

การศึกษาพฤติกรรมเพลิงไหม้ของถังเก็บน้ำมันดีเซลขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข A Numerical Study of a Large Diesel Oil Tank Fire

กิตติสันต์ ศิวรานนท์¹ ณัฐศักดิ์ บุญมี²

¹ นิสิตหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
โทร 0-2940-5070, 08-1842-0415 โทรสาร 0-2940-5070 อีเมล kittisons@gmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
โทร 0-2942-8555 โทรสาร 0-2576-4576 อีเมล fengnab@ku.ac.th

Kittison SIWARANON¹, Nathasak BOONMEE²

¹ Graduate Student in Master of Engineering Program, Fire Protection Engineering, Kasetsart University,
Bangkok, 10900, Thailand, Tel: 0-2940-5070, 08-18420415 Fax: 0-2940-5070, E-mail: kittisons@gmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand,
Tel: 0-2942-8555, Fax: 0-2576-4576, E-mail: fengnab@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้ และการแพร่กระจายของควันจากการจำลองเพลิงไหม้ถังเก็บน้ำมันดีเซลขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 46 เมตร สูง 22.5 เมตร ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Fire Dynamics Simulator (FDS) ที่พัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา การจำลองได้ดำเนินการสำหรับเพลิงไหม้ที่ด้านบนของถังเก็บน้ำมัน มีอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง 2.5 จิกะวัตต์ ใน 3 สถานการณ์ คือ สถานการณ์ไม่มีลม สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วปานกลาง 2 เมตร/วินาที และสถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที การศึกษาผลกระทบของขนาดกริดต่อผลการจำลองโดย FDS พบว่าในสถานการณ์ที่ไม่มีลม ขนาดกริดในเทอม R^* เท่ากับ 0.1095 จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงลำควันไม่เกิน 26 เปอร์เซ็นต์ ผลการจำลองในสถานการณ์ที่มีลม พบว่าควันแพร่กระจายไปตามทิศทางลมในระยะทางที่มากขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ซึ่งในสถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านถังน้ำมันด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที ควันที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 50 องศาเซลเซียส สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลมากกว่า 150 เมตร ในขณะที่สารพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, และเขม่าในระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลประมาณ 60 เมตร จากกองเพลิง ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากเหตุการณ์เพลิงไหม้ถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่ได้

Abstract

The objective of paper is to numerically investigation fire and smoke spread behaviors of a large diesel oil storage tank fire. The numerical simulations were performed for a large diesel oil storage tank of 46 m diameter and 26 m height. The simulations were performed by a Computational Fluid Dynamics (CFD) fire model called Fire Dynamic Simulator (FDS) developed by National Institute of Standards and Technology (NIST) USA. The fires were assumed to be on the tank top with energy released rate of approximately 2.5 GW. Three fire scenarios were considered: a fire with no wind, a fire with moderate wind of 2 m/s, and a fire with strong wind of 12 m/s. Grid refinement studies were performed for the fire with no wind case to investigate grid effects to the numerical results. The grid refinement studies showed that in term of dimensionless grid size R^* of 0.1095, the average error in the plume region was less than 26 %. The numerical simulations with the wind blow cases showed that the smoke spread distance increased as the wind speed increased. In the strong wind case, the hot smoke gases of 50°C could spread away up to about 150 m and toxic gases such as CO₂, CO, and soot could spread away up to about 60 m downstream from the fire base. The results from this study can be used as an approximate outline for risk assessments of the hazards generated by large outdoor industrial fires.

1. บทนำ

การเกิดเพลิงไหม้ถึงเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ในคลังน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นสถานการณ์รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ ซึ่งถ้าเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นมาครั้งใดแล้ว ย่อมก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตมนุษย์ทรัพย์สิน และเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเหตุการณ์เพลิงไหม้คลังน้ำมันเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศ เช่น เหตุการณ์เพลิงไหม้คลังน้ำมันไทยออยล์ จ.ชลบุรี เมื่อวันที่ 2 ธันวาคม 2542 ซึ่งมีผู้เสียชีวิต 7 ราย ผู้ได้รับบาดเจ็บ 17 ราย ความเสียหายต่อทรัพย์สินรวมมูลค่าทั้งสิ้นประมาณ 600 ล้านบาท [1] และเหตุการณ์เพลิงไหม้คลังน้ำมัน Buncefield ประเทศอังกฤษ เมื่อวันที่ 11 ธันวาคม 2548 เป็นเหตุเพลิงไหม้คลังน้ำมันล่าสุดที่เกิดขึ้น ทำให้มีผู้บาดเจ็บ 43 ราย และผู้ที่ต้องอพยพหนีภัย 2,000 ราย ตลอดจนทรัพย์สินเสียหายจำนวนมาก รวมไปถึงเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทรัพยากรธรรมชาติอีกด้วย [2]

