผิวดินโดยสมการที่ใช้ไม่ซับซ้อน ทำให้ประหยัดเวลาในการคำนวณโดยใช้สมการที่ง่ายจากการทดลองเพื่อแก้ผลการคำนวณจากสมการให้มีความแม่นยำ ส่วนแบบจำลองแบบกายภาพนั้นถูกออกแบบเพื่อใช้ศึกษารายละเอียดของกระบวนการในการเกิดไฟเรือนยอด จึงใช้การแก้สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งใช้ความรู้ทางพลศาสตร์ของไหล การถ่ายเทความร้อน และการเผาไหม้ ในการอธิบายกลไกการเกิดไฟเรือนยอด

ABSTRACT

This review encompasses the available crown fire initiation model which includes semi-empirical and physical models. The semi-empirical models are preliminary designed to simulate a landscape scale fire by obtaining the surface fire spread rate from operational model as an input. They are proposed from simple theoretical expressions and completed through experimentation to shorten computational time to predict the crown fire initiation. In contrast, the physical models are developed for simulating more details of the physical mechanisms which control the crown fire initiation. They require more computational resources to solve the governing equations of fluid dynamics, heat transfer, and combustion.

1. บทนำ

ไฟป่าหมายถึงไฟที่เกิดขึ้นในป่าแล้วไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ไฟที่มีความรุนแรงสูงหรือไฟที่เกิดในพื้นที่ซึ่งเข้าไปดับยาก การลุกลามของไฟป่าสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ ไฟใต้ดิน (Ground fire) ไฟผิวดิน (Surface fire) และไฟเรือนยอด (Crown fire) ไฟใต้ดินจะเผาไหม้อันตรียัตถุในผิวดิน ไฟผิวดินจะเผาไหม้เศษใบไม้ กิ่งไม้ ที่ทับถมอยู่บนผิวดิน ส่วนไฟเรือนยอดจะเผาไหม้เรือนยอดของต้นไม้ โดยไฟเรือนยอดถือเป็นไฟป่าที่รุนแรงและไม่สามารถดับได้โดยตรง [1, 2] และมี

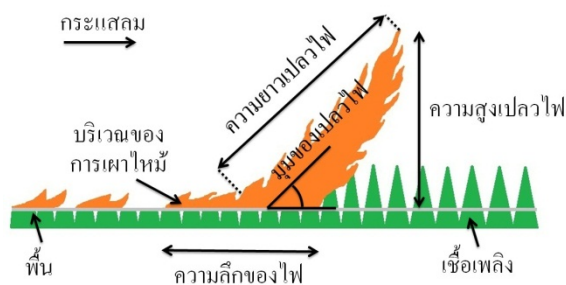
โอกาสทำให้เกิดการ “blow-ups” ซึ่งไฟจะลุกลามรวดเร็ว และมีเปลวไฟที่สูงมาก (มากกว่า 50 เมตร) ตัวอย่างเช่น ไฟป่าที่รัฐมอนทานา ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1910 ซึ่งเกิด “Big Blowup” ทำให้ไฟไหม้พื้นที่ป่า 6 ล้านไร่หมดภายในเวลา 2 วัน การป้องกันการเกิดไฟเรือนยอดจึงมีความสำคัญ

ไฟเรือนยอดโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อไฟผิวดินที่ลุกลามอยู่ใต้เรือนยอดถ่ายเทความร้อนสู่เรือนยอดของต้นไม้ทางด้านบนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน [3, 4] ทำให้อุณหภูมิของเนื้อไม้สูงขึ้นและ

ความชื้นในเนื้อไม้จะระเหยออก เมื่ออุณหภูมิของเนื้อไม้เพิ่มขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายเนื้อไม้กลายเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้เช่น CO จะเริ่มเกิดขึ้น อัตราการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนเมื่ออุณหภูมิของเนื้อไม้เพิ่มถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดก๊าซ CO จะมากพอที่จะทำให้ส่วนผสมระหว่าง CO กับอากาศเพียงพอและเกิดการลุกไหม้ขึ้น [5] โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสกับอุณหภูมิจะเป็นไปตามสมการ Arrhenius reaction ดังนี้ [6]

$$\dot{m}_{pyr} = A_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไฟเรือนยอดประกอบด้วย พฤติกรรมของไฟผิวดิน การถ่ายเทความร้อน และลักษณะของเรือนยอด



รูปที่ 1 ลักษณะของไฟผิวดินที่ลุกลามจากซ้ายไปขวา

พฤติกรรมของไฟผิวดิน หมายถึง อัตราการลุกลาม ความสูงเปลวไฟ มุมเอียง และความลึกของหน้าไฟ [7-10] ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อแหล่งกำเนิดความร้อน โดยทั่วไปการเผาไหม้ของไฟผิวดินจะทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนออกจากเปลวไฟ และทำให้อากาศร้อนยกตัวขึ้น เกิดการพาความร้อนขึ้นสู่ด้านบน เมื่ออัตราการลุกลาม ความสูงเปลวไฟ และความลึกของหน้าไฟเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการปล่อยความร้อนออกมาจากไฟผิวดินสูงขึ้น ไฟผิวดินมีความรุนแรงมากขึ้น โอกาสในการเกิดไฟเรือนยอดจึงสูงขึ้นด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมไฟ คือ คุณสมบัติของเชื้อเพลิง สภาพอากาศ

และสภาพพื้นที่ คุณสมบัติของเชื้อเพลิงผิวดิน ได้แก่ ปริมาณ การเรียงตัว ความต่อเนื่อง สัดส่วนใบไม้แห้งต่อใบไม้สด รูปร่าง และความชื้น [7, 11, 12] สภาพอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน [12-14] และสภาพพื้นที่ ได้แก่ ความลาดชัน และทิศทางรับแสงแดด [8, 15]

