

# การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

## Grid Refinement Study of Numerical Simulation of Axisymmetric Fire Plume

ณัฐศักดิ์ บุญมี<sup>1</sup>

Nathasak BOONMEE<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการทางสถิติเพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณชื่อ Fire Dynamics Simulator (FDS) โปรแกรม FDS ได้รับการพัฒนาโดย NIST (National Institute of Standards and Technology, ประเทศสหรัฐอเมริกา) FDS ใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) ในการจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนของควันและ mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction สำหรับจำลองการเผาไหม้ของเปลวไฟ โดเมนในการจำลองเพลิงไหม้มีขนาด  $8 \times 8 \text{ m}^2$  สูง 16 m กองเพลิงพื้นผิวการเผาไหม้รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกวางไว้กึ่งกลางของโดเมนการคำนวณ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงแปรผันตั้งแต่ 500 kW ถึง 1500 kW ขนาดกริดในเทอมตัวแปรไร้มิติ  $R^*$  ในช่วง 0.052 ถึง 0.259 ถูกใช้ในการจำลอง อุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่ระยะความสูงต่าง ๆ จากการจำลองด้วย FDS ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลองของ McCaffrey [1] เพื่อประมาณหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) จากการศึกษาพบว่าที่ กริดขนาด  $R^*$  ไม่เกิน 0.171 ให้ผลการจำลองของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงพุ่มมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 26% และค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้หนึ่ง

### ABSTRACT

This paper presents a statistical method to study effects of grid size in a simulation of axisymmetric fire plume by a Computational Fluid Dynamics fire model called Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS is developed by NIST (National Institute of Standards and Technology, USA). FDS uses Large Eddy Simulation (LES) for turbulence, and a mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction for flame combustion. A computational domain is  $8 \times 8 \text{ m}^2$  with 16 m height. A square fire source with variation of heat release rate from 500 kW to 1500 kW is placed at the floor center of the computational domain. Dimensionless grid sizes in term of  $R^*$  are varied from 0.052 to 0.259. Simulated plume centerline temperatures and velocities at various heights are compared with McCaffrey plume correlation [1] in order to estimate an average error and correlation coefficient. The study found that with grid size  $R^*$  not more than 0.171 the simulated plume temperatures and velocities in the plume region have the average error not more than 26% and the square of correlation coefficient approaching unity.

Keywords: แบบจำลองเพลิงไหม้, ลำควันสมมาตร, fire model, axisymmetric fire plume

N. Boonmee: [fengnab@ku.ac.th](mailto:fengnab@ku.ac.th)

---

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900 โทร. 02-942-8555 ต่อ 1843

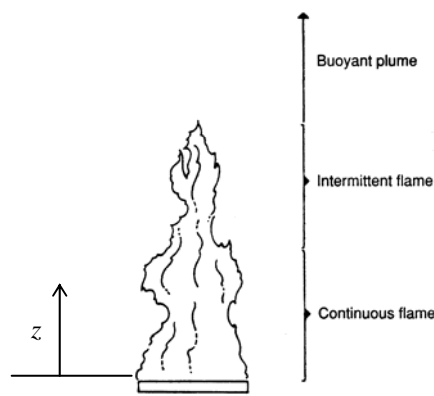
## คำนำ

ปัจจุบันการใช้แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD fire model) ในการประเมินสถานะภายในห้องขณะเกิดเพลิงไหม้ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยและระบบควบคุมควันไฟภายในอาคารให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ใช้กันกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับมากขึ้น ตัวอย่างโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีความสามารถหลายอย่างรวมถึงความสามารถในการคำนวณเกี่ยวกับพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของควันอันเนื่องมาจากเพลิงไหม้มีเช่น FLUENT, SOFIE, CFX, PHOENICS, STAR-CD, และ FDS (Fire Dynamics Simulator) ในบรรดาโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ FDS เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาด้านอัคคีภัย [2] จาก National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา โปรแกรม FDS ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume method) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่และสมการพลังงานของของไหล (Navier Stokes equation) และใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) โดยใช้ subgrid scale model ของ Smagorinsky สำหรับการจำลองสถานะการไหลแบบปั่นป่วน ในส่วนของการเผาไหม้เพื่อแก้ปัญหาขนาดของกริด ซึ่งไม่สามารถทำให้ละเอียดเพียงพอที่จะจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศในการคำนวณซึ่งมีโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ FDS ได้ใช้แบบจำลอง mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction บนสมมติฐานที่ว่า อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศถูกควบคุมโดยอัตราการที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกัน (mixing controlled) แทนที่ที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกันเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็ว (infinitely fast chemical reaction) ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

ในการจำลองพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของควันและเพลิงไหม้ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เราจำเป็นต้องมีการทดสอบขนาดกริดที่ใช้ในการคำนวณหรือการทำ grid refinement เพื่อศึกษาว่าขนาดกริดมีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณอย่างไร การคำนวณด้วยกริดขนาดเล็ก (fine grid) มีแนวโน้มที่ให้ผลการคำนวณที่แม่นยำสูงกว่าการใช้กริดขนาดใหญ่ (coarse grid) เนื่องจากสามารถคำนวณสถานะการไหลแบบปั่นป่วนของควันและการเผาไหม้ของเปลวไฟได้ใน length scale ที่มีขนาดเล็ก (ดังเช่น Kolmogorov length scale) อย่างไรก็ตามการใช้กริดขนาดเล็กจะใช้เวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย นอกจากนี้ในการจำลองพฤติกรรมของเพลิงไหม้และการเคลื่อนที่ของควันในปัญหาจริงด้านวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย แทบเป็นไปไม่ได้ที่จะทำให้กริดมีขนาดเล็กเพียงพอในการคำนวณ ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการชั่งน้ำหนักระหว่างความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FDS version 4.0 ในการทำการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงต่างๆ กับสมการของลำควันที่ได้จากการทดลองของ McCaffrey [1] โดยใช้วิธีการทางสถิติหาค่าเฉลี่ย ความคลาดเคลื่อน (average error) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดกริดต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณ ผลจากการศึกษานี้จะนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของเพลิงไหม้และการกระจายตัวของควันไฟภายในอาคารหลังไหม้ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ต่อไป

## ทฤษฎีของลำควัน (Plume Theory)

ลำควันหรือพวย (plume) คือลำของควันร้อนซึ่งเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ลอยตัวขึ้นไปในแนวตั้งเนื่องจากแรงลอยตัว สำหรับลำควันแบบสมมาตร (axisymmetric plume) ดังแสดงในรูปที่ 1 McCaffrey [1] ได้แบ่งช่วงของลำควันสมมาตรออกเป็น 3 ช่วงคือ 1) ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (continuous flame) คือช่วงความสูงซึ่งวัดจากผิวหน้าของกองเพลิงจนถึงระดับสูงสุดที่มีเปลวไฟปรากฏอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา 2) ช่วงเปลวไฟบางส่วน (intermittent flame) คือช่วงความสูงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเกือบจะสมบูรณ์แล้วทำให้มองเห็นเปลวไฟปรากฏอยู่เพียงบางส่วนบางช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง 3) ช่วงพวย (plume) เป็นช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นลำควันในช่วงนี้จะประกอบไปด้วยควันร้อนและอากาศซึ่งไหลเดิมจากบรรยากาศโดยรอบเท่านั้น



รูปที่ 1 ลำควันสมมาตร (Axisymmetric plume)

McCaffrey [1] ได้ศึกษาพฤติกรรมของลำควันสมมาตรโดยทำการทดลองจากกองเพลิงแก๊ส methane พื้นที่การเผาไหม้ขนาด  $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$  อัตราการปล่อยพลังงานความร้อน 14.4 kW ถึง 57.5 kW แล้วบันทึกอุณหภูมิและความเร็วของควันตามแนวแกนของลำควัน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีมิติไร้มิติ (Dimensionless analysis) McCaffrey ได้เสนอสมการเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ ตามแนวแกนของลำควัน ดังนี้

### อุณหภูมิของลำควัน

$$\text{ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง } z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08: \quad \Delta T_0 = 2.91T_\infty \quad (1.1)$$

$$\text{ช่วงเปลวไฟบางส่วน } 0.08 < z/\dot{Q}^{2/5} < 0.2: \quad \Delta T_0 = 0.227 \left( \frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right) T_\infty \quad (1.2)$$

$$\text{ช่วงพวย } z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2: \quad \Delta T_0 = 0.076T_\infty \left( \frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right)^{5/3} \quad (1.3)$$