ปัจจุบันการใช้แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD fire modeling) ในการประเมินสถานะเกิดเพลิงไหม้เพื่อประเมินความเสี่ยงได้ใช้กันกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีความสามารถหลายอย่าง รวมถึงความสามารถในการคำนวณเกี่ยวกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของควันอันเนื่องมาจากเพลิงไหม้มีเช่น FLUENT, SOFIE, CFX, PHOENICS, STAR-CD, และ FDS (Fire Dynamics Simulator) เป็นต้น ในบรรดาโปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นนี้ FDS เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหาด้านอัคคีภัย [3] จาก National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้จากถังเก็บน้ำมันดีเซลขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 46 เมตร สูง 22.5 เมตร ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Fire Dynamics Simulator (FDS) ในการศึกษาวิจัยกำหนดให้เกิดเพลิงไหม้ด้านบนของถังเก็บน้ำมันดีเซล โดยมีอัตราการปล่อยพลังงานความร้อน 2.5 จิกะวัตต์ ใน 3 สถานการณ์ คือ สถานการณ์ไม่มีลม, สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วปานกลาง 2 เมตร/วินาที, และสถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที โดยความเร็วลมนำข้อมูลมาจาก [4] การจำลองได้ดำเนินการในโดเมนการคำนวณขนาด 200 เมตร x 250 เมตร x 200 เมตร

2. ทฤษฎี

2.1 แบบจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย (Fire Dynamics Simulator)

FDS ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่ของของไหล และสมการพลังงานของของไหล [5] ซึ่งประกอบไปด้วย

- สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass Equation)

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

- สมการอนุรักษ์สปีชีส์ (Conservation of Species Equation)

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

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation)

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

- สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Equation)

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

โดย FDS ใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) ซึ่งใช้ Subgrid Scale Model ของ Smagorinsky สำหรับจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนในส่วนของกริดเผาไหม้ เพื่อแก้ปัญหาขนาดกริดที่ไม่สามารถทำให้ละเอียดเพียงพอที่จะจำลองพฤติกรรมเพลิงไหม้ในโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ และ FDS ใช้แบบจำลอง Mixture Fraction Based Infinitely Fast Chemical Reaction บนสมมติฐานว่าอัตรา การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศ ถูกควบคุมโดยอัตราที่เชื้อเพลิงกับอากาศผสมเข้าด้วยกัน (Mixed Controlled) ทันทีที่เชื้อเพลิงกับอากาศผสมกัน เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็ว (Infinitely Fast Chemical Reaction) ได้เป็นก๊าซผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

ทั้งนี้ในการจำลองเพลิงไหม้ภายนอกอาคาร (Fires and Flow in Outdoor) [6] FDS สามารถกำหนดให้มีลมเคลื่อนที่ผ่าน เพื่อให้การจำลองสอดคล้องกับสถานการณ์จริงมากยิ่งขึ้น

2.2 ตัวแปรไร้มิติในการจำลองเพลิงไหม้ (Dimensionless Parameters in Fire Phenomenon)

การศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้ในเทอมของตัวแปรไร้มิติ ได้มีการใช้ตัวแปรไร้มิติ R^* เป็นขนาดกริดที่รวมผลกระทบของอัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงมาพิจารณาด้วย [7] โดยตัวแปรไร้มิติ R^* หาได้จาก

$$R^* = \frac{\Delta z}{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5}} \quad (6)$$

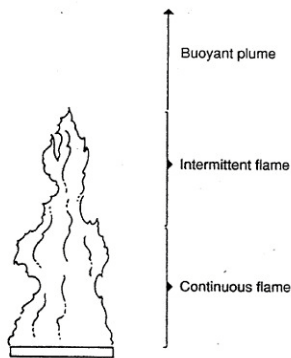
โดย R^* คือ ขนาดของกริดในเทอมตัวแปรไร้มิติ, Δz คือ ขนาดของกริด, ρ_∞ , T_∞ และ C_p คือ ความหนาแน่น, อุณหภูมิ และความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่อุณหภูมิห้อง และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า 9.81 เมตร/วินาที²

Ma และ Quintiere พบว่า $R^* = 0.05$ จะให้ผลการคำนวณอุณหภูมิของลำควันในช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (Continuous Flame) มีความแม่นยำสูงสุด ทั้งนี้เพราะขนาดของกริดสามารถจำลองพฤติกรรม

การเผาไหม้ของเปลวไฟได้ อย่างไรก็ตามในการจำลองเปลวไฟใหม่กับ สิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่ดังเช่นถังน้ำมันเชื้อเพลิงในการศึกษาวิจัยนี้ ค่า R' ดังกล่าวอาจไม่เหมาะสม เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการคำนวณนาน เพราะกรณีมีขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้ผลการคำนวณที่สนใจจะอยู่ในช่วงลำควัน (Plume) ซึ่งสามารถใช้ขนาดกริดที่ใหญ่กว่าได้ เพราะในช่วงลำควันมี Length Scale ขนาดที่ใหญ่กว่าช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง

2.3 ทฤษฎีของลำควัน (Plume Theory)

ลำควัน (Plume) คือ ลำของควันร้อนซึ่งเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ลอยตัวขึ้นไปในแนวดิ่ง เนื่องจากแรงลอยตัวที่เกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างของควัน และอากาศ สำหรับลำควันแบบสมมาตร (Axisymmetric Plume) ดังรูปที่ 1 โดย Karlsson and Quintiere [8] กล่าวว่า McCaffrey ได้แบ่งช่วงของลำควัน เป็น 3 ช่วง คือ



รูปที่ 1 ลำควันสมมาตร (Axisymmetric Plume), นำมาจาก [8]

1. ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (Continuous Flame) คือ ช่วงความสูงจากผิวหน้าของกองเพลิง จนถึงระดับสูงสุดที่มีเปลวไฟปรากฏอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เนื่องจากเป็นช่วงที่เชื้อเพลิง และอากาศเกิดการเผาไหม้ อุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้จึงมีค่าสูง โดยประมาณจะเท่ากับอุณหภูมิของเปลวไฟ

2. ช่วงเปลวไฟบางส่วน (Intermittent Flame) คือ ช่วงความสูงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเกือบจะสมบูรณ์ ทำให้มองเห็นเปลวไฟเพียงบางส่วนไม่ต่อเนื่อง ความเร็วของการไหลในแนวดิ่งของลำควันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ การไหลเดิมของอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับควันทำให้อัตราไหลของควันเพิ่มขึ้นตามความสูง

3. ช่วงลำควัน (Plume) คือ ช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเสร็จสมบูรณ์ ดังนั้นในช่วงนี้ประกอบไปด้วยควันร้อน และอากาศที่ไหลเติมจากบรรยากาศโดยรอบ ความเร็ว และอุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้จะแปรผกผันกับความสูง เนื่องจากมีอากาศซึ่งเย็นกว่าโดยรอบไหลเข้ามาผสมจึงจะทำให้ควันเย็นลง

จากการศึกษาพฤติกรรมของลำควัน McCaffrey เสนอสมการที่ได้จากการทดลอง เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิที่ระดับความสูงต่างๆ ตามแนวแกนของลำควัน (Plume Centerline) ดังนี้

- ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง เมื่อ $\frac{z}{Q^{2/5}} < 0.08$

$$\Delta T_0 = 2.9T_\infty \quad (7)$$

- ช่วงเปลวไฟบางส่วน เมื่อ $0.08 < \frac{z}{Q^{2/5}} < 0.2$

$$\Delta T_0 = 0.227 \left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right) T_\infty \quad (8)$$

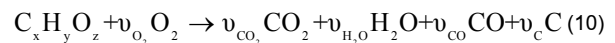
- ช่วงลำควัน เมื่อ $\frac{z}{Q^{2/5}} > 0.2$

$$\Delta T_0 = 0.076T_\infty \left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z} \right)^{5/3} \quad (9)$$

โดย T_0 คือ อุณหภูมิของลำควันมีหน่วยเป็นเคลวิน, T_∞ คือ อุณหภูมิบรรยากาศ, z คือ ความสูงในแนวดิ่งวัดจากผิวหน้าของ เชื้อเพลิง และ $\dot{Q}$ คือ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์

2.4 อันตรายของผลผลิตที่เกิดจากการเผาไหม้

ผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนนั้น จะประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ, คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า [6] ตามสมการเคมี คือ



ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า ยกเว้นน้ำ เป็นสารพิษ ถ้าได้รับเข้าสู่ร่างกายจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งกระทรวงมหาดไทย [9] และ NOISH [10] ได้กำหนดปริมาณความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศของการทำงานโดยเฉลี่ยที่คนสามารถทำงานได้โดยไม่เกิดอันตรายคือ Threshold Limit Value – Time Weight Average (TLV - TWA) เป็นค่า เฉลี่ยความเข้มข้นของสารสำหรับการทำงานปกติ 8 ชั่วโมง/วัน และ 40 ชั่วโมง/สัปดาห์ ดังนี้

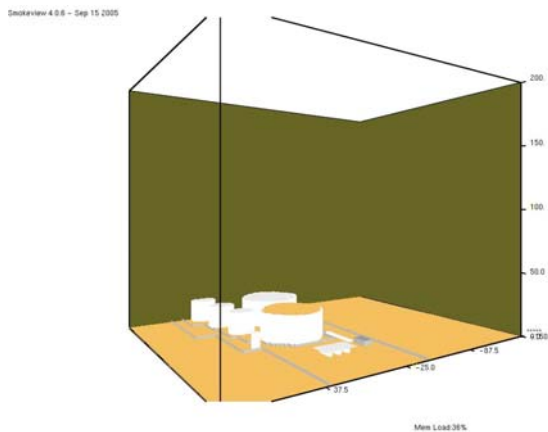
ตารางที่ 1 ค่ามาตรฐานสารพิษในบรรยากาศที่คนสามารถทำงานได้

