

การหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร An Optimum Grid Size for a Simulation of Building Fire

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: 0-2576-4576, Email: fengnab@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้เป็นการหาขนาดกริดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร การทดลองเชิงตัวเลขได้ทำโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ชื่อ FDS (Fire Dynamics Simulator) version 4 ซึ่งพัฒนาโดย NIST (National Institute of Standards and Technology, ประเทศสหรัฐอเมริกา) โปรแกรม FDS ใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) สำหรับการจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน และ mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction สำหรับการจำลองการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศ โดเมนในการคำนวณมีขนาดกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร และ สูง 16 เมตร กองเพลิงขนาด 1 ตารางเมตร ได้ถูกวางไว้ที่กึ่งกลางของพื้นด้านล่างของโดเมนการคำนวณ ขนาดกริดในเทอมของตัวแปรไร้มิติ R^* ในช่วงตั้งแต่ 0.052 ถึง 0.259 และ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงขนาดตั้งแต่ 500 kW ถึง 1500 kW ได้ถูกใช้ในการคำนวณ ผลจากการคำนวณอันประกอบด้วย อุณหภูมิและความเร็วของลำควัน ถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดลอง จากการศึกษาพบว่า ขนาดกริด R^* ในช่วง 0.110 ถึง 0.171 เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดเมื่อคำนึงถึงเวลาในการคำนวณและความแม่นยำของผลการคำนวณ ผลจากการศึกษาครั้งนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองเพลิงไหม้ของอาคารหลังใหม่ ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งจะเป็นก้าวต่อไปสำหรับโครงการนี้

Abstract

The objective of this paper is to find an optimum grid size for a building fire simulation. A numerical experiment is performed by a freeware CFD program called FDS (Fire Dynamics

Simulator) version 4 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 combustion. The computational domain is 8 m by 8 m with 16 m height. A 1 m² fire source is placed at the center of the computational domain floor. Dimensionless grid sizes ranging from 0.052 to 0.259 and heat release rates ranging from 500 kW to 1500 kW are used in the simulations. The simulation results are compared with fire plume empirical correlations for plume centerline temperatures and velocities. With reasonable computational time and accuracy, the study found that the optimum grid size in term of dimensionless variable R^* is in the range of 0.110 to 0.171. This result will be used from a building fire simulation for a new Mechanical Engineering building, Kasetsart University, which will be a next step for this project.

คำสำคัญ: Fire modeling, Fire Dynamics Simulator, แบบจำลองเพลิงไหม้

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD fire modeling) ในการประเมินสภาวะภายในห้องขณะเกิดเพลิงไหม้ เพื่อใช้ในการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยและระบบควบคุมควันไฟภายในอาคารให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดได้ใช้กันกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับมากขึ้น ตัวอย่างโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีความสามารถหลายอย่างรวมถึงความสามารถในการคำนวณเกี่ยวกับพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของควันอันเนื่องมาจากเพลิงไหม้มีเช่น

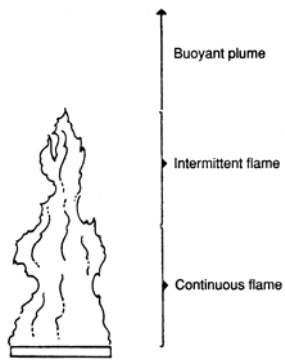
FLUENT, SOFIE, CFX, PHOENICS, STAR-CD, และ FDS (Fire Dynamics Simulator) เป็นต้น ในบรรดาโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ FDS เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาด้านอัคคีภัย [1, 2] จาก National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา

การศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม FDS version 4.0 ในการทำการทดลองเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงต่างๆ กับสมการของลำควันที่ได้จากการทดลองโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสมซึ่งให้ผลการคำนวณที่แม่นยำในช่วงพลุมน และใช้เวลาในการคำนวณที่เหมาะสม ผลจากการศึกษานี้จะนำไปใช้ในการจำลองพฤติกรรมของเพลิงไหม้และการกระจายตัวของควันไฟภายในอาคารหลังใหม่ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีของลำควัน (Plume theory)