การถ่ายเทความร้อน หมายถึง การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากไฟผิวดินสู่เรือนยอด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับตำแหน่งของไฟผิวดิน โดยในขณะที่ไฟผิวดินกำลังลามเข้าสู่ต้นไม้ ความร้อนจะถ่ายเทสู่เรือนยอดโดยการแผ่รังสีความร้อน อัตราการการแผ่ความร้อนจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างไฟผิวดินกับเรือนยอดเป็นหลัก การพาความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อไฟผิวดินลุกลามเข้าใกล้ต้นไม้ ทำให้ควันไฟสามารถพาความร้อนจากการเผาไหม้ไปถ่ายเทความร้อนให้แก่เรือนยอด การพาความร้อนถือเป็นกลไกสำคัญในการติดไฟของเรือนยอด [1, 16-21] โดยหากอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการพาและการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้น โอกาสในการเกิดไฟเรือนยอดจะเพิ่ม

คุณสมบัติของเรือนยอด หมายถึง ความหนาแน่นของเรือนยอด ความสูงของฐานเรือนยอด และความชื้นของอนุภาคเชื้อเพลิง มีผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดไฟเรือนยอด [1, 18, 22-26] ความหนาแน่นของเรือนยอด คือ น้ำหนักของใบไม้และกิ่งไม้ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า 3 มิลลิเมตรต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตร [18, 22, 27, 28] และมีผลโดยตรงต่อความเร็วของอากาศร้อนที่ไหลผ่านเรือนยอด มีผลต่อการสะสมความร้อนและอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลในเรือนยอด [29] และมีผลต่อความทึบแสง (Optical opacity) ซึ่งมีผลต่อการรับการแผ่รังสีความร้อนจากไฟผิวดิน [17, 25, 30] ความหนาแน่นของเรือนยอดจึงถือเป็นคุณสมบัติสำคัญที่มีผลต่อการเกิดไฟเรือนยอด [31-34] รวมถึงการลุกลามของไฟเรือนยอด [23] ความสูงของฐานเรือนยอด คือ ระยะในแนวดิ่งระหว่างผิวด้านบนของเชื้อเพลิงผิวดินกับขอบด้านล่างของเรือนยอด โดยเรือนยอดจะหมายถึงส่วนที่มีความหนาแน่นเกิน 0.011

กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [23, 35] หากความสูงของฐานเรือนยอดลดลง อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ฐานเรือนยอดจะสูงขึ้นทำให้โอกาสในการติดไฟสูงขึ้น [33, 36-39]

เมื่อเรือนยอดติดไฟแล้ว ความร้อนจากการเผาไหม้จะถ่ายเทย้อนกลับสู่เนื้อไม้เพื่อให้กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นต่อ และทำให้การเผาไหม้สามารถเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ หากการเผาไหม้ให้ความร้อนได้ลดลง อัตราการไพโรไลซิสจะลดลง ก๊าซเผาไหม้ก็จะมีปริมาณลดลง ทำให้อัตราการเผาไหม้ลดลงด้วย ในทางตรงข้าม หากการเผาไหม้ให้ความร้อนได้มากขึ้น ก็จะเร่งอัตราการไพโรไลซิส ก๊าซเผาไหม้ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย เรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับเชื้อเพลิง (Fire-fuel interaction) [40] ในขณะเดียวกัน การเผาไหม้ทำให้อากาศร้อนลอยตัวขึ้นด้านบนและทำให้อากาศถูกดูดเข้าสู่ด้านข้างของไฟ ทำให้ความเร็วของอากาศร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสู่เชื้อเพลิงสูงขึ้น และทำให้อัตราการเผาไหม้สูงขึ้นตาม โดยความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเชื้อเพลิงไม่สามารถป้อนก๊าซเผาไหม้ได้ทัน อัตราการเผาไหม้จะลดลง และทำให้กระแสลมลดความเร็วลงตาม เรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับอากาศ (Fire-atmosphere interaction) [40]

เนื่องจากการทดลองการเกิดไฟเรือนยอดในป่าทำได้ยากและอันตราย แบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอดจึงถูกพัฒนาเพื่อจำลองหาสภาวะที่ทำให้เกิดไฟเรือนยอดได้ โดยสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นสองประเภท คือ แบบจำลองกึ่งกายภาพ (Semi-empirical model) และแบบจำลองกายภาพ (Physical model)

2. แบบจำลองกึ่งกายภาพ

แบบจำลองกึ่งกายภาพ (Semi-empirical model) สำหรับการเกิดไฟเรือนยอดโดยส่วนใหญ่ได้ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นแบบจำลองย่อย (Sub model) ร่วมกับแบบจำลองหลักที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมของไฟป่าเพื่อวางแผนป้องกันไฟป่าสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น BEHAVE [41] FARSITE [28] และ NEXUS [42]

แบบจำลองกึ่งกายภาพนี้จะคำนวณการเกิดไฟเรือนยอดจากค่าอัตราการลุกลามของไฟผิวดินที่คำนวณได้จากแบบจำลองหลักโดยอาศัยทฤษฎีการพาความร้อนในการสร้างสมการเพื่อทำนายโอกาสในการเกิดไฟเรือนยอด สมการดังกล่าวจะมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลองในการปรับแก้เพื่อให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริง โดยผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับเชื้อเพลิงและปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับอากาศได้ถูกรวมไว้ในสมการด้วยเช่นกัน โดยแบบจำลองกึ่งกายภาพที่มีใช้ในปัจจุบันมีดังนี้

2.1 แบบจำลองของ Van Wagner (1977)

Van Wagner (1977) [18] ใช้สมมุติฐานว่าความร้อนจากไฟผิวดินจะทำให้ความชื้นในเชื้อเพลิงเรือนยอดระเหยออกหมดและทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟ จึงสมมุติให้ไฟเรือนยอดจะติดได้เมื่อความรุนแรงของไฟผิวดินมีค่ามากกว่าความรุนแรงวิกฤติซึ่งเป็นความรุนแรงของไฟผิวดินที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เรือนยอดที่อยู่ด้านบนติดไฟ และได้ใช้ทฤษฎีการพาความร้อน (Convective theory) ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเรือนยอดกับความรุนแรงของไฟผิวดินวิกฤตินี้ [18]

$$I_0 = (0.01 \cdot Z_c \cdot Q_c)^{1.5} \quad (2)$$

$$Q_{ig,l} = 460 + 25.9m_l \quad (3)$$

โดยความรุนแรงของไฟผิวดินสามารถคำนวณได้จากสมการของ Byram [43] ซึ่งใช้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงผิวดิน ในการคำนวณดังนี้ [43]

$$I_s = H \cdot w \cdot ROS \quad (4)$$

แบบจำลองของ Van Wagner [18] ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหน่วยงานไฟป่าของสหรัฐอเมริกาในปัจจุบัน [23, 44, 45] แม้ว่าแบบจำลองนี้มีข้อจำกัดหลายอย่าง แต่ก็ให้ผลที่แม่นยำเพียงพอต่อการวางแผนป้องกันไฟป่าสำหรับป่าโดยส่วนใหญ่ได้ [1, 23]

