

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของควันใต้เพดานที่มีคานด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข A Numerical Investigation of Smoke Flow under Beamed Ceiling

ณัฐศักดิ์ บุญมี

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8555 โทรสาร 0-2579-4576 อีเมล fengnab@ku.ac.th

Nathasak BOONMEE

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand,

Tel: 0-2942-8555, Fax: 0-2579-4576, Email: fengnab@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เสนอการจำลองการไหลของควันใต้เพดานเนื่องมาจากเพลิงไหม้ภายในห้องด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข LES (Large Eddy Simulation) โดเมนการคำนวณเป็นห้องเปิดโล่งขนาดใหญ่มีเพดานสูง 3 เมตร กองเพลิงขนาด 100 kW 500 kW และ 1000 kW วางไว้กลางพื้นห้อง การจำลองดำเนินในห้องซึ่งมีคานวางใต้เพดาน (beamed ceiling) ที่มีอัตราส่วนของระยะระหว่างคานต่อความสูงห้อง (W/H) แปรผันในช่วง 0.4 ถึง 1.2 และความหนาของคานต่อความสูงห้อง (h_b/H) แปรผันในช่วง 0.1 ถึง 1.0 (ช่องทางเดิน) เพื่อศึกษาผลกระทบของเพดานและคานต่อพฤติกรรมการไหลของควัน ผลการจำลองอุณหภูมิและความเร็วของควันไหลใต้เพดานได้นำไปเปรียบเทียบกับสมการซึ่งได้จากการทดลองของ Delichatsios [1] พฤติกรรมการไหลของควันถูกอธิบายบนพื้นฐานของทฤษฎีการไหลของควันใต้เพดาน จากการศึกษาพบว่าความหนาของชั้นควันที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 50°C เพิ่มขึ้นจาก 60 เซนติเมตรสำหรับคานกรณี h_b/H เท่ากับ 0.1 และเป็น 1 เมตรสำหรับคานกรณี h_b/H เท่ากับ 1.0 (ช่องทางเดิน)

คำสำคัญ: ควันไหลใต้เพดาน, แบบจำลองเพลิงไหม้

Abstract

This paper presents a Large Eddy Simulation (LES) of smoke flow under beamed ceiling due to fire. The computational domain is a large room with ceiling height of 3 m. Fires with heat release rates of 100 kW, 500 kW, and 1000 kW are placed on the floor center. In order to investigate the effects of beam to smoke flow behavior, the simulations were performed for beamed ceiling where ratios of beam spacing to room height (W/H) ranging from 0.4 to 1.2 and beam depth to room height (h_b/H) ranging from 0.1 to 1.0 (corridor). The confined ceiling jet temperatures and velocities were compared with Delichatsios' empirical correlation [1]. The smoke flow phenomena were discussed based on the ceiling jet theory. The numerical study

showed that the smoke layer thickness increases from 60 cm for the case where h_b/H is equal to 0.1 to 1 m for the case where h_b/H is equal 1.0 (corridor).

Keywords: confined ceiling jet, fire modeling

1. บทนำ

เมื่อเกิดเพลิงไหม้ภายในอาคาร ควันร้อนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ลอยตัวขึ้นไปในแนวดิ่ง เมื่อควันลอยขึ้นไปกระทบเพดาน ควันจะเปลี่ยนทิศการไหลไปในแนวระดับ เราเรียกควันซึ่งไหลใต้เพดานในแนวระดับนี้ว่า ceiling jet ในกรณีที่เกิดเพดานเรียบไม่มีอุปสรรคกีดขวาง ควันสามารถไหลไปในแนวระดับได้อย่างอิสระ ในทางตรงกันข้าม ถ้าเพดานไม่เรียบมีวัตถุกีดขวางเช่น คานซึ่งติดตั้งใต้เพดาน ควันซึ่งไหลได้อย่างอิสระในแนวระดับเมื่อกระทบคานจะเปลี่ยนลักษณะการไหลไปเป็นการไหลในแนวช่อง (channel flow) แทน การศึกษาพฤติกรรมการไหลของควันใต้เพดานเป็นสิ่งจำเป็นในงานวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัยทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับในระบบป้องกันอัคคีภัยเช่น อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟ หรือ หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติ โดยส่วนใหญ่จะติดตั้งใต้เพดาน เวลาในการตอบสนองที่อุปกรณ์ตรวจจับเพลิงไหม้เหล่านี้จะเริ่มทำงานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวอุปกรณ์กับควันใต้เพดาน