### ความเร็วของลำควัน

$$\text{ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง } z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08: \quad u_0 = 6.8 \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{1/2} \dot{Q}^{1/5} \quad (2.1)$$

$$\text{ช่วงเปลวไฟบางส่วน } 0.08 < z/\dot{Q}^{2/5} < 0.2: \quad u_0 = 1.9\dot{Q}^{1/5} \quad (2.2)$$

$$\text{ช่วงพวย } z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2: \quad u_0 = 1.1 \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{-1/3} \dot{Q}^{1/5} \quad (2.3)$$

โดย  $\Delta T_0$  คือ ผลต่างอุณหภูมิของลำควันกับสิ่งแวดล้อม (K),  $u_0$  คือความเร็วของลำควัน (m/s)  $z$  คือความสูงในแนวตั้งวัดจากผิวหน้าของกองเพลิง และ  $\dot{Q}$  คืออัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง (kW)

### อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FDS version 4.0 ในการจำลองลำควันสมมาตร การคำนวณ 10 กรณีโดยการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ได้ดำเนินการในโดเมนการคำนวณขนาดกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร และ สูง 16 เมตร (ยกเว้นกรณีที่ 6 มีโดเมนขนาด 4 เมตร x 4 เมตร x 16 เมตร) กองเพลิงพื้นที่การเผาไหม้ขนาดตั้งแต่  $1 \times 1 \text{ m}^2$  ถึง  $2 \times 2 \text{ m}^2$  ถูกวางไว้ที่กึ่งกลางของผิวด้านล่างของโดเมนการคำนวณ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางกองเพลิง  $D$  ซึ่งเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่การเผาไหม้คำนวณได้จาก  $D = \sqrt{4A/\pi}$  เมื่อ  $A$  คือพื้นที่ของกองเพลิง อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงแปรผันในช่วง 500 kW ถึง 1500 kW

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

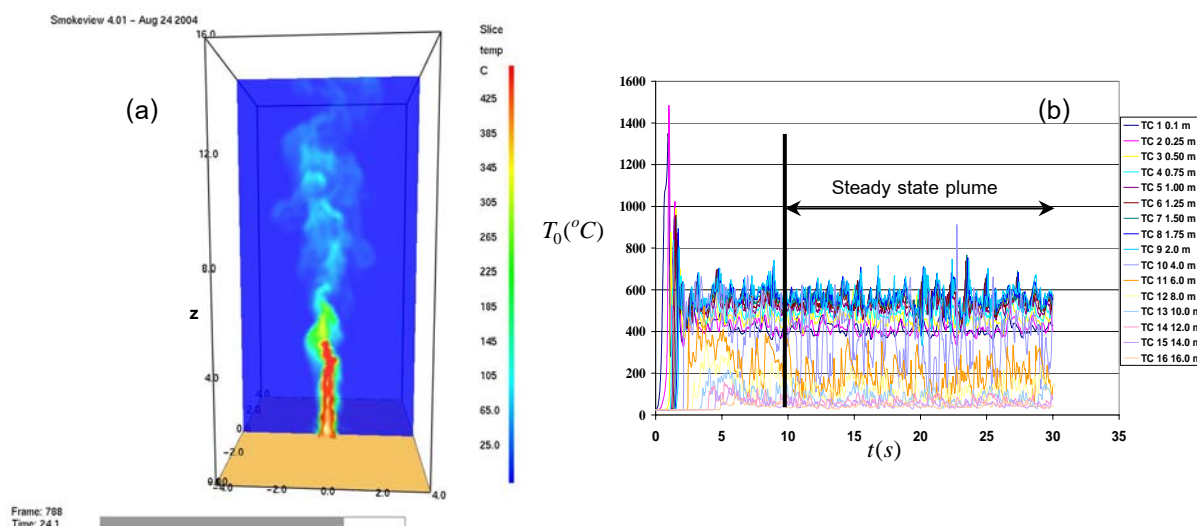
กรณี	ขนาดกริด ( $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ ) (m)	$D(\text{m}^2)$	$\dot{Q}$ (kW)	$R^*$
1	0.25x0.25x0.25	1.128	1000	0.259
2	0.20x0.20x0.20	1.128	1000	0.207
3	0.125x0.125x0.125	1.128	1000	0.129
4	0.10x0.10x0.10	1.128	1000	0.103
5	0.08x0.08x0.08	1.128	1000	0.083
6	0.05x0.05x0.05	1.128	1000	0.052
7	0.125x0.125x0.125	1.128	500	0.171
8	0.125x0.125x0.125	1.128	1500	0.110
9	0.125x0.125x0.125	1.692	1000	0.129
10	0.125x0.125x0.125	2.256	1000	0.129