2.2 แบบจำลองของ Xanthopoulos (1990)

Xanthopolos (1990) [16] ได้ใช้สมมุติฐานว่า อนุภาคเชื้อเพลิงจะติดไฟเมื่อได้รับความร้อนสุทธิมากพอ และมีอุณหภูมิสูงพอที่จะติดไฟได้ โดยอนุภาคของเชื้อเพลิงที่อยู่ด้านล่างสุดของเรือนยอดจะติดไฟก่อนแล้ว ลูกกลมขึ้นสู่ด้านบน และได้สมการหาระยะเวลาที่อนุภาคเชื้อเพลิงใช้ในการติดไฟเมื่อได้รับความร้อนจากควันไฟที่อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วง x วินาที ดังนี้ [16]

$$t_x = a_1 \exp(a_2 T_x + a_3 m_l) \quad (5)$$

$$T_x = b_0 + b_1 \left(\frac{I_R}{Z_c} \right) + b_2 \left(\frac{W}{Z_c} \right) + b_3 \phi_w + b_4 U^2 \quad (6)$$

โดยหาก t_x มีค่าน้อยกว่า x อนุภาคของเชื้อเพลิงก็จะติดไฟ ทั้งนี้ Xanthopolos (1990) [16] ได้กำหนดให้ x/t_x เป็นคะแนนของการติดไฟ (Ignition score) และใช้ผลรวมของคะแนนจาก x ทั้งหมด 10 ค่า คือ 0.2, 2, 5, 10, 15, ..., 40 วินาที เป็นตัวตัดสินว่าไฟเรือนยอดจะติดไฟหรือไม่ ดังนี้ [16]

$$\text{Ignition score} = \left(\frac{0.5}{t_{0.5}} + \frac{2-0.5}{t_2} + \frac{5-2}{t_5} + \dots + \frac{40-35}{t_{40}} \right) \times 100 \quad (7)$$

ไฟเรือนยอดจะเกิดขึ้นเมื่อคะแนนการติดไฟมากกว่าคะแนนขั้นต่ำที่ใช้ในการติดไฟสำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงประเภทนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น กิ่งไม้ทั้งหมดที่ใช้การทดลองของ Xanthopolos (1990) [16] จะติดไฟก็ต่อเมื่อคะแนนการติดไฟมีค่ามากกว่า 22 และกิ่งไม้ทั้งหมดจะไม่ติดไฟถ้าคะแนนการติดไฟต่ำกว่า 15

2.3 แบบจำลองของ Alexander (1998)

Alexander (1998) [1] พัฒนาต่อจาก Van Wagner (1977) [18] และ Xanthopolos [16] โดยกำหนดให้เชื้อเพลิงจะติดไฟเมื่อได้รับความร้อนสุทธิมากพอและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะติดไฟได้ และได้รวมผลของระยะเวลาที่ใช้ในการติดไฟจากแบบจำลองของ Xanthopolos (1990) [16] มุมเอียงของไฟจากสมการของ Taylor (1961) [46] และ Thomas (1964) [47] และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผิวดินไว้ในการคำนวณ และได้สมการหา

ระยะเวลาที่ทำให้ยอดไม้ติดไฟเมื่อได้รับความร้อนจากควันไฟที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ [1]

$$t_{ig} = 291.917 \exp(-0.00664 T_c + 0.00729 m_l) \quad (8)$$

$$T_c = T_o + \Delta T \quad (9)$$

$$\Delta T = \frac{k_p I_s \sin A_p}{Z_o} \quad (10)$$

$$Z_{cx} = Z_c \sin(90 - \theta) \quad (11)$$

$$A_p = \tan^{-1} \left(0.209 \left(\frac{I_s}{U_s^3} \right)^{0.286} \right) \quad (12)$$

ไฟเรือนยอดจะเกิดเมื่ออุณหภูมิของควันไฟ (T_c) มีค่ามากกว่า 400 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาที่ไฟผิวดินให้ความร้อนมากกว่าระยะเวลาที่ทำให้เรือนยอดติดไฟ (t_{ig})

2.4 แบบจำลองของ Scott and Reinhardt (2001)

Scott and Reinhardt (2001) [23] ใช้สมมุติฐานเดียวกับ Van Wagner [18] โดยไฟเรือนยอดจะติดไฟเมื่อความรุนแรงของไฟผิวดินมีค่ามากกว่าความรุนแรงวิกฤติ จึงแปลงความรุนแรงวิกฤติในสมการของ Van Wagner [18] ให้เป็นอัตราการลูกกลมวิกฤติ ซึ่งก็คืออัตราการลูกกลมของไฟผิวดินที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดไฟเรือนยอดดังนี้ [23, 48]

$$ROS_0 = \frac{I_0}{H_A} \quad (13)$$

$$H_A = 60 \cdot I_R \cdot t_r \quad (14)$$

จากนั้น Scott and Reinhardt [23] ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับอัตราการลูกกลมของไฟผิวดินตามสมการของ Rothermel [7] เพื่อหาค่าความเร็วลมวิกฤติ เรียกว่า “Torching index” ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมที่ระดับความสูง 6.1 เมตรจากยอดไม้ที่ทำให้ไฟผิวดินมีความรุนแรงสูงพอที่จะทำให้เกิดไฟเรือนยอดได้ดังนี้ [23]

$$TI = U = \left(\frac{0.278}{54.683U_R} \right) \times \left(\frac{\frac{60I_0\rho_b\varepsilon Q_{ig}}{(H_A/60)\xi I_R} - \phi_{sl} - 1}{C\left(\frac{\beta}{\beta_{op}}\right)^{-E}} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (15)$$