ลำควันหรือพลุมน (plume) คือลำของควันร้อนซึ่งเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ลอยตัวขึ้นไปในแนวตั้งเนื่องจากแรงลอยตัว สำหรับลำควันแบบสมมาตร (axisymmetric plume) ดังแสดงในรูปที่ 1 McCaffrey [3] ได้แบ่งช่วงของลำควันสมมาตรออกเป็น 3 ช่วงคือ



รูปที่ 1. ลำควันสมมาตร (Axisymmetric plume), นำมาจาก [3]

1) ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (Continuous flame) คือช่วงความสูงซึ่งวัดจากผิวหน้าของกองเพลิงจนถึงระดับสูงสุดที่มีเปลวไฟปรากฏอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงและอากาศเกิดการเผาไหม้ อุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้จึงมีค่าสูงซึ่งโดยประมาณจะเท่ากับอุณหภูมิของเปลวไฟนั่นเอง

2) ช่วงเปลวไฟบางส่วน (Intermittent flame) คือช่วงความสูงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเกือบจะสมบูรณ์แล้วทำให้มองเห็นเปลวไฟปรากฏอยู่เพียงบางช่วงบางเวลาไม่ต่อเนื่อง ความเร็วการไหลในแนวตั้งของลำควันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ การไหลเดิมของอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับควันทำให้อัตราการไหลของลำควันเพิ่มขึ้นตามความสูง

3) ช่วงพลุมน (Plume) เป็นช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นลำควันในช่วงนี้จะประกอบไปด้วยควันร้อนและอากาศซึ่งไหลเดิมจากบรรยากาศโดยรอบเท่านั้น ความเร็วและ

อุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้จะแปรผกผันกับความสูงเนื่องจากมีอากาศซึ่งเย็นกว่าโดยรอบไหลเข้ามาผสมเจือจางทำให้ควันเย็นลง

จากการศึกษาพฤติกรรมของลำควันโดยการทำการทดลอง McCaffrey [3] ได้เสนอสมการจากการทดลองเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่ระดับความสูงต่างๆ ตามแนวแกนของลำควัน (plume centerline) ดังนี้

อุณหภูมิของลำควัน

ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง เมื่อ $z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08$:

$$\Delta T_0 = T_0 - T_\infty = 2.91T_\infty \quad (1.1)$$

ช่วงเปลวไฟบางส่วน เมื่อ $0.08 < z/\dot{Q}^{2/5} < 0.2$:

$$\Delta T_0 = T_0 - T_\infty = 0.227 \left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right) T_\infty \quad (1.2)$$

ช่วงพลุมน เมื่อ $z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$:

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

ความเร็วของลำควัน

ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง เมื่อ $z/\dot{Q}^{2/5} < 0.08$:

$$u_0 = 6.8z^{1/2} \quad (2.1)$$

ช่วงเปลวไฟบางส่วน เมื่อ $0.08 < z/\dot{Q}^{2/5} < 0.2$:

$$u_0 = 1.9\dot{Q}^{1/5} \quad (2.2)$$

ช่วงพลุมน เมื่อ $z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$:

$$u_0 = 1.1z^{-1/3}\dot{Q}^{1/3} \quad (2.3)$$

โดย T_0 คืออุณหภูมิของลำควัน (K), T_∞ คืออุณหภูมิลิ่งแวดล้อม (เท่ากับ 298K), u_0 คือความเร็วของลำควัน (m/s) z คือความสูงในแนวตั้งวัดจากผิวหน้าของเชื้อเพลิง, และ \dot{Q} คืออัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง (kW)