Delichatsios [1] ได้ทำการทดลองเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิและความเร็วในการไหลของควันใต้เพดานซึ่งมีคานติดตั้ง ในการทดลอง Delichatsios ได้แปรผันขนาดความหนาของคาน (h_b) และระยะระหว่างคาน (W) ต่อความสูงจากผิวบนของเชื้อเพลิงถึงเพดาน (H) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 1.2 ($0.4 < W/H < 1.2$) บนพื้นฐานของทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่า Froude number สูง Delichatsios ได้เสนอสมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิและความเร็วในการไหลของควันใต้จากการทดลองในรูปของตัวแปรไร้มิติ Alpert [2] ได้ทำการทดลองโดยการเผากองเพลิงซึ่งมีอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนในช่วง 500 kW ถึง 100 MW ใต้เพดานซึ่งมีความสูงในช่วง 4.6 เมตร ถึง 15.5 เมตร ผลการทดลองพบว่าการไหลของควันใต้เพดานที่เรียบไม่มีคาน (flat

ceiling) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงใกล้ลำควัน (near plume) เมื่อความเร็วในการไหลและอุณหภูมิของควันไม่ขึ้นกับระยะห่างจากกองเพลิง และ ช่วงไกลลำควัน (far plume) เมื่อความเร็วในการไหลและอุณหภูมิของควันแปรผกผันกับระยะห่างจากกองเพลิง Bailey และคณะ [3] ได้ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ LES3D จำลองการไหลของควันใต้เพดาน โดยการศึกษาได้มุ่งเน้นเพื่อดูผลกระทบของการกำหนดค่าขอบที่เพดาน (ceiling boundary conditions) ต่อผลการจำลอง

ปัจจุบันการใช้แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD fire modeling) ในการประเมินสภาวะขณะเกิดเพลิงไหม้เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงได้ใช้กันกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับมากขึ้นแบบจำลองที่ใช้ได้มุ่งเน้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลและการกระจายตัวของควันภายในอาคาร ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ณัฐศักดิ์ [4] ได้ใช้แบบจำลอง Fire Dynamics Simulator (FDS) รุ่น 4.0 [5, 6] เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการคำนวณความเร็วและอุณหภูมิของลำควัน โดยขนาดกริดที่เหมาะสมจะต้องสามารถจำลองพฤติกรรมของลำควันได้ถูกต้องและใช้เวลาในการคำนวณไม่มากจนเกินไป ในส่วนของการไหลของควันใต้เพดานเรียบ ณัฐศักดิ์ [7] ใช้แบบจำลอง FDS รุ่น 4.0 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลของควันใต้เพดานอย่างอิสระ (unconfined ceiling jet) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลของควันใต้เพดานที่มีคาน (beamed ceiling) ซึ่งคานจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของการไหลของควัน โดยทำให้ควันไหลไปในแนวช่องระหว่างคานมากกว่าการไหลกระจายในแนวนอน การไหลของควันในลักษณะนี้เรียกว่า ควันไหลใต้เพดานอย่างจำกัด (confined ceiling jet) การจำลองโดยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FDS ดำเนินการในโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ที่มีความสูงของเพดาน (H) เท่ากับ 3 เมตร ระยะห่างระหว่างคานต่อความสูงของเพดาน (W/H) แปรผันในช่วง 0.4 ถึง 1.2 ความหนาของคานต่อความสูงของห้อง (h_b/H) แปรผันในช่วง 0.1 ถึง 1.0 (ช่องทางเดิน) ผลที่ได้จากการคำนวณได้นำไปเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลองของ Delichatsios [1] เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง จากนั้นพฤติกรรมของการไหลของควันได้ถูกอธิบายโดยอาศัยผลการจำลองเชิงตัวเลข

2. ทฤษฎี

2.1 สมการการไหลของควัน

พฤติกรรมของการไหลของควันใต้เพดานสามารถจำลองได้โดยการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) สมการอนุรักษ์มวลย่อย (conservation of species) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ดังแสดงในสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (4)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_i \bar{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} \right) + \nabla p = \rho \bar{g} + \bar{f} + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \bar{u} \\ &= \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \bar{q}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \end{aligned} \quad (4)$$

โดย ρ คือความหนาแน่น $\bar{u}$ คือเวกเตอร์ความเร็ว Y_i คือเศษส่วนโดยมวลของมวลย่อยที่ i $\dot{m}_i'''$ คืออัตราการทำปฏิกิริยาต่อปริมาตรของมวลย่อยที่ i D_i คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลย่อยที่ i p คือความดัน $\bar{f}$ คือแรงภายนอกที่กระทำต่อของไหล, τ คือ viscous stress tensor h คือ เอนทัลปี $\bar{q}_r$ คือฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน T คืออุณหภูมิ

FDS ใช้แบบจำลอง Large Eddy Simulation (LES) ของ Smagorinsky [8] ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนโดยเทอม viscous stress tensor τ เขียนในรูป

$$\tau = \mu_{LES} \left(\text{def } \bar{u} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}) I \right) \quad (5)$$

โดย

$$\mu_{LES} = \rho (C_S \Delta)^2 \left(2(\text{def } \bar{u}) \cdot (\text{def } \bar{u}) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u})^2 \right)^{1/2}$$

เมื่อ

$$\text{def } \bar{u} = \frac{1}{2} (\nabla \cdot \bar{u} + (\nabla \cdot \bar{u})^t)$$

ซึ่ง $\text{def } \bar{u}$ คือ อัตราการเปลี่ยนรูปของ stress tensor (stress tensor deformation) I คือเมตริกเอกลักษณ์ μ_{LES} คือ ความหนืดของ LES C_S คือค่าคงที่ของ Smagorinsky โดยใช้ค่าคงที่เท่ากับ 0.2 สำหรับในงานวิจัยนี้

ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศ FDS ใช้แบบจำลอง mixture fraction โดยอาศัยสมมุติฐานที่ว่า อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนถูกควบคุมโดยอัตราของการที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนเข้าผสมกัน (mixing controlled combustion) แทนที่ที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนผสมกันเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว (infinitely fast chemical reaction) ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบรูณ์ (stoichiometric combustion) ตัวแปร mixture fraction สามารถเขียนได้ตามการเสนอของ Mell และ คณะ [9] ดังนี้

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{s Y_F^I + Y_O^\infty} \quad (6)$$

โดย Z คือ mixture fraction Y_F คือเศษส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิง Y_F^I คือเศษส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงจากแหล่งกำเนิด Y_O คือเศษส่วนโดยมวลของออกซิเจน Y_O^∞ คือเศษส่วนโดยมวลของออกซิเจน

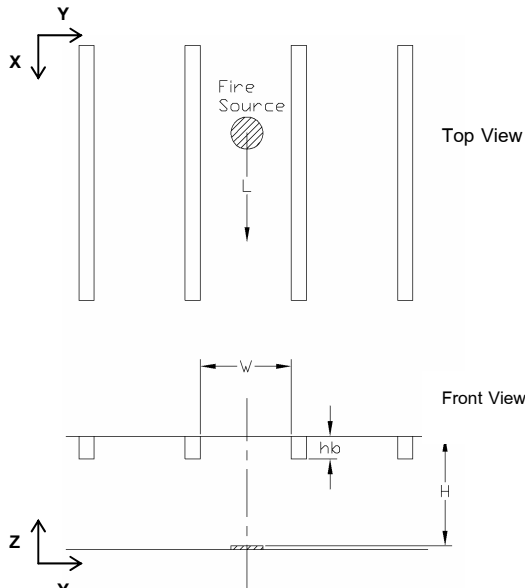
ในอากาศ และ s คืออัตราส่วนโดยมวลของออกซิเจนต่อเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาโดยสมบูรณ์ (stoichiometric oxygen to fuel mass ratio)

ตัวแปร mixture fraction เป็นปริมาณสเกลาร์ตัวหนึ่งซึ่งสามารถเขียนในเทอมของสมการการเคลื่อนที่ของปริมาณสเกลาร์ (scalar transport equation) ได้โดยอาศัยสมการที่ (2) และ (6) ซึ่ง

$$\rho \left(\frac{\partial Z}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla Z \right) = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (7)$$

สมการอนุรักษ์ของปริมาณต่างๆ (สมการที่ (2) ถึง (7)) สามารถหาผลเฉลยได้โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีการหาผลเฉลยนี้สามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [5, 6]

2.2 สมการการไหลของควันใต้เพดานที่มีคานจากการทดลอง (Confined ceiling jet empirical equations)



ภาพที่ 1 การกำหนดตัวแปรของห้องซึ่งมีคานที่เพดาน

Delichatsios [1] ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิของควันไหลใต้เพดานระหว่างคานที่ระยะ L จากกองเพลิงดังแสดงในภาพที่ 1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างระยะระหว่างคาน (W) ต่อความสูงห้อง (H) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 1.2 ($0.4 < W/H < 1.2$) อุณหภูมิของควันไหลใต้เพดานสามารถคำนวณได้โดย

$$\frac{\Delta T_{CJ}}{\Delta T_0} = 0.37 \left(\frac{H}{W} \right)^{1/3} \exp \left[-0.16 \left(\frac{L}{H} \right) \left(\frac{W}{H} \right)^{1/3} \right] \quad (8)$$

โดย $\Delta T_{CJ} = T_{CJ} - T_\infty$ คือผลต่างอุณหภูมิของควันไหลใต้เพดานกับแวดล้อม ΔT_0 คือผลต่างอุณหภูมิของลำควันที่ความสูง H เหนือกองเพลิงกับสิ่งแวดล้อม H คือความสูงจากผิวบนของเชื้อเพลิงถึงเพดาน (ความสูงของเพดาน) W คือระยะระหว่างช่องคานหรือช่องทางเดิน และ L คือระยะจากแนวกึ่งกลางของกองเพลิง

ในส่วนของการไหลของควันใต้เพดาน Delichatsios คำนวณความเร็วบนสมมุติฐานว่าการไหลของควันระหว่างช่องคานไม่เกิดการ

ไหลล้นไปสู่ช่องระหว่างคานข้างเคียง เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดระหว่างคานซึ่งตั้งฉากกับการไหลมีขนาดคงที่พร้อมกันนี้อัตราการไหลโดยมวลของควันมีค่าคงที่ ดังนั้นความเร็วในการไหลของควันจึงมีขนาดคงที่ไม่ขึ้นกับระยะ L โดย

$$\frac{u_{CJ}}{u_0} = 0.27 \left(\frac{H}{W} \right)^{1/3} \quad (9)$$

โดย u_{CJ} คือความเร็วของควันไหลใต้เพดาน (m/s) u_0 คือความเร็วในแนวตั้งของลำควันที่ความสูง H