2.5 แบบจำลองของ Cruz et al. (2006)

Cruz et al. (2006) [2] ใช้สมมุติฐานว่าได้อิฐสมมุติฐานว่า อนุภาคเชื้อเพลิงจะติดไฟเมื่อมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิติดไฟ และได้ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer theory) ในการสร้าง Crown Fuel Ignition Model (CFIM) โดยกำหนดให้ไฟผิวเป็นให้ความร้อน เรือนยอดของต้นไม้ซึ่งเป็นแหล่งรับความร้อน และความร้อนจะถ่ายเทจากไฟผิวดินสู่เรือนยอดโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทำให้อุณหภูมิของอนุภาคเชื้อเพลิงที่เรือนยอดสูงขึ้นตามสมการสมดุลพลังงานดังนี้

$$\rho_f \cdot V \cdot c_{p,f} \frac{dT_f}{dt} = h_c \cdot A_f \cdot (T_g - T_s) + I_{12} \cdot \frac{A_f}{2} - F_{23} \cdot A_f \cdot \sigma_s \cdot (T_f^4 - T_a^4) \quad (16)$$

ไฟเรือนยอดจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอนุภาคเชื้อเพลิงที่ฐานของเรือนยอดมีค่ามากกว่าอุณหภูมิติดไฟที่ 600 องศาเซลเซียส

3. แบบจำลองกายภาพ

แบบจำลองกายภาพ (Physical model) สำหรับการเกิดไฟเรือนยอดถูกออกแบบมาเพื่อใช้ศึกษารายละเอียดของกระบวนการเกิดไฟเรือนยอดเพื่อประยุกต์ใช้กับกรณีที่เชื้อเพลิงสภาพพื้นที่หรือสภาพอากาศมีความซับซ้อน เช่น ไฟที่เกิดบนหน้าผาหรือในร่องเขา ซึ่งไฟจะทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นมากจนเป็นสภาวะที่ลมมีผลต่อการเกิดไฟเรือนยอดมากกว่าเชื้อเพลิง [49] ปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาและมีอิทธิพลต่อ

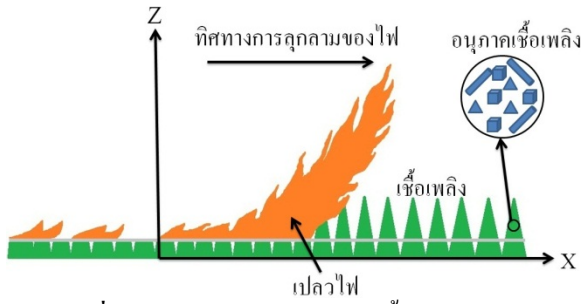
พฤติกรรมของไฟมาก ทำให้ผลการคำนวณแบบจำลองทั้งกายภาพคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

ในการคำนวณแบบจำลองจะใช้ค่าคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ เช่น คุณสมบัติของเชื้อเพลิง สภาพอากาศ และสภาพพื้นที่ ในแง่สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล พลังงาน โมเมนตัม และสัดส่วนโดยมวลของสาร เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของของไหล [50-52] ทำให้สามารถรวมปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับเชื้อเพลิงและปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฟกับอากาศไว้ในกระบวนการคำนวณ [40] อีกทั้งยังสามารถคำนวณกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นอย่างอิสระทำให้สามารถแสดงรายละเอียดของกระบวนการที่เกิดขึ้นได้มากกว่า

แบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอดในปัจจุบันมีพื้นฐานการคำนวณมาจากแบบจำลองไฟผิวดินแบบ Multiphase ของ Grishin (1985) [53] ซึ่งสมมุติให้ตัวกลางมีทั้งส่วนที่เป็นก๊าซและของแข็ง (เชื้อเพลิง) อยู่ด้วยกัน แล้วแก้สมการควบคุมการไหลแบบสองมิติด้วยวิธี Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) โดยในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) ได้ใช้ k-ε turbulence model ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายรวมถึงแบบจำลองของ Grishin 1996 [54] และ Zhou and Pereira (2000) [55] การคำนวณการแผ่รังสีความร้อน (Radiation model) จะใช้วิธี P1-approximation โดยสมมุติให้ไฟผิวดินเป็นแผ่นร้อนที่แผ่รังสีความร้อนสู่เชื้อเพลิงข้างหน้า วิธีการนี้ใช้อย่างแพร่หลายในช่วงเวลานั้น เช่น แบบจำลองของ Larini (1998) [56], Porterie (1998) [57], และ Grishin and Perminov (1998) [58] ในส่วนของก๊าซจะสมมุติให้มีเฉพาะก๊าซ O₂ และ CO (ก๊าซไพโรไลซิส) การคำนวณการเผาไหม้ (Combustion model) ได้สมมุติให้เป็น Single one step reaction โดยกำหนดให้อัตราการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับปริมาณ O₂ โดยในแบบจำลองนี้ยังไม่คิดการเกิดเขม่า (Soot formation) ทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้ในชั้นเชื้อเพลิงจะถ่ายเทสู่อนุภาคเชื้อเพลิงโดยการ

พาความร้อนเพียงอย่างเดียว ในส่วนของแข็งได้กำหนดให้ มีอนุภาคเชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียว มีลักษณะเป็นรูพรุนเนื้อเดียว (Homogeneous porous medium) ซึ่งความชื้นจะระเหยออกและเกิดกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นเมื่อได้รับความร้อน

หลังจากนั้น แบบจำลองหลายอัน [52, 56, 57, 59] ได้สมมติให้ในชั้นเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงมีอนุภาคเชื้อเพลิงหลายชนิดอยู่รวมกัน (Heterogeneous combustible media) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิง [56]