นอกจากสมการของ McCaffrey Heskestad [4] ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงพลุมน ($z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$) โดย

$$\Delta T_0 = 25 \left(\frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{(z-z_0)} \right)^{5/3} \quad (3.1)$$

$$u_0 = \left(\frac{\dot{Q}_C}{(z - z_0)} \right)^{1/3} \quad (3.2)$$

โดย

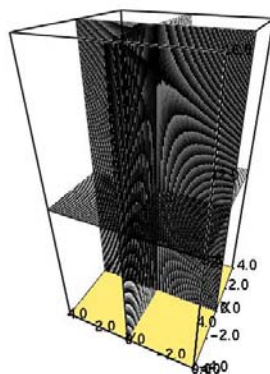
$$z_0 = 0.083\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (3.3)$$

เมื่อ \dot{Q}_C คือ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงโดยการพาความร้อน (kW) โดย $\dot{Q}_C = 0.7\dot{Q}$, z_0 จุดกำเนิดเสมือนของกองเพลิง (virtual origin, m), และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกองเพลิง (m), โดย $D = \sqrt{4A/\pi}$, A คือ พื้นที่ของกองเพลิง (m^2)

2.2 แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยโปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS)

โปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) [1, 2] ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume method) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่และสมการพลังงานของของไหล และใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) โดยใช้ subgrid scale model ของ Smagorinsky สำหรับการจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน ในส่วนของการเผาไหม้เพื่อแก้ปัญหาขนาดของกริดซึ่งไม่สามารถทำให้ละเอียดเพียงพอที่จะจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศในการคำนวณซึ่งมีโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ FDS ได้ใช้แบบจำลอง mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction บนสมมุติฐานที่ว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศถูกควบคุมโดยอัตราการที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกัน (mixing controlled) แทนที่ที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกันเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็ว (infinitely fast chemical reaction) ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับโปรแกรม FDS สามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [1, 2]

3. การจำลองเชิงตัวเลข



รูปที่ 2. ตัวอย่างโดเมนการคำนวณและการสร้างกริดในการจำลองพฤติกรรมของลำควัน

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FDS version 4.0 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของลำควันโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาขนาดกริดที่เหมาะสมในการคำนวณอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงพลุม การคำนวณได้

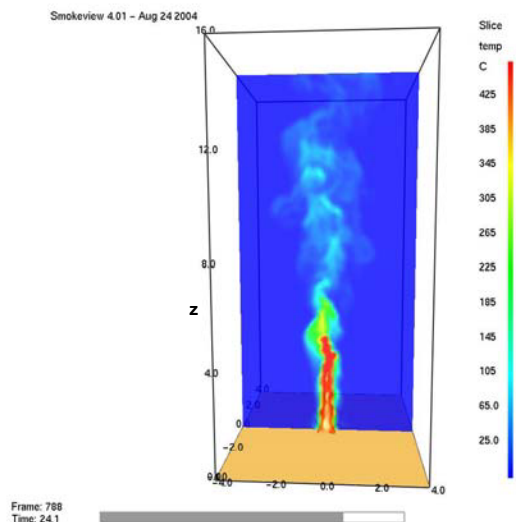
ดำเนินการในโดเมนการคำนวณขนาดกว้าง 8 เมตร ยาว 8 เมตร และสูง 16 เมตร (ยกเว้นกรณีที่มีโดเมนขนาด 4 เมตร x 4 เมตร x 16 เมตร) กองเพลิงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้างไว้ที่กึ่งกลางของมิดดิลไลน์ของโดเมนการคำนวณ รูปที่ 2 แสดงโดเมนการคำนวณ และการสร้างกริด ซึ่งใช้ในการศึกษานี้ ค่าพารามิเตอร์สำหรับการคำนวณแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