สารเคมี	ปริมาณ	
	ส่วนในล้านส่วน (ppm)	มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร
คาร์บอนไดออกไซด์	5,000	9,000
คาร์บอนมอนอกไซด์	50	55
เขม่า	-	3.5

นอกจากนี้ความร้อนยังเป็นอันตรายอีกอย่างหนึ่ง ดังนั้นกระทรวงแรงงาน [11] จึงได้ประกาศใช้กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549 กำหนดให้มีการควบคุม และรักษาระดับความร้อนในการทำงานลักษณะงานเบา งานปานกลาง และงานหนักมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 34, 32 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ถ้าในสถานที่ทำงานมีอุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนดไว้ นายจ้างจะต้องให้ลูกจ้างสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล เพื่อป้องกันมิให้ร่างกายมีอุณหภูมิสูงเกิน 38 องศาเซลเซียส

3. การสร้างแบบจำลองเพลิงไหม้

แบบจำลองเพลิงไหม้สร้างจากการเขียน Input File ในโปรแกรม Notepad โดยกำหนดโดเมนการคำนวณขนาด 200 เมตร x 250 เมตร x 200 เมตร ภายในประกอบไปด้วยกลุ่มถังน้ำมัน และอาคารบางส่วน ซึ่งจำลองจากคลังน้ำมันเชื้อเพลิงแห่งหนึ่ง กำหนดให้เกิดเพลิงไหม้ ด้านบนของถังเก็บน้ำมันดีเซล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46 เมตร สูง 22.5 เมตร เป็นเวลา 180 วินาที มีอัตราการปล่อยพลังงานความร้อน 2.5 จิกะวัตต์ ใน 3 สถานการณ์ คือ สถานการณ์ไม่มีลม สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วปานกลาง 2 เมตร/วินาที และ สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที มีอุณหภูมิบรรยากาศ 28.22 องศาเซลเซียส ตามข้อมูลจาก [4] โดย แบ่ง เป็น Input Files สำหรับศึกษาผลกระทบของขนาดกริด (Grid Refinement Study) ต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณของ FDS จากอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควัน และ Input files สำหรับ ศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้



รูปที่ 2 แบบจำลองคลังน้ำมันภายในโดเมนที่กำหนด

3.1 Input Files สำหรับศึกษาผลกระทบของขนาดกริด

การศึกษาผลกระทบของขนาดกริดใช้สถานการณ์ที่ไม่มีลม โดยทำการคำนวณด้วย FDS ซึ่งกำหนด Input Files จำนวน 5 กรณี ตามรายละเอียดแสดงไว้ใน ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียด Input Files จำนวน 5 กรณี

กรณี	จำนวนกริด	ขนาดกริด (เมตร)	R*
1	40 x 40 x 40	5.000	0.2737
2	50 x 50 x 50	4.000	0.2189
3	64 x 64 x 64	3.125	0.1710
4	80 x 80 x 80	2.500	0.1368
5	100 x 100 x 100	2.000	0.1095

โดยกำหนด Thermocouple เพื่อศึกษาค่าอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควันเหนือผิวเชื้อเพลิง จำนวน 18 จุด ใน Input Files

3.2 Input Files สำหรับศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของควัน

การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของควัน พิจารณาคัดเลือก Input File จำนวน 1 กรณีจากการศึกษาผลกระทบของขนาดกริดที่มีความถูกต้องแม่นยำที่เหมาะสม และกำหนดให้มีลมเคลื่อนที่ผ่านซึ่งใช้ความเร็วลมเฉลี่ย และทิศทางการเคลื่อนที่ของลมจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือตามข้อมูลจาก [4] โดยจำลองเพลิงไหม้ใน 3 สถานการณ์ ดังรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียด Input Files จำนวน 3 สถานการณ์

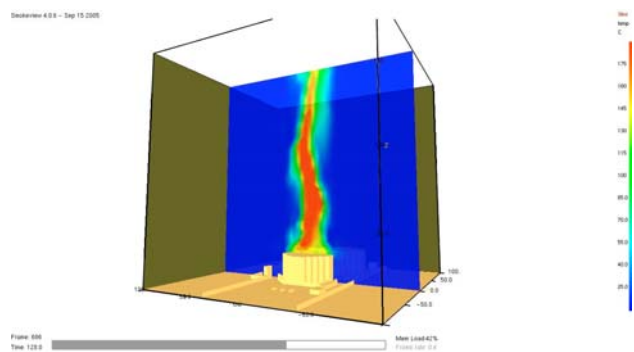
สถานการณ์ที่	สถานการณ์ที่กำหนด	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)
1	ไม่มีลม	0
2	ลมความเร็วปานกลาง	2
3	ลมความเร็วมากที่สุด	12