อุณหภูมิของลำควัน ΔT_0 ในสมการที่ (8) และความเร็วของลำควัน u_0 ในสมการที่ (9) สามารถคำนวณได้ตามวิธีที่เสนอใน [4] สมการที่ (8) และ (9) ใช้ได้เมื่อ $L > W/2$ ในกรณีที่ $L < W/2$ (ก่อนที่ควันจะไหลกระทบกับคาน) หรือระยะระหว่างคานมีค่ามาก ($W/H > 1.2$) Delichatsios[1] เสนอว่าพฤติกรรมของการไหลของควันใต้เพดานจะมีลักษณะเหมือนกับการไหลของควันใต้เพดานอย่างอิสระ ดังนั้นการคำนวณหาอุณหภูมิและความเร็วในการไหลของควันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่เสนอในเอกสารอ้างอิงที่ [2, 7]

ถ้าคานมีความหนา (h_b) ไม่มาก ควันที่ไหลระหว่างช่องคานจะมีโอกาสไหลล้นไปสู่ช่องระหว่างคานที่อยู่ติดกันทำให้อุณหภูมิที่คำนวณจากสมการที่ (8) มีค่าคลาดเคลื่อน เพื่อป้องกันการไหลล้นของควันระหว่างช่องคาน Evans [10] เสนอว่าคานควรมีความหนาน้อยกว่าเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$\frac{h_b}{H} > 0.126 \left(\frac{H}{W} \right)^{1/3} \quad (10)$$

เมื่อ h_b คือความหนาของคาน

2.3 พารามิเตอร์ไร้มิติของกองเพลิง (Dimensionless parameters in fire)

อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของการไหลของควัน ในกรณีที่เรารู้พารามิเตอร์การไหลของควันใต้เพดานภายในห้องซึ่งมีความสูง H เราสามารถเขียนอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงในเทอม ตัวแปรไร้มิติ $\dot{Q}_H^*$ ได้โดย

$$\dot{Q}_H^* = \frac{\dot{Q}}{\Pi_H} \quad (11)$$

เมื่อ $\Pi_H = \rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} H^{5/2}$

โดย $\dot{Q}$ คืออัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง (kW) Π_H คือ Characteristic heat release rate based ceiling height ρ_∞ c_p T_∞ คือความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิของอากาศที่สภาวะแวดล้อม ตามลำดับ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ในการจำลองพฤติกรรมของเพลิงไหม้และการไหลของควันไฟขนาดกритที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถจำลองพฤติกรรมของการไหลของ

ควันได้แล้วยังควรสะท้อนถึงผลกระทบของอัตราการปล่อยพลังงาน ความร้อนของกองเพลิงต่อพฤติกรรมการไหลด้วย [4] โดยขนาดกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย R^* สามารถเขียนได้เป็น

$$R^* = \frac{\max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)}{(\dot{Q}_H^*)^{2/5} H} \quad (12)$$

เมื่อ R^* คือขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย Δx Δy และ Δz คือขนาดกริดในแกน X Y และ Z ตามลำดับ

3. การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Simulation)

การจำลองพฤติกรรมกริดของควันภายในห้องดำเนินการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสมการที่ (1) ถึง (7) พารามิเตอร์ในการคำนวณทั้ง 14 กรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ความสูงของห้อง (H) กำหนดให้เท่ากับ 3 เมตร ในทุกกรณี ระยะระหว่างคานต่อความสูงห้อง (W/H) มีค่าเท่ากับ 0.4 0.8 และ 1.2 ตามลำดับ ความหนาของคานต่อความสูงห้องมีค่าเท่ากับ 0.1 0.2 และ 1.0 (ช่องทางเดิน) ที่ผิวของโคมินการคำนวณบริเวณที่ควันสัมผัสกับเพดานอนุญาตให้ควันสามารถสูญเสียความร้อนไปสู่เพดานโดยการนำความร้อนได้

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

กรณี ที่	Case ID	$\dot{Q}$ (kW)	Q_H^*	$\frac{W}{H}$	$\frac{h_b}{H}$	R^*
C1	I_321	1000	0.057	0.4	0.2	0.419
C2	I_322	1000	0.057	0.8	0.2	0.419
C3	I_323	1000	0.057	1.2	0.2	0.419
C4	II_321	1000	0.057	0.4	0.2	0.210
C5	II_321a	1000	0.057	0.4	0.1	0.210
C6	II_322	1000	0.057	0.8	0.2	0.210
C7	II_322a	1000	0.057	0.8	0.1	0.210
C8	II_322inf	1000	0.057	0.8	1.0	0.210
C9	II_322_500	500	0.029	0.8	0.2	0.277
C10	II_322_100	100	0.006	0.8	0.2	0.527
C11	II_323	1000	0.057	1.2	0.2	0.210
C12	II_323a	1000	0.057	1.2	0.1	0.210
C13	III_322	1000	0.057	0.8	0.2	0.328
C14	III_322	1000	0.057	0.8	0.2	0.164