ในการจำลองพฤติกรรมของลำควัน ขนาดกริดที่เหมาะสมนอกจากจะสามารถจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของควันได้แล้ว ขนาดของกริดที่เหมาะสมควรจะสะท้อนถึงผลกระทบของอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของควันมาพิจารณาประกอบด้วยด้วย  $Ma$  และ  $Quintiere$  [3] ใช้ FDS version 2.0 ในการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของอ่างไฟ (pool fire) และการเคลื่อนที่ของลำควันโดยได้เสนอพารามิเตอร์ไร้หน่วย  $R^*$  เพื่อเป็นพารามิเตอร์ที่รวมเอาขนาดกริดและอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงเข้าด้วยกันโดย

$$R^* = \frac{\Delta z}{\left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}} \quad (3)$$

เมื่อ  $R^*$  คือ ขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย,  $\Delta z$  คือ ขนาดของกริด (m),  $\rho_\infty$ ,  $T_\infty$ , และ  $c_p$  คือ ความหนาแน่น, อุณหภูมิ, และ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิห้องตามลำดับ และ  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

การคำนวณในทุกกรณีได้ดำเนินการบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium 4 3.2 GHz Ram 1 GB ในการจำลองกองเพลิงจะใช้เวลาประมาณ 5 วินาทีของการจำลองเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) จากนั้นการคำนวณจะดำเนินไปเป็นเวลา 30 วินาที ภาพแสดงอุณหภูมิบนระนาบกึ่งกลางกองเพลิงจากการจำลองในกรณีที่ 3 ( $\dot{Q} = 1000 \text{ kW}$ ,  $R^* = 0.164$ ) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2(a)



รูปที่ 2 ภาพแสดง temperature field at plane  $y = 0$ ,  $t = 24.1 \text{ s}$ ,  $\dot{Q} = 1000 \text{ kW}$ ,  $R^* = 0.129$  (กรณีที่ 3)

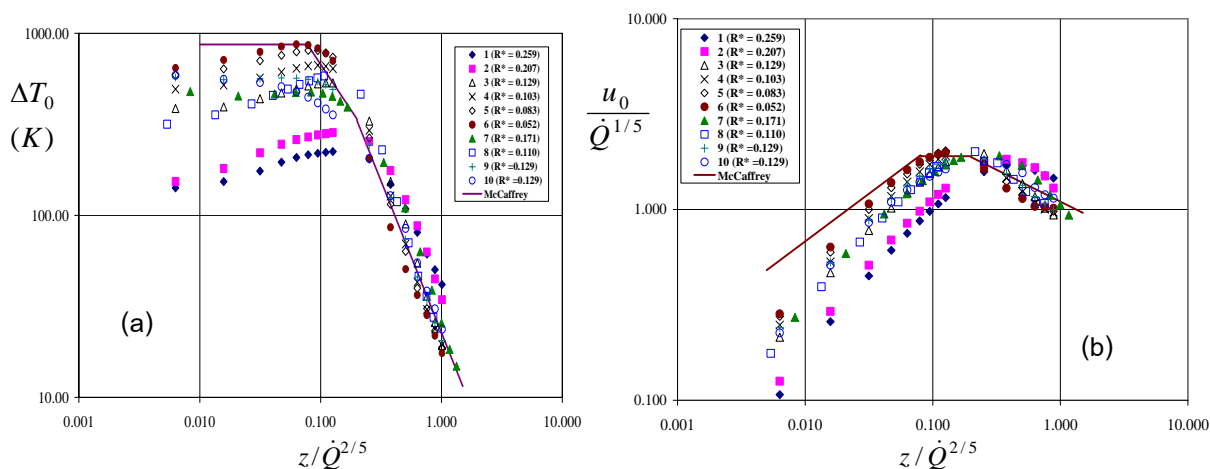
อุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ ในสภาวะคงตัวจะได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงเวลา 10 ถึง 30 วินาทีของการคำนวณ รูปที่ 2(b) แสดงตัวอย่างผลการคำนวณอุณหภูมิของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ กับเวลาจากการจำลองในกรณีที่ 3 ( $\dot{Q} = 1000 \text{ kW}$ ,  $R^* = 0.129$ ) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันจะใช้เป็นค่าอุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่คำนวณได้จาก FDS เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ McCaffrey