โดยกำหนด Thermocouple เพื่อศึกษาค่าอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควันเหนือผิวเชื้อเพลิง จำนวน 18 จุด ใน Input Files และศึกษาการแพร่กระจายตัวของควัน รวมถึงผลกระทบของผลผลิตที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

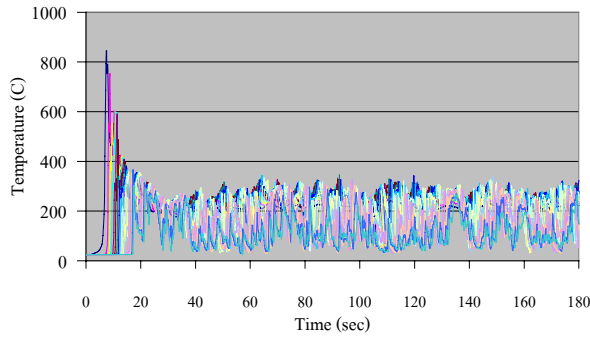
4.1 การเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดกริด (Grid Refinement Study)

จากการสังเกตุ Input Files 5 กรณี ที่มีขนาดกริดต่างกันด้วยโปรแกรม FDS ได้ภาพการจำลองเพลิงไหม้ตามตัวอย่างภาพจากกรณี ที่ 2 ในรูปที่ 3



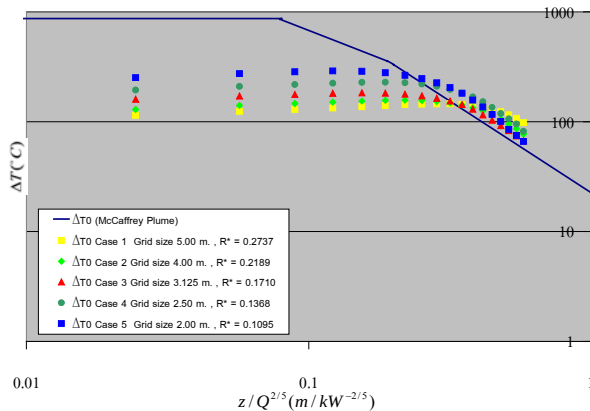
รูปที่ 3 การจำลองเพลิงไหม้กรณีที่ 2 แสดงอุณหภูมิแกน x = 0 วินาทีที่ 128.0 จำนวนกริด 50 x 50 x 50 ขนาดกริด 4.0 เมตร

และพบว่าทั้ง 5 กรณีจะใช้เวลาประมาณ 20 วินาที เพื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) จนเริ่มคงตัวตั้งแต่วันที่ 30 ดังตัวอย่างจากกรณี ที่ 4 ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุณหภูมิตามแนวแกนของลำควันที่ความสูงต่างๆ ของกรณีที่ 4 จำนวนกริด 80 x 80 x 80 ขนาดกริด 2.5 เมตร

โดยแสดงค่าอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควัน จากผลการคำนวณ ทั้ง 5 กรณี เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณตามสมการของ McCaffrey ได้ตามภาพที่ 5



รูปที่ 5 ผลต่างของอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควันเฉลี่ยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณตามสมการของ McCaffrey

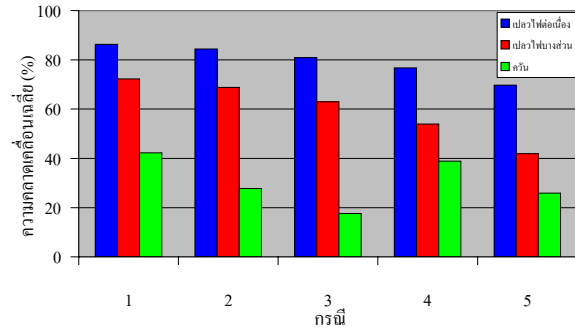
จากรูปที่ 5 พบว่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากโปรแกรม FDS มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่คำนวณตามทฤษฎีลำควันของ McCaffrey ซึ่งกรณีที่มีกริดขนาดเล็ก อุณหภูมิที่คำนวณได้จากโปรแกรม FDS จะเข้าใกล้อุณหภูมิที่คำนวณจากสมการของ McCaffrey

สำหรับการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของผลการคำนวณ จากโปรแกรม FDS ทั้ง 5 กรณี ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Average Error) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\% \text{Average_Error} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_i - Y_i|}{Y_i} \right) \times 100\%}{n} \quad (11)$$

โดย X และ Y เป็นอุณหภูมิของลำควันที่คำนวณได้จากโปรแกรม FDS และสมการของ McCaffrey ตามลำดับ ได้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกช่วงลำควันของข้อมูลค่าสั่ง 5 กรณี คือ 53.80%, 43.17%, 34.70%, 46.43% และ 34.33% ตามลำดับ พบว่าค่าความคลาด