โดยกำหนดให้ในหนึ่งหน่วยปริมาตรของเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยก๊าซและอนุภาคเชื้อเพลิง N ชนิดอยู่รวมกัน ดังนี้ [56]

$$\alpha_g + \sum_{k=1}^N \alpha_k = 1 \quad (17)$$

และอัตราการระเหยของความชื้น การไพโรไลซิส และการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ของถ่าน (Char combustion) จะขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการความสัมพัทธ์ของอาร์เรเนียส (First-order Arrhenius kinetics) เช่น ในแบบจำลองของ Porterie et al. (1998) [57] ดังนี้

$$R_{k,H_2O} = m_{k,H_2O} \frac{A_{0,H_2O}}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_{A,H_2O}}{T_k}\right) \quad (18)$$

$$R_{k,pyr} = m_{k,pyr} A_{0,pyr} \exp\left(-\frac{E_{A,pyr}}{T_k}\right) \quad (19)$$

$$R_{k,char} = \frac{1}{s_1} A_{0,char} \rho_{O_2} \exp\left(-\frac{E_{A,char}}{T_k}\right) \quad (20)$$

โดย Porterie et al. (2003) [60] ได้ปรับปรุงอัตราการเผาไหม้ของถ่านโดยรวมผลของการยกตัวของอากาศใน

ชั้นเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา (Blowing effects) ซึ่งก็คือ $1 + \beta_{char} \sqrt{Re_k}$ ดังนี้ [60]

$$R_{k,char} = \frac{A_{0,char}}{s} \alpha_k \sigma_k \rho_{O_2} (1 + \beta_{char} \sqrt{Re_k}) \times \exp\left(-\frac{E_{A,char}}{T_k}\right) \quad (21)$$

นอกจากนั้น แบบจำลองการเกิดไฟเรื้อนยอดได้ถูกพัฒนารายละเอียดในส่วนต่างๆ เพื่อให้สามารถจำลองกระบวนการได้แม่นยำขึ้น เช่น การคำนวณของการไหลแบบปั่นป่วน การเผาไหม้แบบปั่นป่วน การแผ่รังสีความร้อน และการเกิดเขม่า [51, 55-57, 60-63] ดังนี้

3.1 การคำนวณการไหลแบบปั่นป่วน

Porterie et al. (2000) [52] ได้ประยุกต์ใช้วิธี Renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$ turbulence model กับแก้สมการควบคุมการไหลแบบสองมิติด้วยวิธี RANS ซึ่งให้ผลแม่นยำกว่า Standard $k-\varepsilon$ turbulence model โดยการลดค่าผันแปร (Fluctuation) ของการไหลด้วยวิธี Favre averaging method ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (23)$$

$$+ P_k + W_k - \bar{\rho}\varepsilon$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 3} W_k)$$

$$- R P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\text{โดย } P_k = -\overline{\rho u_j'' u_i''} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \text{ และ } W_k = -\frac{\mu_t}{\bar{\rho}^2} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j}$$

หลังจากนั้น Zhou et al. (2007) [55] ได้ประยุกต์ใช้วิธี Large Eddy Simulation (LES) กับสมการควบคุมการไหลแบบสามมิติ โดยใช้ Smagorinsky model [64] ในการคำนวณการไหลปั่นป่วน เพื่อจำลองกระบวนการได้แม่นยำขึ้นและสามารถแสดงรายละเอียดของการไหลได้มากขึ้น ดังนี้

$$-\rho(u_i u_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -2C_R \Delta^2 \bar{\rho} \sqrt{\Pi} \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} \right) + \frac{2}{3} C_I \Delta^2 \rho \Pi \delta_{ij} \quad (24)$$

$$-\bar{\rho}(u_j h - \tilde{u}_j \tilde{h}) = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \tilde{c}_p \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \quad (25)$$

$$-\bar{\rho}(u_j Y_K - \tilde{u}_j \tilde{Y}_K) = -\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{Y}_K}{\partial x_j} \quad (26)$$

โดย

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (27)$$

$$\mu_{s,t} = C_R \Delta^2 \bar{\rho} \sqrt{\Pi} \quad (28)$$

$$\Pi = \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij} \quad (29)$$

3.2 การคำนวณการเผาไหม้แบบป็นป่วน

Porterie et al. (2000) [52] รวมถึง Zhou and Pereira (2000) [55] ได้ประยุกต์ใช้ Eddy dissipation concept [65] โดยสมมติให้อัตราการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับ Turbulence dissipation rate ที่ต่ำที่สุดของก๊าซ การเผาไหม้เป็น Single one step reaction ตามสมการ $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของก๊าซต่างๆดังนี้ [52]

$$\overline{\dot{\omega}_{\text{CO}}} = -A \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\tilde{Y}_{\text{CO}}, \frac{\tilde{Y}_{\text{O}}}{s}, \frac{B \tilde{Y}_{\text{CO}_2}}{1+s} \right) \quad (30)$$

$$\overline{\dot{\omega}_{\text{O}_2}} = s \overline{\dot{\omega}_{\text{CO}}} \quad (31)$$

$$\overline{\dot{\omega}_{\text{CO}_2}} = -(1+s) \overline{\dot{\omega}_{\text{CO}}} \quad (32)$$

เนื่องจากการเผาไหม้จะเกิดขึ้นที่ชั้นบางๆบริเวณผิวของเปลวไฟ ซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดเล็กกว่ากริดที่ใช้ในการคำนวณมาก ดังนั้น Zhou et al. (2007) [55] ได้ประยุกต์ใช้การคำนวณการเผาไหม้แบบ Flame Surface Density (FSD) [66] เพื่อสามารถคำนวณอัตราการเผาไหม้ได้แม่นยำขึ้น ดังนี้

$$\overline{\dot{\omega}_k} = \dot{m}_k \bar{\Sigma} \quad (33)$$

โดย Flame surface density ($\bar{\Sigma}$) คือผลคูณของค่าเฉลี่ย Passive scalar gradient (Z_{st}) บริเวณพื้นผิวที่เผาไหม้ กับ ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (P_L) ดังนี้

$$\bar{\Sigma} = \left| \overline{\nabla Z} \right|_{st} P_L \quad (34)$$

3.3 การแผ่รังสีความร้อน

Grishin and Perminov (1998) [17] ได้สมมติให้ก๊าซไม่โปร่งแสง (Grey gas) ทำให้ก๊าซสามารถดูดซับความร้อนของเขม่าได้ ดังนั้น การแผ่รังสีความร้อนจึงคำนวณโดยวิธี P₁ Spherical Harmonic Approximation หลังจากนั้น แบบจำลองโดยส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนมาใช้วิธี Discrete Ordinates (DO) กับ Grey gas เช่น แบบจำลองของ Porterie et al. (2000) [52], Zhou and Pereira (2000) [55], และ Zhou et al. (2007) [55] ซึ่งมีสมการดังนี้ [52]

$$Q_{rad,g} = \alpha_g a_g (G - 4\sigma T^4) \quad (35)$$

โดย G คือ ความเข้มเฉลี่ยของรังสีความร้อนซึ่งหาได้จาก

$$G = \int_{4\pi} I(\vec{\Omega}) d\Omega \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \mu_m \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_g I_m) + \xi_m \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_g I_m) \\ = \alpha_g a_g \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right) + \sum_{k=1}^N \alpha_k a_k \left(\frac{\sigma T_k^4}{\pi} - I \right) \end{aligned} \quad (37)$$