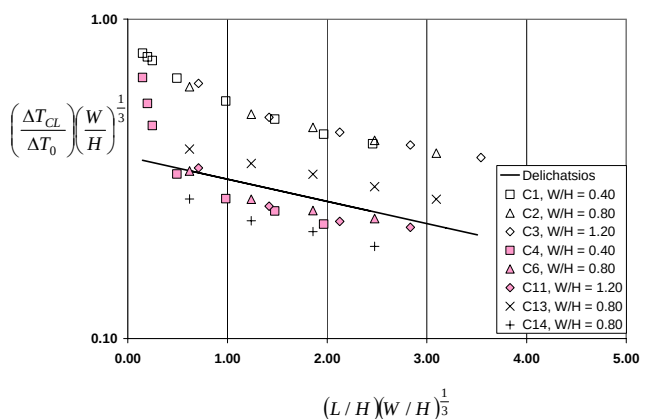
การจำลองเริ่มต้นจากสภาวะที่อากาศภายในห้องหยุดนิ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 25°C เมื่อการจำลองเริ่มขึ้นกองเพลิงที่มีขนาดอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนตามที่กำหนดในตารางที่ 1 ซึ่งวางไว้ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางห้องเริ่มเผาไหม้ปลดปล่อยพลังงานความร้อนและควันลอยตัวสูงขึ้นไปในแนวดิ่งจนกระทบกับเพดานห้อง หลังจากนั้นควันจะไหลไปในแนวระดับ เมื่อควันไหลไปกระทบกับคาน ควันจะสะสมตัวในช่องระหว่างคาน จากนั้นการไหลของควันจะถูกบีบให้ไหลไปในทิศทางขนานกับแนวนาน เมื่อการจำลองเข้าสู่สภาวะคงตัว (ที่เวลาประมาณ 15 ถึง 30 วินาทีแล้วแต่กรณี) อุณหภูมิและความเร็วของควันใต้เพดานที่ระยะประมาณ 5 เซนติเมตรใต้เพดาน ที่ระยะ L เท่ากับ 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 1 2 4 6 8 และ 9 เมตร ตามลำดับ ถูก

บันทึกเพื่อหาอุณหภูมิและความเร็วเฉลี่ยของควันในสภาวะคงตัว โดยช่วงเวลาในการจำลอง (simulation time) เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกรณีมีค่าไม่น้อยกว่า 15 วินาที จากนั้นผลการจำลองที่สภาวะคงตัวไปนำไปเปรียบเทียบกับผลการที่ได้จากการทดลองของ Delichatsios (สมการที่ (8) และสมการที่ (9))

4. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 อุณหภูมิของควันใต้เพดานในสภาวะคงตัว

อุณหภูมิเฉลี่ยในสภาวะคงตัวของควันใต้เพดานที่ระยะต่างๆ ตามแนวการไหลขนานกับคานถูกนำมาพล็อตไว้ในภาพที่ 2 และ ภาพที่ 3 ตัวแปรไร้หน่วย $(\Delta T_{CL} / \Delta T_0)(W/H)^{1/3}$ และ $(L/H)(W/H)^{1/3}$ ได้นำมาใช้เพื่อพล็อตผลการจำลองในแต่ละกรณีให้สามารถลงบนแกนคู่ลำดับเดียวกันได้ ในภาพรวมแล้วอุณหภูมิของควันในสภาวะคงตัวแปรผกผันกับระยะ L เมื่อควันไหลห่างจากแนวกึ่งกลางของกองเพลิง อุณหภูมิของควันมีค่าลดลงอย่างเอ็กโพเนนเชียลขึ้นทั้งนี้เนื่องจากควันมีการสูญเสียความร้อนให้กับเพดานและอากาศเย็นโดยรอบ ในภาพที่ 2 เมื่อกริด R^* มีขนาดเล็กลงจาก 0.419 (กรณีที่ C1 C2 C3) เป็น 0.210 (กรณีที่ C4 C6 C11) เปอร์เซนต์ความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผลการคำนวณโดย FDS และจากสมการของ Delichatsios (สมการที่ 8) มีค่าลดลงจาก 74% เป็น 8% อย่างไรก็ตามเมื่อลดขนาด กริด R^* ลงอีกเป็น 0.164 (กรณีที่ C14) ไม่ได้ทำให้เปอร์เซนต์ความแตกต่างมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การที่ กริด R^* มีขนาดเล็กจะใช้เวลาในการจำลอง (CPU time) ที่นานมากขึ้น โดยเวลาในการจำลองเพิ่มขึ้นจาก 4.72 ชั่วโมง เป็น 13.69 ชั่วโมง ดังนั้นถ้าพิจารณาถึงเปอร์เซนต์ความแตกต่างและเวลาที่ใช้ในการจำลองที่เหมาะสม กริด R^* ขนาดเท่ากับ 0.210 จึงเป็นขนาดกริดที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองนี้ ในการจำลองทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การศึกษาผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการจำลอง หรือการทำ grid refinement study เป็นสิ่งจำเป็นที่ควรกระทำ กริดขนาดเล็กจะให้ความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองต่ำแต่จะใช้เวลาในการจำลองสูงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นการซึ่งนำหณระหว่างระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้กับเวลาที่ใช้ในการจำลองจำเป็นต้องมีการพิจารณาอย่างเหมาะสม