เคลื่อนเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อกริดมีขนาดเล็กลง ซึ่งในกรณีที่ 5 จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาเฉพาะในช่วงควันพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูล ค่าสั่ง 5 กรณี คือ 42.24%, 27.75%, 17.57%, 38.87% และ 25.88% โดยกรณีที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด



รูปที่ 6 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควันของ Input Files 5 กรณี

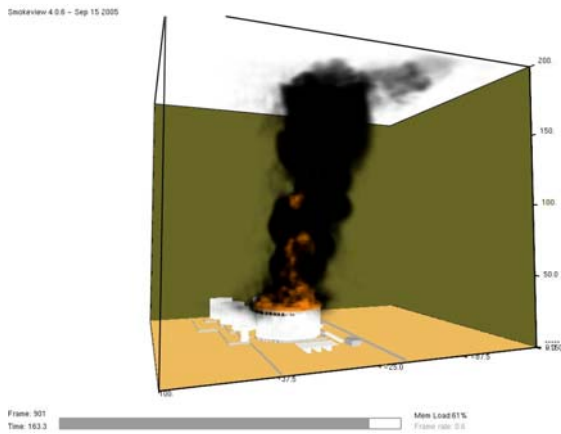
Input File ที่มีกริดขนาดเล็ก จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการของ McCaffrey เนื่องจากขนาดกริดที่ละเอียดมากขึ้น ทำให้จำลองกระบวนการผสม และแพร่ (Mixing and Diffusion Process) ของเชื้อเพลิงกับอากาศที่มาตราส่วน (Length Scale) ขนาดเล็กได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ทำให้อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ มีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองของ McCaffrey และจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของ Input File และค่า R^* ในแต่ละกรณีนั้นพบว่ากริดคำนวณด้วยกริดขนาดเล็ก (Fine Grid) มีแนวโน้มที่ให้ผลการคำนวณที่แม่นยำสูงกว่าการใช้กริดขนาดใหญ่ (Coarse Grid) เนื่องจากสามารถคำนวณสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนของควัน และการเผาไหม้ของเปลวไฟได้ในมาตราส่วนที่มีขนาดเล็ก แต่การใช้กริดขนาดเล็กจะต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย

การศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของขนาดกริด ในเทอมของตัวแปรไร้มิติ R^* พบว่าในกรณีที่ 5 ที่มีจำนวนกริด 100 x 100 x 100 ขนาดกริด 2.0 เมตร และ R^* เท่ากับ 0.1095 จะให้ผลการคำนวณของอุณหภูมิมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุด และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในช่วงลำควันไม่เกิน 26% จึงเลือกกรณีนี้ในการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของไฟตามแบบจำลองเพลิงไหม้

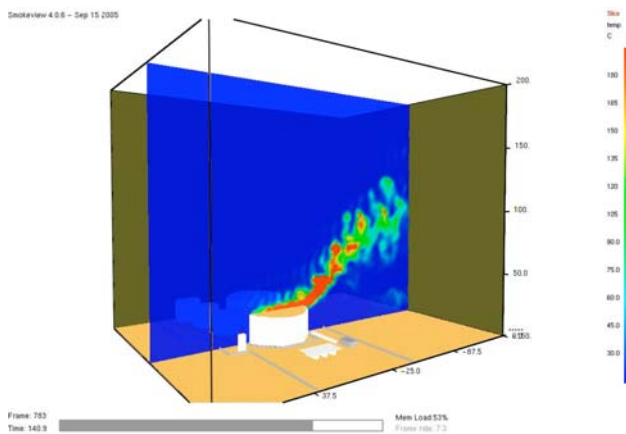
4.2 พฤติกรรมการกระจายตัวของควัน

4.2.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิตามแนวแกนของลำควัน

จากการสั่งคำนวณ Input Files 3 สถานการณ์ ที่มีการเคลื่อนที่ผ่านของลมด้วยความเร็วต่างกันด้วยโปรแกรม FDS ได้ภาพการจำลองเพลิงไหม้ตามตัวอย่างภาพจากสถานการณ์ที่ 2 ในรูปที่ 7 และสถานการณ์ที่ 3 ในรูปที่ 8



รูปที่ 7 การจำลองเพลิงไหม้สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วปานกลาง 2 เมตร/วินาที วินาทีที่ 163.3



รูปที่ 8 การจำลองเพลิงไหม้สถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที แสดงอุณหภูมิแกน $x = 0$ วินาทีที่ 140.9