### ผลการคำนวณ

รูปที่ 3(a) แสดงพล็อตของอุณหภูมิเฉลี่ยของลำควัน  $\Delta T_0$  คำนวณจาก FDS กับความสูงในเทอม  $z/\dot{Q}^{2/5}$  และรูปที่ 3(b) แสดงพล็อตของความเร็วเฉลี่ยของลำควันในเทอม  $u_0/\dot{Q}^{1/5}$  คำนวณจาก FDS กับความสูงในเทอม  $z/\dot{Q}^{2/5}$  เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิและความเร็วของลำควันคำนวณจากสมการของ McCaffrey ตัวแปรอุณหภูมิและความเร็วของลำควันถูกเลือกในเทอมที่สามารถแสดงผลได้สอดคล้องกับตัวแปรอุณหภูมิและความเร็วของลำควันจากสมการของ McCaffrey

จากกราฟรูปที่ 3(a) พบว่าอุณหภูมิของลำควันในช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง ( $z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08$ ) จะมีค่าคงที่โดยประมาณเท่ากับอุณหภูมิของเปลวไฟจากการเผาไหม้แบบปั่นป่วน เมื่อกริดมีขนาดลดลง ( $R^*$  ลดลง) อุณหภูมิที่คำนวณจาก FDS มีค่าเพิ่มขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิที่คำนวณจากสมการของ McCaffrey ทั้งนี้เนื่องจาก

ขนาดกริดที่ละเอียดมากขึ้นทำให้สามารถจำลองกระบวนการผสมและแพร่ (mixing and diffusion process) ของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ length scale ขนาดเล็ก (โดยประมาณเท่ากับความหนาของเปลวไฟ) ได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ทำให้อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้มีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองของ McCaffrey อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณจากกริดที่มีความละเอียดสูงก็จากมากตามไปด้วย เมื่อความสูงที่พิจารณาเพิ่มขึ้นเข้าสู่ช่วงพลุ้ม ( $z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$ ) การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศได้จบสิ้นไปแล้ว length scale ในช่วงนี้จึงมีขนาดใหญ่ขึ้น (โดยประมาณเท่ากับ length scale ของการไหลแบบปั่นป่วน) ขนาดของกริดจึงมีผลกระทบต่อผลการจำลองดังที่อุณหภูมิของลำคว้นคำนวณจาก FDS ในแต่ละ ขนาดกริดเข้าสู่ อุณหภูมิที่คำนวณจากสมการ McCaffrey ขนาดของกริดมีผลกระทบในลักษณะเดียวกันต่อความเร็วของลำคว้นดังแสดงในรูปที่ 3(b)



รูปที่ 3 กราฟ (a)  $\Delta T_0$  กับ  $z/\dot{Q}^{2/5}$  และ (b)  $u_0$  กับ  $z/\dot{Q}^{2/5}$

### วิเคราะห์ผลการคำนวณ

ในการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณค่าทางสถิติของค่าถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ 1) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (average error) และ 2) ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