กรณี	ขนาดกริด ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$) (m)	จำนวน ปริมาตรจำกัด	\dot{Q} (kW)	R^*
1	0.25x0.25x0.25	32x32x64	1000	0.259
2	0.20x0.20x0.20	40x40x80	1000	0.207
3	0.125x0.125x0.125	64x64x128	1000	0.129
4	0.10x0.10x0.10	80x80x160	1000	0.103
5	0.08x0.08x0.08	100x100x200	1000	0.083
6	0.05x0.05x0.05	80x80x320	1000	0.052
7	0.125x0.125x0.125	64x64x128	500	0.171
8	0.125x0.125x0.125	64x64x128	1500	0.110

4. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

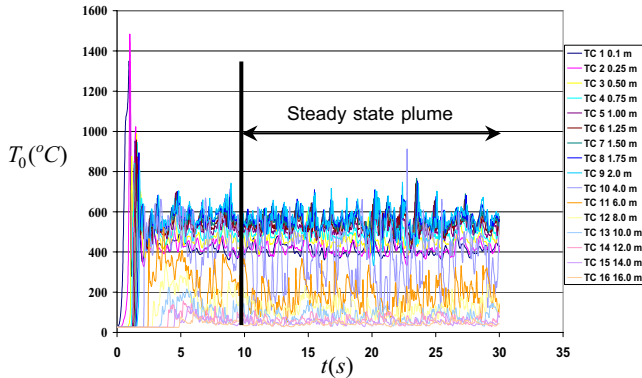
การคำนวณในทุกกรณีได้ดำเนินการบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Pentium 4 3.2 GHz Ram 1 GB ในการจำลองกองเพลิงจะใช้เวลาประมาณ 5 วินาทีของการจำลองเพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) จากนั้นการคำนวณจะดำเนินไปเป็นเวลา 30 วินาที ภาพ snap short ของอุณหภูมิบนระนาบผ่านแนวกึ่งกลางกองเพลิงจากการจำลองในกรณีที่ 3 ($\dot{Q} = 1000$ kW, $R^* = 0.129$) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



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

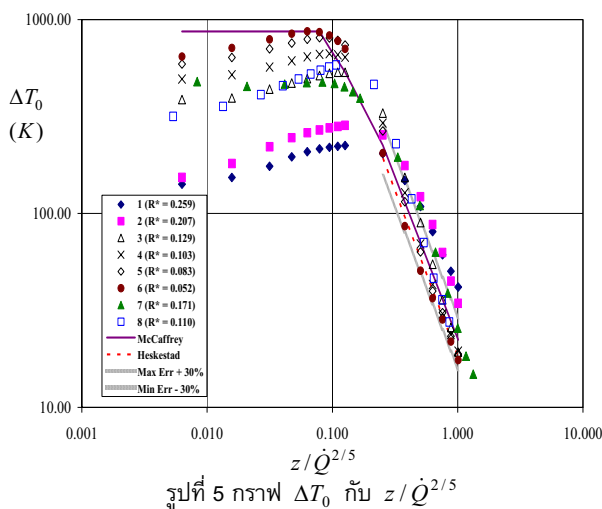
อุณหภูมิและความเร็วของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ ในสภาวะคงตัวจะได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันในช่วงเวลา 10 ถึง 30 วินาทีของการคำนวณ รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผล

การคำนวณอุณหภูมิของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ กับเวลาจากการจำลองในกรณีนี้ 3 ($\dot{Q} = 1000$ kW, $R^* = 0.129$) ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความเร็วของลำควันจะใช้เป็นค่าอุณหภูมิและความเร็วของลำควันซึ่งคำนวณได้จาก FDS เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ McCaffrey



รูปที่ 4 พล็อตอุณหภูมิของลำควันที่ระดับความสูงต่าง ๆ กับเวลา สำหรับการจำลองกรณีนี้ 3 ($\dot{Q} = 1000$ kW, $R^* = 0.129$)