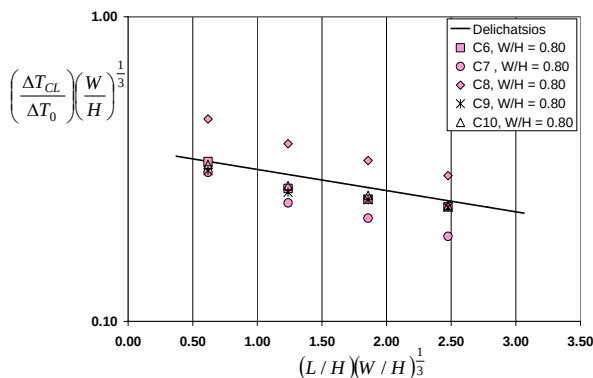


ภาพที่ 2 อุณหภูมิควันในสภาวะคงตัว ที่ h_b / W คงที่เท่ากับ 0.2 แล้วแปรผันขนาดกริด R^* และระยะระหว่างคาน (W/H)

ภาพที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อกำหนดกริด R^* และความหนาของคาน ($h_b / H = 0.2$) คงที่ อุณหภูมิของควันที่ระยะ L เดียวกันนี้

ค่าขึ้นกับระยะห่างระหว่างคาน (W/H) น้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความหนาคาน h_b/H เท่ากับ 0.2 ปริมาณที่ควันไหลระหว่างช่องคานจะเติมพื้นที่หน้าตัดพอดี การไหลของควันไปที่ช่องระหว่างคานที่อยู่ข้างเคียงมีน้อย ดังนั้นอุณหภูมิควันใต้เพดาน เมื่อ W/H เท่ากับ 0.4 0.8 และ 1.2 ตามลำดับ จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ภาพที่ 3 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิในสภาวะคงตัวด้วย FDS โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างคานต่อความสูงห้องคงที่เท่ากับ 0.8 แล้วแปรผันความหนาคานต่อความสูงห้อง h_b/H เท่ากับ 0.1 0.2 และ 1.0 ตามลำดับ (ในกรณี h_b/H เท่ากับ 1 การไหลของควันจะเป็นการไหลในช่องทางเดินนั่นเอง) เมื่อความหนาของคานเพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิของควันใต้เพดานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้ เนื่องจากความหนาของคานที่เพิ่มขึ้นจะป้องกันไม่ให้ควันไหลลงไปหาช่องระหว่างคานที่อยู่ข้างเคียง ในกรณีที่ C8 ซึ่ง h_b/H เท่ากับ 0.1 ค่าความหนาของคานไม่เป็นไปตามหลักเกณฑ์ที่ Evans เสนอ (สมการที่ 10) เมื่อควันไหลไปตามช่องคานห่างจากกองเพลิงมากขึ้น ปริมาณควันที่ไหลลงไปสู่ช่องคานที่อยู่ข้างเคียงมีมากขึ้นทำให้อุณหภูมิของควันมีค่าเบี่ยงเบนไปจากสมการของ Delichatsios ในกรณีที่ h_b/H เท่ากับ 0.2 ซึ่งเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของ Evans แต่แปรผันอัตราการปล่อยพลังงานความร้อน (กรณีที่ C6 C9 C10) อุณหภูมิของควันในแต่ละกรณีมีค่าไม่แตกต่างกันมากและมีค่าลู่เข้าสู่สมการของ Delichatsios ในกรณีที่ h_b/H เท่ากับ 1.0 หรือควันไหลในช่องทางเดิน (corridor) การไหลของควันไม่สามารถเกินขึ้นได้ ชั้นของควันจะสะสมตัวหนาใต้เพดานแล้วไหลไปตามช่องทางเดิน อุณหภูมิของควันที่คำนวณได้ในกรณีนี้จึงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการของ Delichatsios



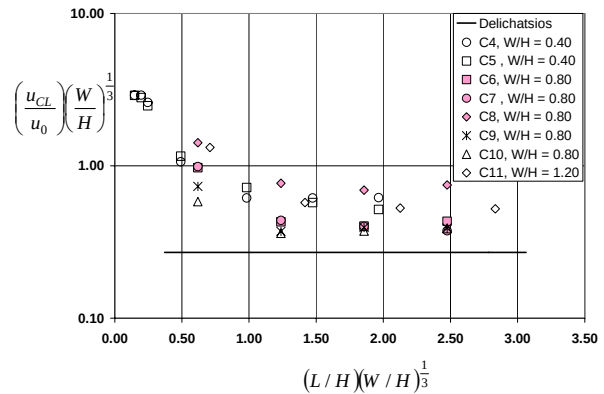
ภาพที่ 3 อุณหภูมิควันในสภาวะคงตัว ที่ W/H คงที่เท่ากับ 0.8 แล้วแปรผันความหนาของคาน (h_b) และอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง ($\dot{Q}$)