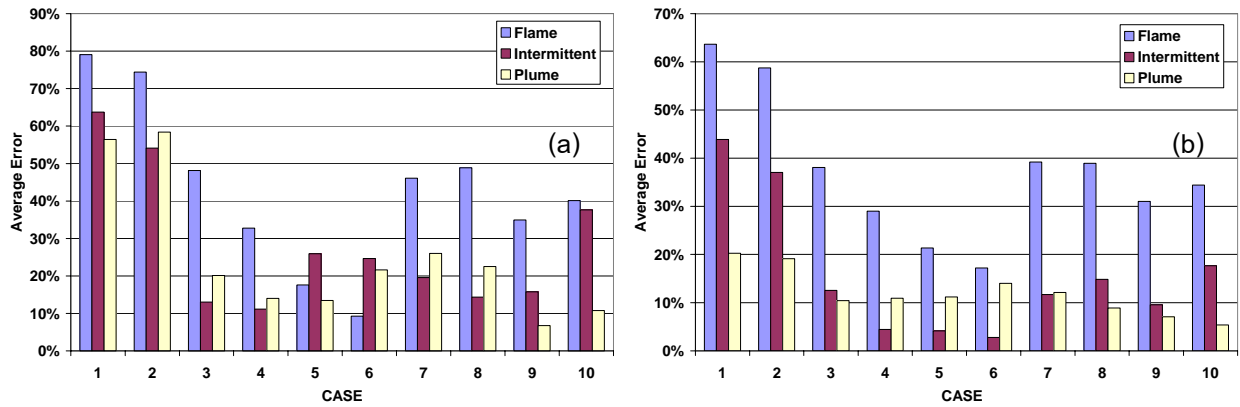
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (average error) ในแต่ละช่วงความสูงของลำคว้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\%Avg\_Error = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|X_i - Y_i|}{Y_i} \right) \times 100\%}{n} \quad (4)$$

เมื่อ  $X$  และ  $Y$  เป็นอุณหภูมิและความเร็วของลำคว้นในแต่ละช่วงซึ่งคำนวณได้จาก FDS และจากสมการของ McCaffrey ตามลำดับ

รูปที่ 4 แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของผลการคำนวณของอุณหภูมิ (รูปที่ 4(a)) และ ความเร็วของลำคว้น (รูปที่ 4(b)) ในแต่ละกรณี เป็นดังที่คาดไว้ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อกริดมีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการคำนวณเฉพาะในช่วงพลุ้ม ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 30% (มากที่สุดเท่ากับ 26% ที่  $R^* = 0.171$ ) เมื่อกริด  $R^*$  มีขนาดอยู่ในช่วง 0.052 ถึง 0.171 Ma และ Quintiere [3] เสนอว่า

$R^*$  ควรมีค่าไม่เกิน 0.05 เพื่อให้ผลการคำนวณของอุณหภูมิในช่วงเปลวไฟต่อเนื่องมีความแม่นยำ ทั้งนี้เพราะว่าขนาดกริดในช่วงนี้สามารถจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเปลวไฟได้ แต่ถ้าต้องการความแม่นยำแค่เพียงในช่วงพลุขนาด  $R^*$  มีค่าไม่เกิน 0.1 ก็เพียงพอ ในการศึกษานี้เมื่อ  $R^*$  ประมาณ 0.1 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจะมีค่าโดยประมาณ 14% อย่างไรก็ตามการคำนวณครั้งนี้กระทำในโดเมนการคำนวณขนาด  $8 \times 8 \times 16 \text{ m}^3$  ถ้าโดเมนการคำนวณมีขนาดใหญ่เช่นการจำลองอาคารหลังใหม่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (โดเมนขนาดประมาณ  $30 \times 60 \times 20 \text{ m}^3$ ) เราอาจจำเป็นต้องเลือกใช้กริดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่มากเกินไปจนไม่สามารถทำการคำนวณได้ การชั่งน้ำหนักระหว่างเวลาที่ใช้ในการคำนวณและความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่หลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 4 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของ (a) อุณหภูมิของลำควัน และ (b) ความเร็วของลำควัน