โดย Kaplan et al. (1996) [67] พบว่าค่าดูดกลืนของก๊าซ CO₂ ผสมกับ H₂O มีค่าเท่ากับ

$$a_g = 0.1 (X_{\text{CO}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}}) + 1862 f_v T \quad (38)$$

และแผ่รังสีความร้อนสำหรับของแข็งหาได้ดังนี้

$$Q_{rad,k} = \alpha_k a_k (G - 4\sigma T_k^4) \quad (39)$$

3.4 การเกิดเขม่า

Grishin and Perminov (1998) [17] ได้สมมติให้อัตราการเกิดเขม่าขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดก๊าซไพโรไลซิสเพียงอย่างเดียว จึงได้ใช้สมการดังนี้ [17]

$$R_{soot} = \alpha R_{pyr} \quad (40)$$

เนื่องจากการเกิดเขม่าจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญสองอย่างคือ ปริมาตรโดยมวลของเขม่าและความหนาแน่นของอนุภาคเขม่า แต่ข้อมูลความหนาแน่นของอนุภาคเขม่าจากการเผาไหม้ของไม้ยังมีไม่เพียงพอ ดังนั้น Porterie et al. (2000) [52] ได้พัฒนาต่อโดยสมมติให้อัตราการเกิดเขม่าขึ้นอยู่กับปริมาตรโดยมวลของเขม่า ($\tilde{f}_v$) แทนอัตราการไพโรไลซิส ดังนี้ [52]

$$\overline{\dot{\omega}_{fv}} = \frac{\bar{\rho}}{\rho_{soot}} \left(\alpha_6 \sum_{k=1}^N \dot{m}_k^{pyr} - \frac{6\bar{f}_v}{d_{soot}} W_{NSC} \right) \quad (41)$$

4. สรุป

แบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอดเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นในการจัดการไฟป่า การคาดการณ์ที่แม่นยำจะช่วยทำให้การป้องกันไฟป่าและดับไฟป่ามีประสิทธิภาพซึ่งจะช่วยลดโอกาสการเกิดไฟป่าที่มีความรุนแรงสูงและการ “blow ups” ได้มาก บทความนี้เป็นารรวบรวมแบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอด ทั้งแบบกึ่งกายภาพซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้วางแผนป้องกันไฟป่าสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยใช้ความรู้เรื่องทางเทอร์โมไดนามิกส์ใน

การคำนวณพลังงานความร้อนที่เรือนยอดได้รับเพื่อทำนายถึงโอกาสในการเกิดไฟเรือนยอด กับแบบจำลองกายภาพซึ่งใช้ความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลศาสตร์ของไหล และการเผาไหม้เข้ามาอธิบายกลไกการเกิดไฟเรือนยอด ได้แก่ การไหลแบบปั่นป่วน การเผาไหม้ การแผ่รังสีความร้อน และการเกิดเขม่า โดยสมการที่นำมารวบรวมอยู่ในบทความนี้ จะเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองการเกิดไฟเรือนยอดทั้ง และแบบจำลองกายภาพสำหรับศึกษารายละเอียดของกระบวนการเกิดไฟเรือนยอด รวมถึงใช้ศึกษาการเกิดไฟเรือนยอดในสภาพพื้นที่หรือสภาพอากาศมีความซับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alexander, M.E. (1998). Crown fire thresholds in exotic pine plantations of Australia, *Ph.D. Thesis*, Australian National University, Canberra, Australia.
- [2] Cruz, M.G., B.W. Butler, M.E. Alexander, J.M. Forthofer, and R.H. Wakimoto. (2006). Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire Part I: model idealization. *International Journal of Wildland Fire*, 15(1), 47-60.
- [3] Cheney, N. (1981). Fire behavior, *Australian Academy of Science*, Sydney.
- [4] Vines, R.G. (1981). Physics and chemistry of rural fires. In *'Fire and the Australian biota'*. (Eds A.M. Gill, R.H. Groves. and I.R. Noble), 129-150.
- [5] White, R.H. and M.A. Dietsberger. Wood Products: Thermal Degradation and Fire. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 9712-9716.
- [6] Di Blasi, C. (1993). Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 19, 71-104.
- [7] Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, *Intermountain Research Station*, Research Paper, INT-115, Ogden, Utah, USA.
- [8] Pyne, S., P.L. Andrews, and R.D. Laven. (1996). Introduction to wildland fire. *John Wiley & Sons*, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore. , 769 p.
- [9] Chandler, G., P. Cheney, P. Thomas, L. Trabaud, and D. Williams. (1983). *Fire in Forestry*. Volume I. John Wiley & Sons, New York. , 450 p.
- [10] Viegas, D.X. (1998). Forest fire propagation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 356, 2907-2928.
- [11] Fosberg, M.A., J.W. Lancaster, and M.J. Schroeder. (1970). Fuel moisture response - drying relationships under standard and field conditions. *Forest Science*, 16, 121-128.
- [12] Nelson, R.J. (2001). Water relations of forest fuels. In: *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*, K. Johnson E.A. and Miyanishi, ed., Academic Press, San Francisco, CA (2001), 79-143.
- [13] Van Wagner, C.E. (1979). "A laboratory study of weather effects on the drying rate of jack pine litter." *Canadian Journal of Forest Research*, 9(2), 267-275.
- [14] Van Wagner, C.E. (1982). "Initial moisture content and the exponential drying process." *Canadian Journal of Forest Research*, 12, 90-92.
- [15] Countryman, C.M. (1972). "The fire environment concept." USDA Forest Service: Berkely, CA.
- [16] Xanthopoulos, G. (1990). "Development of a wildland crown fire initiation model," Dissertation, University of Montana, Missoula, MT.
- [17] Grishin, A. and V. Perminov. (1998). "Mathematical Modeling of the Ignition of Tree Crowns." *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 34(4).
- [18] Van Wagner, C.E. (1977). "Conditions for the start and spread of crown fire." *Canadian Journal of Forest Research*, 7, 23-34.