รูปที่ 5 แสดงพล็อตของอุณหภูมิของลำควันที่ได้การคำนวณด้วย FDS กับพารามิเตอร์ $z/\dot{Q}^{2/5}$ เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิของลำควันที่คำนวณจากสมการที่ (1) ในช่วงพลุ่ม ($z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$) อุณหภูมิของลำควันคำนวณจากสมการของ Heskestad (สมการที่ (3.1)) ได้พล็อตลงบนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5 จากกราฟพบว่าอุณหภูมิของลำควันคำนวณจากสมการของ Heskestad ประมาณอุณหภูมิของลำควันต่ำกว่าค่าอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการของ McCaffrey ดังนั้นเราอาจใช้ค่าอุณหภูมิของลำควันจากสมการของ Heskestad เป็นขอบเขตล่างของค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองและค่าอุณหภูมิจากสมการของ McCaffrey เป็นขอบเขตบนในการเปรียบเทียบอุณหภูมิของลำควันซึ่งคำนวณจาก FDS กับอุณหภูมิซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 5 กราฟ ΔT_0 กับ $z/\dot{Q}^{2/5}$

ในการจำลองพฤติกรรมของลำควัน ขนาดกริดที่เหมาะสม นอกจากจะสามารถจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของควันได้แล้ว

ขนาดของกริดที่เหมาะสมควรจะนำเอาผลกระทบของอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของควันมาพิจารณาด้วย Ma และ Quintiere [5] ใช้ FDS version 2.0 ในการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของอ่างไฟ (pool fire) และการเคลื่อนที่ของลำควันโดยได้เสนอพารามิเตอร์ไร้หน่วย R^* เพื่อเป็นตัวแทนสำหรับหาขนาดกริดที่เหมาะสมซึ่ง

$$R^* = \frac{\Delta z}{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}} \quad (4)$$

เมื่อ R^* คือ ขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้หน่วย, Δz คือ ขนาดของกริด (m), ρ_∞ , T_∞ , และ c_p คือ ความหนาแน่น, อุณหภูมิ, และ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิห้องตามลำดับ และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

ค่า R^* สำหรับการคำนวณในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยการใส่ค่าอุณหภูมิของลำควันคำนวณจากสมการที่ (1) เป็นค่าอ้างอิง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของลำควันที่คำนวณจาก FDS กับค่าอ้างอิงสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (5)

$$\%Error = \frac{|\Delta T_0_Cal - \Delta T_0_Ref| \times 100\%}{\Delta T_0_Ref} \quad (5)$$

โดย $\%Error$ คือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ΔT_0_Cal คือ อุณหภูมิของลำควันคำนวณจาก FDS และ ΔT_0_Ref คืออุณหภูมิของลำควันคำนวณจากสมการที่ (1)

ถ้ากริดมีขนาดเล็กค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าลดลงอย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2 ถ้าจำกัดให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในช่วง $\pm 30\%$ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณไม่เกิน 10 ชั่วโมง กริดขนาด R^* ในช่วง 0.110 ถึง 0.171 จะเป็นขนาดกริดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองในครั้งนี้

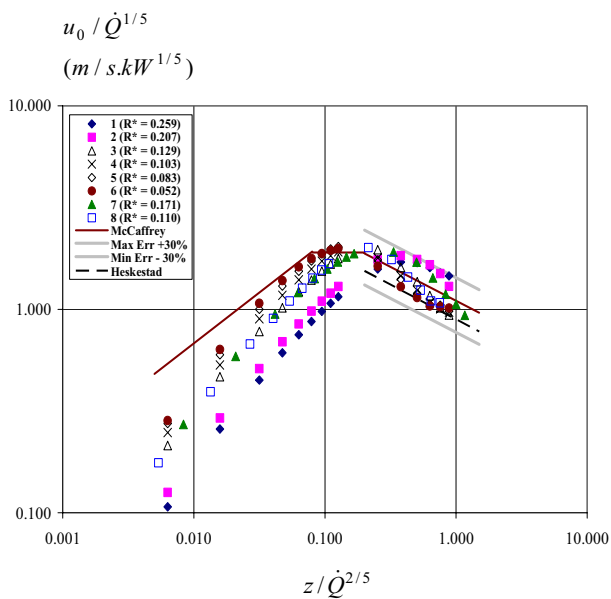
ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของลำควันในช่วงพลุ่ม ($z/\dot{Q}^{2/5} > 0.2$) และ เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (CPU time)