4.2 ความเร็วของควันใต้เพดานในสภาวะคงตัว

ภาพที่ 4 พล็อตความเร็วของควันไหลใต้เพดานในสภาวะคงตัวในเทอมตัวแปรไร้หน่วย $(u_{CL}/u_0)(W/H)^{1/3}$ คำนวณจาก FDS เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากสมการของ Delichatsios (สมการที่ 9) ความเร็วคำนวณจาก FDS เมื่อพิจารณาในช่วง $L > W/2$ ในแต่ละกรณีมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อควันไหลไปตามแนวคาน (ระยะ L เพิ่มขึ้น) แตกต่างจากความเร็วที่คำนวณจากสมการของ Delichatsios ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 0.27 (ในเทอมตัวแปรไร้หน่วย) ไม่ขึ้นกับระยะ L สาเหตุที่ความเร็วที่คำนวณจาก FDS แปรผกผันเล็กน้อยกับระยะทางในการ

ไหลเนื่องจากการจำลองได้อนุญาตให้ควันสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับเพดานได้ ดังนั้นเมื่อควันซึ่งร้อนกว่าเพดานไหลไปตามช่องระหว่างคาน ควันมีการสูญเสียความร้อนให้กับเพดานความเร็วในการไหลของควันจึงมีค่าลดลง

ความเร็วในการไหลของควันคำนวณจาก FDS โดยเฉลี่ยในแต่ละกรณีมีค่ามากกว่าที่คำนวณโดยสมการของ Delichatsios โดยประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4 ความเร็วของควันในสภาวะคงตัวในเทอมตัวแปรไร้หน่วย

4.3 ผลกระทบของคานต่อการกระจายตัวของควันในสภาวะคงตัว

การกระจายตัวของอุณหภูมิควันในสภาวะคงตัวที่ระนาบ X เท่ากับ 2.0 4.0 และ 8.0 เมตร ซึ่งวางตัวขวางคานได้แสดงไว้ในภาพที่ 5 และในระนาบที่กลางตามแนวยาวกับคาน (ระนาบ Y = 0.0) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 6 เมื่อระยะระหว่างคานคงที่ ($W/H = 0.8$) แล้วเพิ่มความหนาของคานจนกระทั่งกลายเป็นช่องทางเดิน ควันร้อนจะถูกบีบให้อยู่ภายในช่องว่างระหว่างคานเนื่องจากควันถูกจำกัดไหลใต้เพดานได้เพียงในทิศทางตามแนวยาวของคานเท่านั้น มาตรฐานป้องกันอัคคีภัย NFPA 130 Appendix B [11] แนะนำว่าในการระบายอากาศภายในพื้นที่ปิดจะต้องให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศสูงไม่เกิน 49°C เพื่อให้คนยังคงความสามารถในการหนีไฟออกจากอาคารได้ เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นควันระหว่างช่องคานที่มีอุณหภูมิเกิน 50°C (ดูภาพที่ 6 ประกอบ) ความหนาเฉลี่ยของควันเพิ่มขึ้นจาก 60 เซนติเมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 0.1 เป็น 80 เซนติเมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 0.2 แล้วเป็น 1 เมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 1.0 (ช่องทางเดิน) ซึ่งในกรณีของช่องทางเดินนั้น ความสูงจากพื้นห้องถึงระยะที่ปลอดภัยจากควันร้อนจะมีแค่เพียง 2 เมตรเท่านั้น (ห้องสูง 3 เมตร) อย่างไรก็ตามความหนาของควันร้อนจะเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อากาศที่อุปกรณ์ตรวจจับในระบบป้องกันอัคคีภัยจะจมอยู่ในชั้นควันมีมากขึ้นช่วยให้เวลาในการตอบสนองของอุปกรณ์ลดลง

5. สรุป

บทความนี้ได้แสดงผลการจำลองพฤติกรรมของการไหลของควันใต้เพดานที่มีคาน การศึกษาพบว่าขนาดคริต R^* เท่ากับ 0.210 เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองนี้ นอกจากนี้ผลการจำลองเชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นควันที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 50°C มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของคานเพิ่มขึ้น โดยความหนาเฉลี่ยของควันเพิ่มขึ้นจาก 60 เซนติเมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 0.1 เป็น 80 เซนติเมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 0.2 แล้วเป็น 1 เมตร เมื่อ h_b/H เท่ากับ 1.0 (ช่อง