- [19] Butler, B.W., J. Cohen, D.J. Latham, R.D. Schuette, P. Sopko, K.S. Shannon, D. Jimenez, and L.S. Bradshaw. (2004). "Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires." *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 1577-1587.
- [20] Butler, B.W., M.A. Finney, P.L. Andrews, and F.A. Albini. (2004). "A radiation-driven model for crown fire spread." *Canadian J. Forest Res.*, 34, 1588-1599.
- [21] Dickinson, M.B. and E.A. Johnson. (2001). "Fire effects on trees." In 'Forest fires, behavior and ecological effects'. (Eds EA Johnson, K Miyanishi), 477-525 (Academic Press: San Diego, CA).
- [22] Alexander, M.E. (1988). "Help with making crown fire hazard assessments. In Protecting People and Homes from Wildfire in the Interior West: Proceedings of the symposium and workshop." *Proceedings of the symposium and workshop, USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-251.*, 147-153.
- [23] Scott, J.H. and E.D. Reinhardt. (2001). "Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior." *USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado.*
- [24] Albini, F.A. (1996). "Iterative solution of the radiation transport equations governing spread of fire in wildland fuel." *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 32(5), 534-543.
- [25] Cruz, M.G., M.E. Alexander, and R.H. Wakimoto. (2004). "Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands." *Forest Science*, 50, 640-658.
- [26] Keane, R.E., J. Garner, K. Schmidt, D. Long, J. Menakis, and M.A. Finney. (1998). "Development of input data layers for the FARSITE fire growth model for the Selway-Bitterroot Wilderness complex." *USDA forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report, RMRS_GTR-3, Ogden, UT.* 66 pp.
- [27] Keane, R.E., E.D. Reinhardt, J. Scott, K. Gray, and J. Reardon. (2005). "Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods." *Canadian Journal of Forest Research*, 35, 724-739.
- [28] Finney, M.A. (1998). *FARSITE users guide and technical documentation*, USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4.
- [29] Cruz, M.G., M.E. Alexander, and R.H. Wakimoto. (2003). "Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America." *International Journal of Wildland Fire*, 12, 39-50.
- [30] Albini, F.A. and B.J. Stocks. (1986). "Predicted and observed rates of spread of crown fires in immature jack pine." *Combustion Science and Technology* 48, 65-76.
- [31] Agee, J., B. Bahro, M.A. Finney, P. Omi, D. Sapsis, C. Skinner, J. van Wagtenonk, and C. Weatherspoon. (2000). "The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management " *Forest Ecology and Management*, 127, 55-66.
- [32] Johnson, K., J. Sessions, J. Franklin, and J. Gabriel. (1998). "Integrating wildfire into strategic planning for Sierra Nevada forests." *Journal of Forestry*, 96(1), 42-49.
- [33] Stephens, S. (1998). "Evaluation of the effects of silvicultural and fuels treatment on potential fire behavior in Sierra Nevada mixed conifer forests." *Forest Ecology and Management*, 105, 21-65.
- [34] Fule, P., A. Waltz, W. Covington, and T. Heinlein. (2001). "Measuring forest restoration effectiveness in reducing hazardous fuels." *Journal of Forestry*, 99(11), 24-29.
- [35] Andersen, H.-E., R.J. McGaughey, and S.E. Reutebuch. (2005). "Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data." *Remote Sensing of Environment*, 94, 441-449.
- [36] Mercer, G. and R. Weber. (1994). "Plumes above line fires in a cross wind." *International Journal of Wildland Fire*, 4, 201-207.
- [37] Deeming, J. (1990). "Effects of prescribed fire on wildfire occurrence and severity." In 'Natural and Prescribed Fire in Pacific Northwest Forests', (Eds JD Walstad, SR Radesevich, DV Sandberg), 95-104 (Oregon State University Press: Corvallis, OR).
- [38] Covington, W., P. Fule, S. Hart, and R. Weaver. (2001). "Modeling ecological restoration effects on ponderosa pine forest structure." *Restoration Ecology*, 9, 421-431.
- [39] Brose, P. and D. Wade. (2002). "Potential fire behavior in pine flatwood forests following three different fuel reduction techniques." *Forest Ecology and Management*, 163, 71-84.
- [40] Mell, W., M.A. Jenkins, J. Gould, and P. Cheney. (2007). "A physics-based approach to modelling grassland fires." *International Journal of Wildland Fire*, 16, 1-22.
- [41] Burgan, R.E. and R.C. Rothermel. (1984). "BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system." *U.S.D.A. Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-167, Ogden, UT.*
- [42] Scott, J.H. (1999). "NEXUS: A system for assessing crown fire hazard." *Fire Management Notes*, 59(20-24).