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) หรือเรียกอีกอย่างว่า Pearson product-moment correlation coefficient เป็นค่าทางสถิติที่วัดความสัมพันธ์ของข้อมูลสองชุด [4] ถ้าข้อมูลสองชุดมีความสัมพันธ์คล้ายตามกันอย่างมากค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ถ้าข้อมูลสองชุดมีความสัมพันธ์กันน้อยค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าแตกต่างไปจากหนึ่งมาก ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r_{XY}^2$  สามารถคำนวณได้โดย

$$r_{XY}^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

เมื่อ  $X$  และ  $Y$  เป็นอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในแต่ละช่วงซึ่งคำนวณได้จาก FDS และจากสมการของ McCaffrey ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการคำนวณในแต่ละกรณี สัญลักษณ์ NA ในตารางที่ 2 หมายถึงไม่สามารถหาค่า  $r_{XY}^2$  ได้เนื่องจากในช่วงเปลวไฟต่อเนื่องสำหรับอุณหภูมิ (ในเทอม  $\Delta T_0$ ) และช่วงเปลวไฟบางส่วนสำหรับความเร็วของลำควัน (ในเทอม  $u_0 / Q^{1/5}$ ) ค่าที่คำนวณได้จากสมการของ McCaffrey มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความสูง จากตารางที่ 2 เมื่อกริด  $R^* \leq 0.171$  ผลการคำนวณจาก FDS และ จากสมการของ McCaffrey มีความสัมพันธ์คล้ายตามกันอย่างมาก ( $r_{XY}^2 \rightarrow 1$ ) ในทุกช่วงของลำควัน อย่างไรก็ตาม  $r_{XY}^2$  ไม่สามารถบอกให้ทราบได้ว่าผลการคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด เป็นเพียงบอกแนวโน้มของ

ข้อมูล 2 ชุดว่ามีความสัมพันธ์กัน ดังสังเกตได้จากการ  $r_{xy}^2$  มีค่าเท่ากับ 1 ในช่วงเปลวไฟบางส่วนในกรณีที่ 1 ( $R^* = 0.259$ ) แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 65 % (ดูรูปที่ 4(a) ประกอบ) ดังนั้นวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการจำลองพฤติกรรมของลำควันจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลทั้งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตารางที่ 2 ค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

CASE	Temperature ( $\Delta T_0$ )			Velocity ( $u_0 / Q^{1/5}$ )		
	Flame	Intermittent	Plume	Flame	Intermittent	Plume
1 ( $R^* = 0.259$ )	NA	1.000	0.949	0.998	NA	0.260
2 ( $R^* = 0.207$ )	NA	1.000	0.954	0.998	NA	0.591
3 ( $R^* = 0.129$ )	NA	0.872	0.999	1.000	NA	0.998
4 ( $R^* = 0.103$ )	NA	0.905	0.995	1.000	NA	0.991
5 ( $R^* = 0.083$ )	NA	0.932	0.994	0.999	NA	0.976
6 ( $R^* = 0.052$ )	NA	0.972	0.990	0.997	NA	0.943
7 ( $R^* = 0.171$ )	NA	0.829	0.994	1.000	NA	0.973
8 ( $R^* = 0.110$ )	NA	1.000	0.998	0.999	NA	0.983
9 ( $R^* = 0.129$ )	NA	0.974	0.999	0.999	NA	0.998
10 ( $R^* = 0.129$ )	NA	0.997	0.982	0.996	NA	0.918

NA= ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้

## สรุป

บทความฉบับนี้ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการคำนวณอุณหภูมิและความเร็วของลำควันจากแบบจำลองเพลิงไหม้ Fire Dynamics Simulator โดยนำเสนอค่าทางสถิติ 2 ค่าคือ 1) ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย และ 2) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อกริดขนาด  $R^*$  ไม่เกิน 0.171 จะให้ผลการจำลองของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงพุ่มมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 26% และค่ากำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้หนึ่ง วิธีการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการคำนวณดังแสดงในบทความนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการจำลองพฤติกรรมของเพลิงไหม้รูปแบบอื่นได้เช่น การจำลองการไหลของควันใต้เพดาน ซึ่งจะเป็นก้าวต่อไปของโครงการวิจัยในการจำลองพฤติกรรมเพลิงไหม้ของอาคารหลังใหม่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

1. McCaffrey, B.J., *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. 1979, National Bureau of Standards: Gaithersburg, MD.
2. McGrattan, K., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*. 2004, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
3. Ma, T.G. and J.G. Quintiere, *Numerical Simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations*. Fire Safety Journal, 2003. 38: p. 467-492.
4. John R. Hall, J., *Section 1/Chapter 12 Statistics*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, P.J. DiNenno, Editor. 1995, NFPA, Quincy, MA. p. 1-166 -1-173.