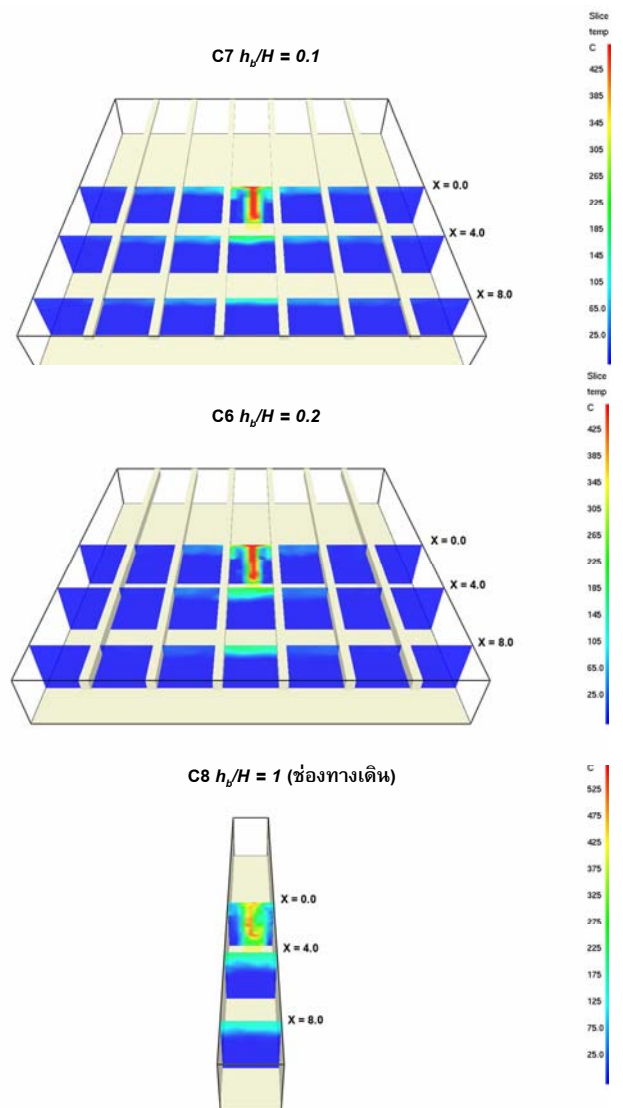
ทางเดิน) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการตรวจสอบความถูกต้องในการจำลองเพลิงไหม้และพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของควันภายในอาคารภาควิศวกรรมเครื่องกลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

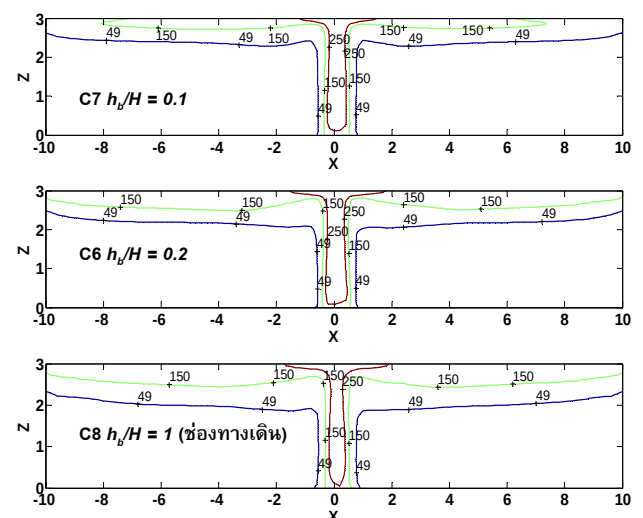
งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้และการกระจายตัวของควันไฟภายในอาคารหลังใหม่ภาควิศวกรรมเครื่องกลด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ รหัสโครงการวิจัย 50/05/ME

เอกสารอ้างอิง

1. Delichatsios, M.A., *The Flow of Fire Gases under a Beamed Ceiling*. Combustion and Flame, 1981. **43**: p. 1-10.
2. Alpert, R.L., *Calculation of response time of ceiling-mounted fire detector*. Fire Technology, 1972. **8**: p. 181-195.
3. Bailey, J.L., et al., *Development and Validation of Corridor Flow Submodel for CFAST*. Journal of Fire Protection Engineering, 2002. **12**(3): p. 139-162.
4. ณัฐศักดิ์ บุญมี, การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 45 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550. **45**: p. 62-69.
5. McGrattan, K., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*. 2004, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
6. McGrattan, K. and G. Forney, *Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide*. 2004, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
7. ณัฐศักดิ์ บุญมี, การศึกษาพฤติกรรมการไหลของควันใต้เพดานอย่างอิสระด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. ตออบรับเพื่อตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
8. Smagorinsky, J., *General Circulation Experiments with the Primitive Equations I The Basic Experiment*. Monthly Weather Review, 1963. **91**(3): p. 99-164.
9. Mell, W.E., K. McGratta, and H.R. Baum, *Numerical simulation of combustion in fire plumes*. Twenty-sixth Symposium (International) on Combustion, 1996. **26**: p. 1523-1530.
10. Evans, D.D., *Chapter 2-4 Ceiling Jet Flows*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, P.J. DiNenno, Editor. 1995, National Fire Protection Association: Quincy, MA.
11. NFPA, *NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. 2000.



ภาพที่ 5 การกระจายตัวของอุณหภูมิของควันในระนาบซึ่งวางตัวขวางคาน (ระนาบ $X = 2.0$ 4.0 และ 8.0) ในสภาวะคงตัว ($W/H = 0.8$) เพดานได้ถูกซ่อนไว้เพื่อผลในการแสดงภาพ)



ภาพที่ 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของควันในระนาบขนานกับแนวน (ระนาบ $Y = 0.0$) ในสภาวะคงตัว ($W/H = 0.8$)