กรณี	R^*	Max %Error	Min % Error	CPU Time	หมายเหตุ
1	0.259	81%	53%	8 mins	
2	0.207	79%	61%	24 mins	
3	0.129	27%	0%	2 hrs 28 mins	Optimum
4	0.103	16%	2%	6 hrs 1 min	Optimum
5	0.083	18%	10%	15 hrs 14 mins	
6	0.052	28%	21%	21 hrs 1 min	
7	0.171	27%	5%	2 hrs	Optimum
8	0.110	28%	2%	1 hrs 45 mins	Optimum

Ma และ Quintiere พบว่า $R^* = 0.05$ จะให้ผลการคำนวณอุณหภูมิของลำควันในช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (continuous flame) มี

ความแม่นยำสูงสุด ทั้งนี้เพราะขนาดของกริดสามารถจำลองพฤติกรรม
 การเผาไหม้ของเปลวไฟได้ อย่างไรก็ตามในการจำลองเปลวไฟใหม่ของ
 อาคารซึ่งมีโดเมนของการคำนวณขนาดใหญ่ (8 m x 8 m x 10 m ใน
 การคำนวณนี้ จนถึง 30 m x 60 m x 20 m ในการคำนวณอาคารทั้ง
 หลัง) R^* ค่าดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากจะต้องเสียเวลาในการ
 คำนวณมากเนื่องจากมีจำนวนปริมาตรจำกัดมาก นอกจากนี้ผลการ
 คำนวณที่สนใจในการจำลองเปลวไฟใหม่ของอาคารจะอยู่ในช่วงพุ่มซึ่ง
 เราสามารถใช้ขนาดของกริดที่ใหญ่กว่าได้เนื่องจากในช่วงพุ่มมี
 length scale ที่ใหญ่กว่าในช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง

รูปที่ 6 แสดงกราฟระหว่างความเร็วของลำควันกับพารามิเตอร์
 $z/\dot{Q}^{2/5}$ ในช่วงพุ่มความเร็วของลำควันคำนวณจาก FDS มี
 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในช่วง $\pm 30\%$ ของขนาดกริดทุก
 ค่า R^* ในช่วงพุ่มความเร็วของลำควันมีค่าลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น
 ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิลดลงของควันจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น
 เนื่องจากควันมีการผสมกับอากาศโดยรอบมากขึ้นทำให้ควันเจือจางลง
 เมื่ออุณหภูมิลดลง แรงลอยตัวจะมีค่าลดลงทำให้ความเร็วของ
 ควันลดลงผกผันกับความสูง



รูปที่ 6 กราฟ $u_0 / \dot{Q}^{1/5}$ กับ $z / \dot{Q}^{2/5}$

5. สรุป

การศึกษานี้ใช้กริดขนาด R^* เท่ากับ 0.052 ถึง 0.252 ในการ
 คำนวณ เมื่อนำผลการคำนวณจาก FDS เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิตั้ง
 และความเร็วของลำควันซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ได้จากการทดลอง
 ในช่วงพุ่มพบว่ากริดขนาด R^* ในช่วง 0.110 ถึง 0.171 สามารถใช้
 ในการคำนวณได้เหมาะสมที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. McGrattan, K. and G. Forney, *Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide*. 2004, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.

2. McGrattan, K., *Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide*. 2004, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
 3. McCaffrey, B.J., *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. 1979, National Bureau of Standards: Gaithersburg, MD.
 4. Heskestad, G., *Chapter 2-2 Fire Plumes*, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, P.J. DiNenno, Editor. 1995, National Fire Protection Association: Quincy, MA.
 5. 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.