- [43] Byram, G.M. (1959). "Combustion of forest fuels." In: Forest fire: control and use, K.P. Davis, ed., McGraw-Hill: New York, 61-89.
- [44] Pastor, E., L. Zarate, E. Planas, and J. Arnaldos. (2003). "Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior." *Progress in Energy and Combustion Science* 29, 139-153.
- [45] Finney, M.A. (2004). "FARSITE: Fire area simulator - model development and evaluation." USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research Paper RMRS-RP-4.
- [46] Taylor, G.I. (1961). "Fire under influence of natural convection." In: The use of Models in Fire Research, W.G. Berl, ed., National Academy of Science - National Research Council Publication, Washington, D.C., 10-32.
- [47] Thomas, P.H. (1964). "The effect of wind on plumes from a line heat source." Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices, Committee Joint Fire Research Organization, Fire Research Note Number 572, Boreham Wood, England, 36.
- [48] Andrews, P.L. and R.C. Rothermel. (1982). "Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics." USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station, General Technical Report, INT-131, Ogden, Utah, USA.
- [49] Bessie, W.C. and J. E.A. (1995). "The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests." *Ecology*, 76(747-763).
- [50] Linn, R., J. Reisner, J. Colman, and J. Winterkamp. (2002). "Studying wildfire using FIRETEC." *International Journal of Wildland Fires* 11, 1-14.
- [51] Morvan, D. and J.L. Dupuy. (2001). "Modeling fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation." *Combustion and Flame*, 127, 1981-1984.
- [52] Porterie, B., D. Morvan, J.C. Loraud, and M. Larini. (2000). "Firespread through fuel beds: Modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics." *Physics Fluids*, 12(7), 1762-1782.
- [53] Grishin, A., A. Gruzin, and V. Zverev. (1985). "Study of the Structure and Limits of Propagation of the Front of an Upstream Forest Fire." *Fizika Goreniya i Vzryva*, 21(9).
- [54] Grishin, A. (1996). "General mathematical model for forest fires and its applications." *Combust. Expl. Shock Waves*, 32, 503-519.
- [55] Zhou, X. and J. Pereira. (2000). "A multidimensional model for simulating vegetation fire spread using a porous media sub-model." *Fire and Materials*, 24, 37-43.
- [56] Larini, M., F. Giroud, B. Porterie, and J.-C. Loraud. (1998). "A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media." *International Journal of Heat Mass transfer*, 41(6-7), 881-897.
- [57] Porterie, B., D. Morvan, M. Larini, and J.C. Loraud. (1998). "Wildfire Propagation: A Two-Dimensional Multiphase Approach." *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 34(2).
- [58] Perminov, V. (Year). "Mathematical modeling of crown forest fire initiation." in *Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research*, Luso, Portugal, 419-431.
- [59] Zhou, X., S. Mahalingam, and D.R. Weise. (2007). "Experimental Study and Large Eddy Simulation of Effect of Terrain Slope on Marginal Burning in Shrub Fuel Beds." *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 2547-2555.
- [60] Porterie, B., J.C. Loraud, L.O. Bellemare, and J.L. Consalvi. (2003). "A physically based model of the onset of crowning." *Combustion Science and Technology*, 175(6), 1109-1141.
- [61] Morvan, D. (2007). "A numerical study of flame geometry and potential for crown fire initiation for a wildfire propagating through shrub fuel." *International Journal of Wildland Fires*, 16, 511-518.
- [62] Morvan, D. and J.L. Dupuy. (2004). "Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation." *Combustion and Flame*, 138, 199-210.
- [63] Zhou, X., S. Mahalingam, and D.R. Weise. (2005). "Modeling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed." *Combustion and Flame*, 143, 183-198.
- [64] Smagorinsky, J. (1963). "General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment." *Mon. Weather Rev.* 91, 99.
- [65] Culis, C.F., M.M. Hirschler, R.P. Townsend, and V. Visanuvimol. (1983). "The pyrolysis of cellulose under conditions of rapid heating." *Combustion and Flame*, 49(1-3), 235-248.
- [66] Zhou, X. and S. Mahalingam. (2002). "A flame surface density based model for large eddy simulation of turbulent nonpremixed combustion." *Physics of Fluids*, 14(11), 77-80.
- [67] Kaplan, C.R., C.R. Shaddix, and K.C. Smyth. (1996). "Computations of enhanced soot production in time varying CH₄/air diffusion flames." *Combustion and Flame*, 106(392).

Nomenclature

a	ค่าคงที่
A_f	พื้นที่ผิวของเชื้อเพลิง (m^2)
A_0	ค่าคงที่ Pre-exponential constant
A_p	มุมเอียงของไฟ
b	ค่าคงที่
B	ค่าคงที่
c	ความเร็วแสง (m/s)
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ ($kJ/kg.K$)
C	ค่าคงที่
E	ค่าคงที่
E_A	ค่า Activation energy
F_{23}	View factor ระหว่างเชื้อเพลิงกับสิ่งแวดล้อม
h_c	ค่าประสิทธิภาพการพาความร้อน ($W/m^2.K$)
H	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
H_A	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่อพื้นที่ (kJ/m^2)
k_p	Proportionality constant
m	มวล (kg)
m_l	ความชื้นของไบโไม้
R	ค่าคงที่ gas constant
ROS	อัตราการลุกลาม (m/s)
t	เวลา (s)
t_r	เวลาในการให้ความร้อน (s)
t_x	เวลาในการติดไฟของ T_x (s)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
T_x	อุณหภูมิเฉลี่ยช่วง x วินาที ($^{\circ}C$)
ΔT	ความแตกต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
I	ความรุนแรงไฟ (kW/m)
I_R	ความรุนแรงของปฏิกิริยา (kW/m^2)
I_{12}	การแผ่รังสีความร้อนจากไฟสู่เรือนยอด (kW/m^2)
m	มวล (kg)
Q_{ig}	ความร้อนในการติดไฟของไบโไม้ (kJ/kg)
U	ความเร็วลม (m/s)
U_R	ความเข้มของรังสีความร้อน (kW/m^2)

V	ปริมาตร (m^3)
w	น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg/m^2)
Z	ความสูง (m)

Subscripts

0	ค่าวิกฤติ
a	อากาศ
b	bulk
c	ฐานเรือนยอด
cx	Effective crown base height
f	อนุภาคเชื้อเพลิง
g	ก๊าซร้อน
k	อนุภาคเชื้อเพลิงแบบที่ k
l	ไบโไม้
op	optimum
s	ไฟผิวดิน
sl	ความลาดเอียงของพื้นที่
w	ลม
ig	การติดไฟ

Superscripts

$(\cdot)$	อัตรา
$(-)$	Time average
$(\sim)$	Density-weight Favre average
$(")$	Density weight Favre fluctuation

Greek letters

σ_s	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann
ϕ	ค่าสัมประสิทธิ์
θ	ความลาดเอียงของพื้นที่
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ξ	Propagation flux ratio
β	Fuel packing ratio