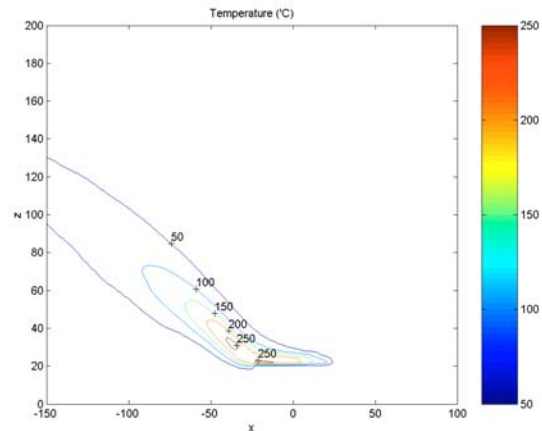
4.2.2 ผลการคำนวณในสภาวะคงตัว (Steady State)

ภายหลังได้ข้อมูลผลการคำนวณ (Output Files) จากการคำนวณด้วยโปรแกรม FDS แล้ว นำข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลของพฤติกรรมการกระจายตัวของควัน และผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน (Combustion Products for Burning Hydrocarbon) คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และเขม่า (Soot) ทำการเปลี่ยนแปลงเป็นข้อมูลชนิดข้อความ (Text File) โดยใช้โปรแกรม `fds2ascii` ที่ถูกติดตั้งลงในคอมพิวเตอร์พร้อมกับการติดตั้งโปรแกรม FDS หลังจากนั้นนำข้อมูลชนิดข้อความไปทำการเขียนกราฟด้วยโปรแกรมเฉพาะด้านกราฟิก เนื่องจากข้อมูลชนิดข้อความที่ได้มีข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการคำนวณในสภาวะคงตัวภายในกริดทุกกริดของพื้นที่ของระนาบ $x = 0$ โดยการเขียนกราฟจากข้อมูลข้างต้น มีดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ผลกระทบจากพฤติกรรมการกระจายตัวของควัน

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม FDS พบว่าควันที่เกิดขึ้นจากการจำลองเพลิงไหม้ จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงในบริเวณใกล้ถังน้ำมัน และจะลด

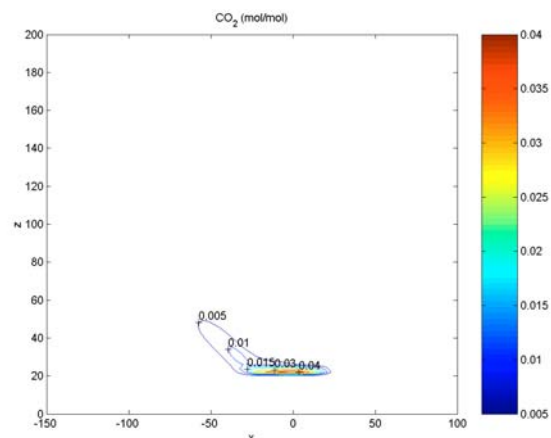
ลงเมื่อมีระยะห่างออกไป โดยพบว่าการจำลองในสถานการณ์ที่ไม่มีลม ควันที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นด้านบน และในสถานการณ์ที่มีลม ควันจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมในระยะทางที่มากขึ้น เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น โดยสถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที พบว่าควันที่มีอุณหภูมิเกิน 50 องศาเซลเซียส แพร่กระจายไปได้มากกว่า 150 เมตร ดังรูปที่ 9



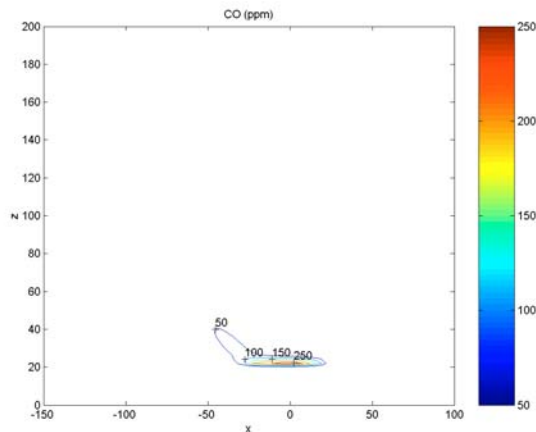
รูปที่ 9 อุณหภูมิตามระนาบแกน $x = 0$ ของสถานการณ์ที่ 3 ความเร็วลมมากที่สุด 12 เมตร/วินาที

4.2.2.2 ผลกระทบจากผลผลิตที่เกิดจากการเผาไหม้

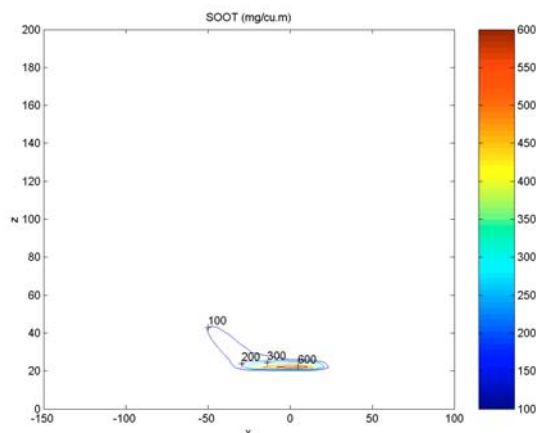
ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม FDS พบว่าผลผลิตจากการเผาไหม้คือ คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า พบว่าสารพิษที่เกิดขึ้นจากการจำลองเพลิงไหม้ จะมีปริมาณเฉลี่ยสูงในบริเวณใกล้ถังน้ำมัน และจะลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไป โดยพบว่าการจำลองในสถานการณ์ที่ไม่มีลมพบว่าการจำลองในสถานการณ์ที่ไม่มีลม สารพิษที่เกิดขึ้นจะลอยขึ้นด้านบน และในสถานการณ์ที่มีลม สารพิษจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางลมในระยะทางที่มากขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น โดยในสถานการณ์ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุด 12 เมตร/วินาที พบว่าสารพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่า แพร่กระจายไปได้ ประมาณ 60 เมตร ดังรูปที่ 10, 11 และ 12



รูปที่ 10 คาร์บอนไดออกไซด์ตามระนาบแกน X = 0 ของสถานการณ์ที่ 3 ความเร็วลมมากที่สุด 12 เมตร/วินาที



รูปที่ 11 คาร์บอนมอนอกไซด์ตามระนาบแกน X = 0 ของสถานการณ์ที่ 3 ความเร็วลมมากที่สุด 12 เมตร/วินาที



รูปที่ 12 เขม่าตามระนาบแกน X = 0 ของสถานการณ์ที่ 3 ความเร็วลมมากที่สุด 12 เมตร/วินาที

5. สรุป

Input File ที่มีกริดขนาดเล็กให้ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากสมการของ McCaffrey มากกว่า Input File ที่มีกริดขนาดใหญ่กว่า และ Input File ที่มีกริดขนาดเล็กจะต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย

ในสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst Case) ที่มีลมเคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็ว 12 เมตร/วินาที คิวที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 50°C สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลมากกว่า 150 เมตร ในขณะที่สารพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ 5,000 ppm หรือ 0.005 โมล, คาร์บอนมอนอกไซด์ 50 ppm, และเขม่า 100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในระดับความเข้มข้นที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ตามมาตรฐานของกระทรวงมหาดไทย และ NIOSH สามารถแพร่กระจายไปได้ไกลประมาณ 60 เมตรจากกองเพลิง

6. ข้อเสนอแนะ

ระยะปลอดภัยจากเพลิงไหม้ถึงเก็บน้ำมันดีเซล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 46 เมตร สูง 22.5 เมตร จากผลการศึกษาคือควรมีอย่างน้อย 150 เมตร จากถึงน้ำมันที่เกิดเพลิงไหม้ ซึ่งจะปลอดภัยจากความร้อนและสารพิษที่เกิดจากการเผาไหม้

นอกจากนี้การเข้าไประงับเหตุเพลิงไหม้ถึงเก็บน้ำมัน ของเจ้าหน้าที่ดับเพลิง ถือเป็นการทำงานในลักษณะงานหนัก ซึ่งกระทรวงแรงงานกำหนดให้มีความร้อนในการทำงานไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส และจะต้องป้องกันไม่ให้ร่างกายมีอุณหภูมิสูงเกิน 38 องศาเซลเซียส ดังนั้นเจ้าหน้าที่ดับเพลิง จะต้องมีการสวมใส่ชุดดับเพลิงที่สามารถป้องกันอันตรายจากความร้อนได้ และต้องมีการสวมใส่หน้ากากป้องกันสารพิษด้วย โดยในการดับเพลิงที่ใช้ระยะเวลานานจะต้องมีการผลัด เปลี่ยนเจ้าหน้าที่ดับเพลิงให้มีการพักผ่อนด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการมาตรฐานการป้องกันอัคคีภัยสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, 2548. มาตรฐานการป้องกันอัคคีภัยสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- [2] Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006. The Buncefield Investigation Progress Report. <http://www.buncefieldinvestigation.gov.uk>.
- [3] McGrattan, K. and G. Forney, 2004. Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide. National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD.
- [4] ข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา, กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร.
- [5] McGrattan, K., 2005. Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology, Maryland.
- [6] McGrattan, K. and G. Forney, 2005. Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide. National Institute of Standards and Technology, Maryland.
- [7] Boonmee, N., 2007. Grid Refinement Study of Numerical Simulation of Axisymmetric Fire Plume. The Proceeding of 45th Kasetsart University Annual Conference p. 62-69.
- [8] Karlsson, B. and J. G. Quintiere, 1999. Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, Florida.
- [9] กระทรวงมหาดไทย, 2520. ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับสภาวะแวดล้อม (สารเคมี)
- [10] National Institute for Occupational Safety and Health, 1995. Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentration. www.cdc.gov/noish/homepage.html.
- [11] กระทรวงแรงงาน, 2549. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง