

**การศึกษาผลกระทบของความสูงระดับต่อความสามารถของ
อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนและควันด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
A Study of The Effect of Position Level on Heat and Smoke Detector
Performance by Computational Fluid Dynamics**

วรากร สังขะวร^{1*}, อภิชาติ แจ้งบำรุง²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย บัณฑิตวิทยาลัย

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹ E-mail : mykorakod@gmail.com *, ² E-mail : fengacc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาระยะห่างที่เหมาะสม สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) และอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) ในระดับความสูงที่ต่างกัน โดยเพดานเป็นฉนวนเรียบไม่มีคานเป็นสิ่งกีดขวาง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยใช้โปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) ที่พัฒนาโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของควันไฟ อุณหภูมิ และเวลาในการเริ่มทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ (Automatic Detectors) สำหรับการจำลองการเผาไหม้ กำหนดขนาดของห้องที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดกว้าง 18 เมตร ยาว 18 เมตร และเชื้อเพลิงมีขนาดกองเพลิง 1 ตารางเมตร ได้ถูกวางไว้ที่กึ่งกลางของพื้นด้านล่าง อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงมีขนาด 1000 kW อัตราการพัฒนาของเพลิงไหม้เป็นแบบรวดเร็ว การคำนวณได้กำหนดขนาดกริดในเทอมของตัวแปรไร้หน่วย R^* เท่ากับ 0.125 โดยใช้เวลาในการจำลองทั้งหมด 480 วินาที นับจากไฟลุกไหม้ ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการติดตั้ง อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่(Fixed Temperature Detector) และอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) ระดับความสูงเพิ่มขึ้น แนวโน้มของระยะห่างระหว่างติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับจะน้อยลง เพื่อที่จะคงไว้ในประสิทธิภาพสูงสุดของการแจ้งเตือนเหตุที่รวดเร็วอันจะเป็นผลต่อการลดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน

คำหลัก: อุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ, อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่, อุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง, โปรแกรมจำลองพฤติกรรมเพลิงไหม้

Abstract

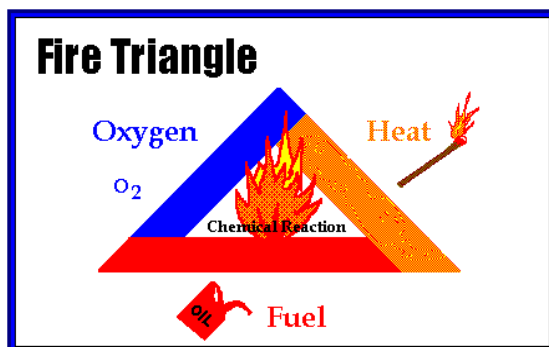
This research is to study an optimum distance for the installation of Fixed Temperature Detector and Photoelectric Smoke Detector on ceiling position levels by unconfined ceiling jet without beams. A numerical experiment is performed by CFD program called Fire Dynamics Simulation (FDS) which is developed by National Institute of Standards and Technology (NIST), USA to study the ceiling

jet behavior, temperature and activated time of Automatic Detectors. The simulation domain of combustion is arranged in 18m width by 18m length with 1Sq.mm. fire source is placed at the center of the computation domain floor. While the heat release rate is 1000kW and growth rate is fast to used in the simulations. In the simulation, the optimum grid size in term of dimensionless variable R^* is 0.125 with 480s total simulation time. The research shown the increased ceiling height levels effects on Fixed Temperature Detector and Photoelectric Smoke Detector capability that the more higher of ceiling level tends to less the capability of Automatic Detectors. The high performance of alert will decrease the number of lose in both life and asset.

Keywords: Automatic Detectors, Fixed Temperature Detector, Photoelectric Smoke Detector, FDS

1. บทนำ

เมื่อกล่าวถึงอัคคีภัยหรือการเกิดเพลิงไหม้ ปัจจัย 4 อย่างที่เป็นองค์ประกอบมีความสัมพันธ์กันคือ เชื้อเพลิง (Fuel) ความร้อน (Heat) ออกซิเจนในอากาศ 21 % โดยปริมาตร (Oxygen) และ ปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) สามองค์ประกอบแรกจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดอัคคีภัย ส่วนองค์ประกอบสุดท้ายจะเป็นส่วนสำคัญให้เกิดการลุกลามของเพลิงไหม้



รูปที่ 1 อุปกรณ์องค์ประกอบพื้นฐานการเกิดไฟไหม้

การเกิดเพลิงไหม้เริ่มจากจุดเล็ก ๆ ก่อนที่จะขยายใหญ่ขึ้นมีความร้อนสูงขึ้นและลุกลามออกไปเรื่อย ๆ โดยเพลิงไหม้ทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้

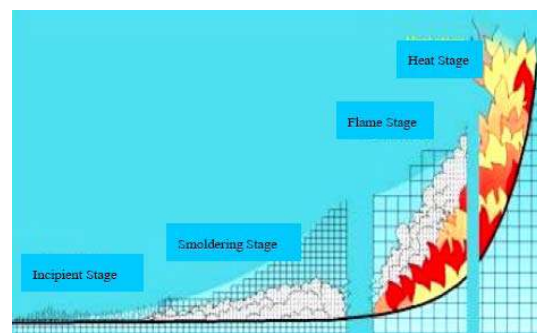
1.ระยะเริ่มต้น (Incipient Stage) ซึ่งระยะนี้เราจะไม่สามารถมองเห็นอนุภาคของควันไฟได้มากนัก และยัง

ไม่สามารถรู้สึกถึงความร้อน อุปกรณ์ตรวจจับที่เหมาะสมคือ อุปกรณ์ตรวจจับไอออน

2.ระยะเกิดควัน (Smoldering Stage) ระยะนี้เราเริ่มมองเห็นควันไฟบางแล้ว แต่ยังคงไม่สามารถมองเห็นเปลวไฟและยังไม่รู้สึกถึงความร้อน อุปกรณ์ตรวจจับที่เหมาะสมคือ อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟ

3.ระยะเกิดเปลวไฟ (Flame Stage) ระยะนี้เราสามารถมองเห็น ควันไฟ เปลวไฟ ชัดขึ้น และเริ่มรู้สึกถึงความร้อน อุปกรณ์ตรวจจับที่เหมาะสมคือ อุปกรณ์ตรวจจับเปลวไฟ

4.ระยะเกิดความร้อน (Heat Stage) ระยะนี้เราสามารถมองเห็นเปลวไฟ ควันไฟ โดยจะไม่สามารถควบคุมความร้อนได้ อากาศร้อนจะแผ่ขยายตัวออกไป อุปกรณ์ตรวจจับที่เหมาะสมคือ อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน



รูปที่ 2 แสดงพัฒนาการของการเกิดเพลิงไหม้

ระบบสัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัย (Fire Alarm System) เป็นระบบที่ใช้แจ้งเตือนภัย จากเหตุเพลิงไหม้ ในระยะเริ่มต้น เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิตรวมถึงลดความเสียหายของทรัพย์สินและโครงสร้างของอาคาร อีกทั้งยังเป็นข้อกำหนดของกฎหมายตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 การออกแบบระบบสัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัย โดยปกติจะอ้างอิงตามมาตรฐานสากลคือ NFPA (National Fire Protection Association) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นที่ยอมรับและถูกอ้างอิงมากที่สุดในปัจจุบัน สำหรับมาตรฐาน NFPA ที่เกี่ยวข้องว่าด้วยเรื่องระบบสัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัยคือ NFPA72, Nation Fire Alarm Code กำเนิดในปี ค.ศ.1898 โดยมีเนื้อหาครอบคลุมเรื่องการออกแบบ การใช้งาน การติดตั้ง การบำรุงรักษา เป็นต้นและยังมีการปรับปรุงตามวาระทุกๆ 3 ปี สำหรับการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการคือ การออกแบบโดยคำนึงถึงความปลอดภัยในชีวิตเป็นหลัก (Life Safety) และ การออกแบบโดยคำนึงถึงความมั่นคงของโครงสร้างอาคาร (Structure integrity of Building)

วิศวกรหรือผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจองค์ประกอบพื้นฐานของระบบสัญญาณเตือนอัคคีภัย(Fire Alarm System) ว่ามีองค์ประกอบอะไรบ้างเช่น แผงควบคุม (Fire Alarm Control Panel) แหล่งจ่ายไฟหลักและสำรองไฟ(Power Supply) อุปกรณ์เริ่มต้นสัญญาณ (Initiating Device) และ อุปกรณ์ แจ้งเตือนเหตุ (Notification Appliance) เป็นต้น เนื่องจากทุกองค์ประกอบมีความสำคัญทำงานสัมพันธ์ไปพร้อมๆกัน หากขาดสิ่งหนึ่งสิ่งใด ระบบจะไม่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์เริ่มต้นสัญญาณถือเป็นส่วนสำคัญเปรียบได้กับดวงตาในการสอดส่องความผิดปกติเมื่อจะเกิดเหตุเพลิงไหม้ การกำหนดระยะห่างการติดตั้งอุปกรณ์เริ่มต้นสัญญาณแบบอัตโนมัติ(Automatic Initiating Device) จึงถือเป็นความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปจะออกแบบตาม

สถาบันที่น่าเชื่อถือเช่น Underwriter Laboratories หรือ Factory Mutual สำหรับมาตรฐาน NFPA72, Nation Fire Alarm Code, 2013 Edition จะแนะนำไว้ในตารางที่ 17.6.3.5.1 หรือการคำนวณหาระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจจับในเชิงประสิทธิภาพในภาคผนวก B [1]

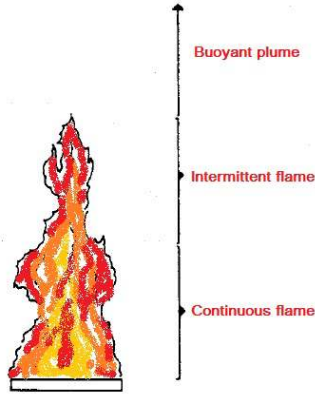
ตารางที่ 1 ค่าตัวคูณสำหรับระยะความสูงที่เพิ่มขึ้นตามมาตรฐาน NFPA72

Ceiling Height Greater than (>) m.	Up to and Including m.	Multiply Listed Spacing by
0	3.0	1.00
3.0	3.7	0.91
3.7	4.3	0.84
4.3	4.9	0.77
4.9	5.5	0.71
5.5	6.1	0.64
6.1	6.7	0.58
6.7	7.3	0.52
7.3	7.9	0.46
7.9	8.5	0.40
8.5	9.1	0.34

2. ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของลำควัน (Plume Theory)

ลำควันหรือ Plume คือลำของอากาศและแก๊สร้อนซึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการเผาไหม้ ลอยขึ้นไปตามแนวตั้งเนื่องจากแรงลอยตัว (buoyancy force) ซึ่งเกิดจากความหนาแน่นที่แตกต่างของควันและอากาศ ควันร้อนจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศเย็นรอบๆ จึงลอยตัวสูงขึ้นในแนวตั้ง ลำควันแบบสมมาตร (axisymmetric plume) ตามทฤษฎี McCaffrey Plum [2] จะแบ่งลำควันออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3



The three zones of the axisymmetric buoyant plume

รูปที่ 3 ลำควันสมมาตร (Axisymmetric plume) [2]

1) ช่วงเปลวไฟต่อเนื่อง (Continuous flame) คือ ช่วงความสูง ซึ่งวัดจากผิวหน้าของกองเพลิงจนถึงระดับสูงสุดที่มีเปลวไฟปรากฏอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาเนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงที่เชื้อเพลิง และ อากาศเกิดการเผาไหม้ อุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้จึงมีค่าสูง ซึ่งโดยประมาณการจะเท่ากับอุณหภูมิของเปลวไฟนั่นเอง ซึ่งเมื่อ $\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} < 0.08$ สามารถคำนวณความเร็ว และ อุณหภูมิได้ดังนี้

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

$$\Delta T_0 = 2.91T_\infty \quad (2)$$

2) ช่วงเปลวไฟบางส่วน (Intermittent flame) คือช่วงความสูง ที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเกือบจะสมบูรณ์ แล้วทำให้มองเห็นเปลวไฟปรากฏอยู่เพียงบางส่วนบางช่วงเวลาไม่ต่อเนื่อง ความเร็วการไหลแนวตั้งของลำควันจะมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเมื่อ $0.08 < \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} < 0.2$ สามารถคำนวณความเร็ว และ อุณหภูมิได้ดังนี้

$$u_0 = 1.9\dot{Q}^{1/5} \quad (3)$$

$$\Delta T_0 = 0.227\left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z}\right)T_\infty \quad (4)$$

3) ช่วงพลุ้ม (Buoyant Plume) คือ ช่วงที่การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นในช่วงนี้จะประกอบไปด้วยควันร้อนและอากาศ ซึ่งไหลเติมจากบรรยากาศโดยรอบเท่านั้น ความร้อน และ อุณหภูมิของลำควันในช่วงนี้ จะแปรผกผันกับความสูงเนื่องจากมีอากาศซึ่งเย็นกว่าโดยรอบ ไหลเข้ามาผสมเจือจางทำให้ควันเย็นลงซึ่งเมื่อ $\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} > 0.2$ สามารถคำนวณความเร็ว และ อุณหภูมิได้ดังนี้

$$u_0 = 1.1z^{-1/3}\dot{Q}^{1/3} \quad (5)$$

$$\Delta T_0 = 0.076T_\infty\left(\frac{\dot{Q}^{2/5}}{z}\right)^{5/3} \quad (6)$$

โดย T_0 คืออุณหภูมิของลำควัน (K) T_∞ คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม u_0 คือความเร็วของลำควัน (m/s) z คือความสูงในแนวดิ่งวัดจากผิวหน้าของเชื้อเพลิง และ $\dot{Q}$ คืออัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิง (kW) นอกจากสมการของ McCaffrey แล้ว Heskestad [3] ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณความเร็วและอุณหภูมิของลำควันในช่วงพลุ้ม ($z / \dot{Q}^{2/5} > 0.2$) โดย

$$u_0 = \left(\frac{\dot{Q}_c}{z - z_0}\right)^{1/3} \quad (7)$$

$$\Delta T_0 = 25\left(\frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{(z - z_0)}\right)^{5/3} \quad (8)$$

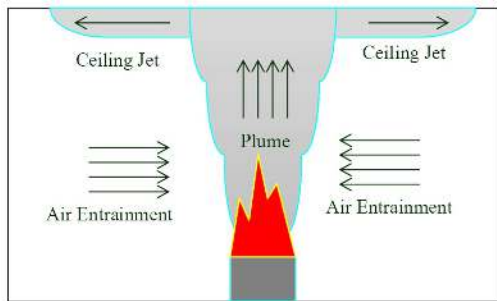
โดย

$$z_0 = 0.083\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (9)$$

เมื่อ $\dot{Q}_c$ คือ อัตราการปล่อยพลังงานความร้อนของกองเพลิงโดยการพาความร้อน (kW) โดย $\dot{Q}_c = 0.7\dot{Q}$ z_0 คือจุดกำเนิดเสมือน (virtual origin, m) และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางกองเพลิง (m) โดย $D = \sqrt{4A/\pi}$ A คือพื้นที่ของกองเพลิง (m²)

2.2 ทฤษฎีการไหลของควัน (Smoke Flow)

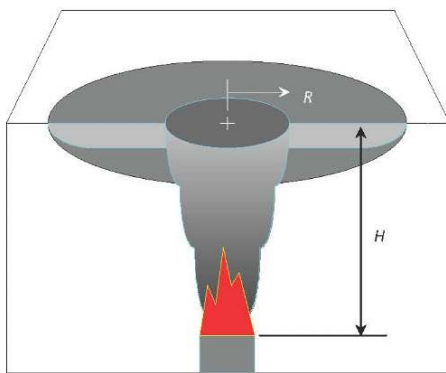
ลำควันหรือพวยม (Plume) จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยแรงลอยตัว (Buoyancy Force) เมื่อลอยขึ้นไปกระทบกับเพดาน ควันก็จะไหลกระจายออกโดยรอบตามแนวรัศมี เราจะเรียกลักษณะการไหลของควันใต้เพดานว่า ceiling jet ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลำควันและการไหลของควันใต้เพดาน (Ceiling Jet)

อุณหภูมิและความเร็วของควันที่ไหลใต้เพดานมีความสัมพันธ์โดยตรง กับเวลาตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับอัคคีภัย โดยการไหลของควันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คืออย่างอิสระและอย่างจำกัด สำหรับบทความนี้ไม่ขอกล่าวถึงกลุ่มควันไหลใต้เพดานแบบจำกัด

2.2.1 ควันไหลใต้เพดานอย่างอิสระ (Unconfined Ceiling Jet)



รูปที่ 5 กลุ่มควันไหลใต้เพดานแบบอิสระ (Unconfined Ceiling Jet)

การไหลของกลุ่มควันลักษณะนี้ ความลึกของคานามีผลกระทบต่อการกระจายตัวของกลุ่มควันน้อย ทำให้ควันสามารถกระจายตัวไปในแนวรัศมีได้อย่างอิสระ Alpert [4] ได้พบว่าระยะห่างจากกองเพลิง R มีผลต่อความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วในการไหลของควันโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วงคือ

ช่วงใกล้ลำควัน (near plume) เมื่อ $R/H < 0.18$ สำหรับอุณหภูมิ และ $R/H < 0.15$ สำหรับความเร็ว ได้สมการ จากการทดลองอุณหภูมิสูงสุดของควันใต้เพดานที่ระยะ R ดังนี้

$$\Delta T_{CJ} = \frac{16.9 \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{เมื่อ } R/H < 0.18 \quad (10)$$

$$u_{CJ} = 0.96 \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3} \quad \text{เมื่อ } R/H < 0.15 \quad (11)$$

ช่วงไกลลำควัน (far plume) เมื่อ $R/H > 0.18$ สำหรับอุณหภูมิและ $R/H > 0.15$ สำหรับความเร็ว

$$\Delta T_{CJ} = \frac{5.38 (\dot{Q}/R)^{2/3}}{H} \quad \text{เมื่อ } R/H > 0.18 \quad (12)$$

$$u_{CJ} = \frac{0.195 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{R^{5/6}} \quad \text{เมื่อ } R/H > 0.15 \quad (13)$$

โดย $\Delta T_{CJ} = T_{CJ} - T_{\infty}$ คือ ผลต่างอุณหภูมิของกลุ่มควันไหลใต้เพดานกับอุณหภูมิอากาศ u_{CJ} คือ ความเร็วในการไหลของกลุ่มควันไหลใต้เพดาน H คือ ความสูงจากกองเพลิงถึงเพดานในหน่วยเมตร

2.3 การคำนวณหาค่าระยะห่างในเชิงประสิทธิภาพ

Fire Detection Performance Design

ทฤษฎีพวยมของไฟและ ceiling jet model สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าอุณหภูมิและความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจจับ และนำมาคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนได้

จากการวิจัยของ Hollman [6] แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของส่วนตรวจจับเป็นสัดส่วนกับรากที่สอง ของความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านอุปกรณ์ตรวจจับเมื่อน้ำหนักพื้นผิวของส่วนตรวจจับและ thermal Capacity มีค่าคง ที่ที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ออกมาใน

รูปของ Response Time Index (RTI) ของอุปกรณ์ตรวจ
จับได้ดังนี้

$$RTI = \tau_0 u_0^{1/2} \quad (14)$$

โดยค่า τ_0 สามารถหาได้จากการทดลอง plunge test
ซึ่งจะสัมพันธ์กับระยะห่างที่กำหนดด้วย ส่วนค่าความเร็ว
อ้างอิงจะใช้ค่า $u_0 = 1.5 \text{ m/sec}$

การที่จะทำนายถึง การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับ
ความร้อนจะต้องทราบถึงลักษณะสภาพแวดล้อมโดยรอบ
ก่อน โดยตัวแปรที่มีความสำคัญคือ อุณหภูมิ และ ความ
เร็วของก๊าซร้อนที่อุปกรณ์ตรวจจับ จากการทดสอบแบบ
Full scale fire test และการใช้เทคนิคทางโมเดลคณิต
ศาสตร์ Hekestad และ Delichatsios [7] ได้กำหนด
สมการในการหาอุณหภูมิและความเร็วขึ้นมา เป็นไปตาม
ความสัมพันธ์แบบ Power law ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Q = \alpha_g^P \quad (15)$$

โดยที่ Q = อัตราการปลดปล่อยความร้อนของไฟ(kW)

α = อัตราการเติบโตของไฟ (kW/sec²)

t_g = ระยะเวลาการเติบโตของไฟจนมีอัตราการ
ปลดปล่อยความร้อนเท่ากับ 1055kW

P = ค่าคงที่ที่มีค่าเป็นบวก

โดยสมการที่ Hekestad และ Delichatsios [7] ได้
กำหนดขึ้นสำหรับหาอุณหภูมิและความเร็วของก๊าซร้อนมี
ดังนี้

$$u_p^* = \frac{u}{A^{1/(3+p)} \alpha^{1/(3+p)} H^{(p-1)/(3+p)}} \quad (16)$$

$$\Delta T_p^* = \frac{\Delta T}{A^{2/(3+p)} \left(\frac{T_a}{g}\right) \alpha^{2/(3+p)} H^{-(5-p)/(3+p)}} \quad (17)$$

$$t_p^* = \frac{tcr}{A^{-1/(3+p)} \alpha^{-1/(3+p)} H^{4/(3+p)}} \quad (18)$$

$$A = \frac{g}{C_p T_a \rho_o} \quad (19)$$

หลังจากนั้น Hekestad และ Delichatsios [8] ได้

ทำการวิจัยต่อ และกำหนดให้ค่าคงที่ (P) มีค่าเท่ากับสอง
และได้กำหนดสมการเพิ่มเติมขึ้นดังนี้

$$t_{2f}^* = 0.861(1 + \frac{r}{H}) \quad (20)$$

$$\Delta T_2^* = 0 \quad \text{เมื่อ } t_2^* < t_{2f}^* \quad (21)$$

$$\Delta T_2^* = \left[\frac{t_2^* - t_{2f}^*}{0.146 + 0.242 \frac{r}{H}} \right]^{4/3} \quad \text{เมื่อ } t_2^* \geq t_{2f}^* \quad (22)$$

$$\frac{u_2^*}{(\Delta T_2^*)^{1/2}} = 0.59 \left(\frac{r}{H} \right)^{-0.63} \quad (23)$$

จากการวิจัยของ Robert [8] สามารถนำสมการ
ของอุณหภูมิและความเร็วมาแทนค่าลงในสมการถ่ายเท
ความร้อน แล้วทำการอินทิเกรตจนได้สมการดังนี้

$$T_d(t) - T_d(0) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_2^P} \right) \Delta T_2^P \left[\frac{1 - (1 - e^{-Y})}{Y} \right] \quad (24)$$

โดยที่

$$Y = \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{u}{u_2^*} \right)^{1/2} \left[\frac{u_2^*}{\Delta T_2^{*1/2}} \right]^{1/2} \left(\frac{\Delta T_2^*}{RTI} \right) \left(\frac{tcr}{t_2^*} \right) D \quad (25)$$

$$D = 0.146 + 0.242 \frac{r}{H} \quad (26)$$

การคำนวณในหัวข้อ 2.3 นี้ ตั้งแต่สมการที่(14) จน
ถึง (26) เป็นการคำนวณเพื่อใช้หาระยะเชิงประสิทธิภาพ
ของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อน [10] เท่านั้น

สำหรับการคำนวณหาค่าเวลาการตอบสนองของ
อุปกรณ์ตรวจจับควัน Alpert [5] ยังได้นำเสนอสมการ
เพื่อประมาณเวลาการทำงาน ของอุปกรณ์ตรวจจับ
อัตโนมัติ ดังแสดงสมการที่ (27)

$$T_{activation} = \left(\frac{RTI}{\sqrt{U_{jet}}} \right) * \left(\ln \left(\frac{T_{jet} - T_a}{T_{jet} - T_{activation}} \right) \right) \quad (27)$$

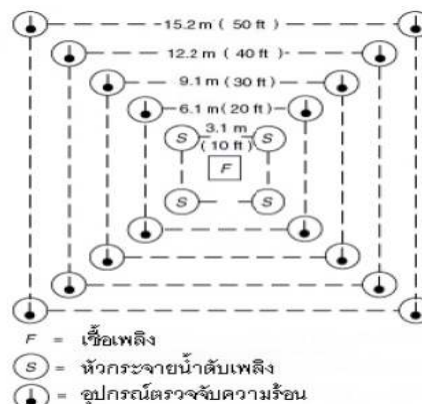
โดยที่ $T_{activation}$ คือค่าประมาณเวลาการทำงานของ
อุปกรณ์ตรวจจับ มีหน่วยเป็นวินาที RTI คือค่าการ
ตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับ U_{jet} คือค่าความเร็วของ

กลุ่มควันไหลได้เพดาน T_{jet} คือค่าอุณหภูมิของกลุ่มควันไหลได้เพดาน มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส T_a คือค่าอุณหภูมิแวดล้อม มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสและค่า $T_{activation}$ คืออุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

2.4 แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยโปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS)

โปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แก้ไขปัญหาด้านอัคคีภัยในระบบวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย จาก National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา[11] ซึ่งใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume method) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่และสมการพลังงานของของไหล และใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) โดยใช้ subgrid scale model ของ Smagorinsky สำหรับการจำลองในสภาวะปั่นป่วน FDS ได้ใช้แบบจำลอง mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction บนสมมติฐานที่ว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศจะถูกควบคุมการเข้าผสมกัน(mixing controlled) แทนที่ที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกันจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว(infinitely fast chemical reaction)ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้โดยสมบูรณ์ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองนี้ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ เนื่องจากเป็นการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้วิธีการคำนวณขั้นสูง ปัจจุบันได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางและเป็นที่ยอมรับมากขึ้นเรื่อยๆ สำหรับการจำลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาด้านอัคคีภัยเช่นการจำลองพฤติกรรมเพลิงไหม้ภายในอาคาร จำลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมและอุณหภูมิของควันไหล วิเคราะห์เวลาการทำงานของสปริงเกอร์ อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน และควัน หรือแม้กระทั่งจำลองเวลาการอพยพหนีไฟเป็นต้น

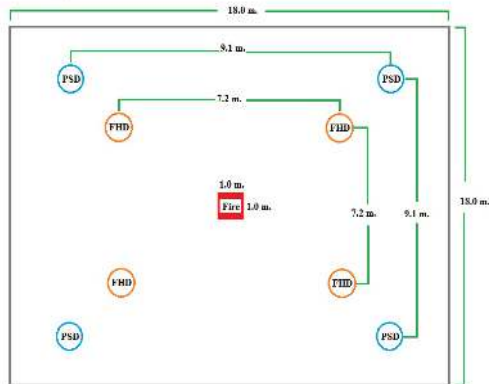
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PyroSim 2012 [12] เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเริ่มทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับแบบอัตโนมัติ 2 ชนิดคืออุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) และอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector)การคำนวณได้ดำเนินการภายในโดเมนการคำนวณขนาดกว้าง 18 เมตร ยาว 18 เมตร และเชื้อเพลิงมีขนาดกองเพลิง 1 ตารางเมตรอยู่ที่กึ่งกลางของพื้นด้านล่าง การจัดวางอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ ได้ใช้รูปแบบวิธีของ full scale fire test โดยสถาบัน ULหรือ FM ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบหาค่าระยะห่างที่กำหนด

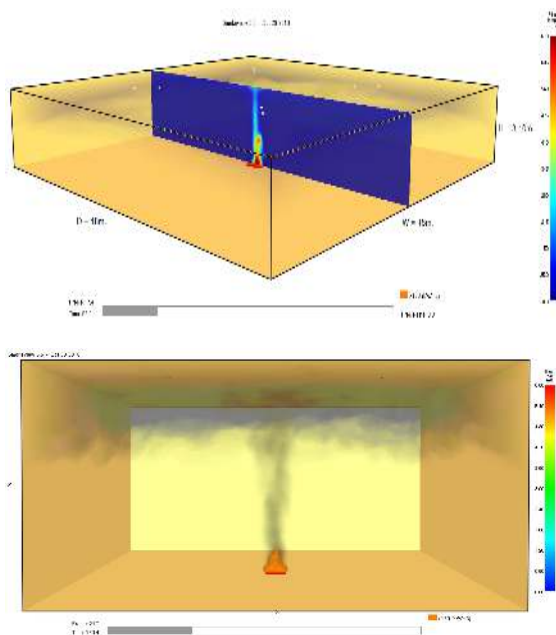
ขนาดของโดเมนการจำลอง ระยะการวางอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติทั้งสองแบบ และตำแหน่งกองเพลิงถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) FHD ที่ 7.2 เมตร และอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) PSD ที่ 9.1 เมตร ตามระยะมาตรฐานสูงสุดที่ใช้งานปกติ

3.วิธีดำเนินการ



รูปที่ 7 ขนาด ระยะและตำแหน่งของโมเดลการจำลอง
อัคคีภัย

ความสูงของโดเมนการจำลอง จะเริ่มต้นโมเดลการจำลองเริ่มที่ความสูง 3 เมตร และขยับขึ้นทุกๆ 1 เมตร จนถึง 10 เมตร การคำนวณได้กำหนดขนาดกริดในเทอมของตัวแปรไร้หน่วย R^* เท่ากับ 0.125 [13] โดยที่องค์ประกอบทุกอย่าง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างการจำลองโดยโปรแกรม PyroSim2012 แสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย
จากการสร้างโมเดลจำลอง มีทั้งหมด 8 โมเดล ผลของการจำลองที่ได้จะเป็นค่าเวลาเฉลี่ยของการ เริ่มต้น

การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) และ อุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลัสแสง (Photoelectric Smoke Detector) ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเวลาเริ่มทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติจากการจำลองโดย PyroSim 2012

ระดับ	Simulation		
	อุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ		
	ตรวจจับความร้อนแบบคงที่	ตรวจจับควันแบบพลัสแสง	เวลาที่ใช้
ความสูง (เมตร)	เวลาเฉลี่ยเริ่มทำงาน (วินาที)	เวลาเฉลี่ยเริ่มทำงาน (วินาที)	ในการจำลอง (ชั่วโมง)
3	149	53.80	12:40:29
4	162.5	59.80	20:28:29
5	178.5	67.12	24:42:19
6	197.5	74.60	32:04:39
7	220.5	85.77	36:53:50
8	259.25	106.5	40:38:18
9	303.75	122.67	44:42:46
10	359.25	151.23	48:55:52

ผลที่ได้ของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ จะนำค่าที่ได้ มาคำนวณให้เป็นตัวคูณร้อยละตามตารางแนะนำของ NFPA72 ในลักษณะเดียวกัน การคำนวณตามภาคผนวก B ผลที่ได้ คือระยะห่างของตัวอุปกรณ์ ก็จะนำมาคำนวณให้เป็นตัวคูณร้อยละด้วยเหมือน เพื่อเปรียบเทียบผลกัน

สำหรับผลการจำลองโมเดลของอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลัสแสง จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมการที่ (27)

4.ผลการศึกษา

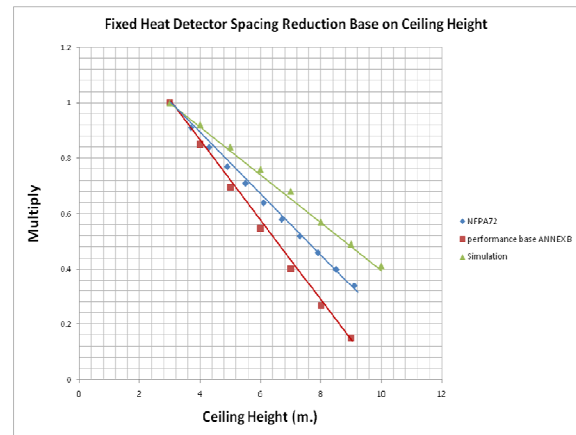
จากการศึกษาพบว่ายิ่งระดับความสูงของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) และอุปกรณ์ตรวจจับควัน

แบบ พลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) เพิ่มขึ้น แนวโน้มของเวลาการเริ่มทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับจะต้องใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วย ตามที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2

ผลจากการสร้างโมเดลการจำลองดังกล่าว จะถูกนำมาคำนวณให้เป็นตัวคูณร้อยละก่อน แล้วจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางแนะนำที่ 17.6.3.5.1 ในลักษณะเดียวกัน การคำนวณเชิงประสิทธิภาพตามภาคผนวก B ตามมาตรฐาน NFPA 72 ซึ่งได้แสดงสมการคำนวณตั้งแต่สมการที่ (14) ถึง (26) ผลที่ได้เป็นระยะห่างจะถูกคำนวณให้เป็นตัวคูณร้อยละเช่นกัน ก่อนจะนำผลที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ ตารางที่ 3 และรูปที่ 8

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการจำลองโปรแกรมกับมาตรฐาน NFPA72

ระดับความสูง (เมตร)	อุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติแบบตรวจจับความร้อนแบบคงที่		
	NFPA 72		PyroSim 2012
	Table 17.6.3.5.1	ANNEX B	Simulation
3	1.00	1.00	1.00
4	0.88	0.85	0.92
5	0.77	0.70	0.84
6	0.66	0.55	0.76
7	0.55	0.40	0.68
8	0.45	0.27	0.57
9	0.34	0.153	0.49
10			0.41



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบการจำลองโปรแกรมกับมาตรฐาน NFPA72

ผลจากตารางที่ 3 และกราฟรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ลดลงเป็นเส้นตรงเหมือนกัน แตกต่างที่ความชันของแต่ละวิธี นั้นอาจเพราะจุดสนใจและพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณนั้นอาจแตกต่างกันบ้างเท่านั้น

ผลที่ได้จากโมเดลการจำลองโปรแกรมแสดงให้เห็นว่า ในพื้นที่ๆ และความสูงที่เท่ากัน หากเลือกใช้วิธีจากผลของผลการจำลอง จะใช้อุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) น้อยกว่าทั้งสองวิธี แต่ยังคงประสิทธิภาพการตรวจจับไว้ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาระยะห่างจากการจำลองโปรแกรม จึงได้เสนอสมการดังนี้

$$y = -0.107x + 1.303 \quad (28)$$

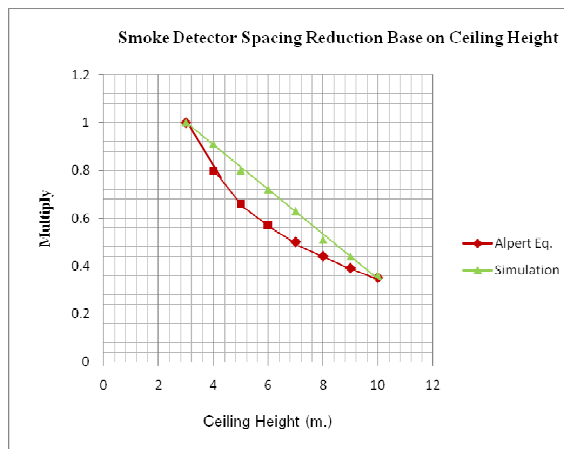
โดยที่แทนค่า x = ความสูง ก็จะได้ค่า y ที่เป็นตัวคูณร้อยละมาคำนวณหา ระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนแบบคงที่ (Fixed Temperature Detector) ที่ความสูงของ x นั้นๆ

สำหรับการคำนวณหาระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) ได้นำวิธีการจาก United States Nuclear Regulatory Commission ซึ่งใช้ Method of Alpert มาสร้างสมการเพื่อคาดเดาเวลาการทำงาน ตามสมการที่

(27) ข้างต้นที่เสนอ ผลจากการคำนวณและการจำลอง แสดงผลดังนี้

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการจำลองกับสมการ Alpert(27)

ระดับความสูง (เมตร)	อุปกรณ์ตรวจจับอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง	
	Alpert Equation 27	PyroSim 2012 Simulation
3	1.00	1.00
4	0.80	0.90
5	0.66	0.80
6	0.57	0.72
7	0.50	0.63
8	0.44	0.51
9	0.39	0.44
10	0.36	0.36



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบการจำลองโปรแกรมกับสมการของ Alpert

ผลจากตารางที่ 4 และกราฟรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ลดลงเหมือนกัน เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลของโมเดลการจำลองกับสมการประมาณเวลาทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับ จะพบว่ามี ความแตกต่างกันประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาระยะห่างจากการจำลองโปรแกรม จึงได้เสนอสมการดังนี้

$$y = -0.092x + 1.274 \quad (29)$$

โดยที่แทนค่า x = ความสูง ก็จะได้ค่า y ที่เป็นตัวคูณร้อยละมาคำนวณหา ระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจจับควันแบบพลังแสง (Photoelectric Smoke Detector) ที่ความสูงของ x นั้นๆ

5.สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ระดับความสูงของการติดตั้งเพิ่มมากขึ้น เวลาการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติทั้งสองชนิด จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วย หากต้องการให้ การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติมีประสิทธิภาพดีในระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดระยะห่างการติดตั้งลง

การศึกษานี้เลือกใช้วิธีการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยใช้โปรแกรม Fire Dynamics Simulator(FDS) PyroSim 2012 เพื่อศึกษาวิเคราะห์อย่างละเอียด ด้วยการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้วิธีการคำนวณขั้นสูงโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้งานกันแพร่หลาย

ผลที่ได้จากโมเดลการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับตารางแนะนำและการคำนวณนั้น แสดงให้เห็นว่าในขนาดพื้นที่และความสูงที่เท่ากัน จำนวนการติดตั้งของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติของโมเดลการจำลอง นั้นจะใช้น้อยกว่าแต่ประสิทธิภาพ การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติทั้งสองชนิดยังคงไว้เหมือนเดิม ซึ่งจะช่วยประหยัดเรื่องงบประมาณการลงทุนได้พอสมควร

6. เอกสารอ้างอิง

[1] National Fire Protection Association. 2013. NFPA72, National Fire Alarm Code, 2013 Edition. National Fire Protection Association , Quincy, Massachusetts.



- [2] McCaffrey, B.J., Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results. 1979, National Bureau of Standards: Gaithersburg, MD.
- [3] Heskestad, G., Chapter2-2 Fire Plumes, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P.J. DiNenno, Editor, 1995, National Fire Protection Association: Quincy, MA.
- [4] Alpert, R.L., Calculation of response time of ceiling-mounted fire detector. Fire Technology, 1972. 8: p.181-195
- [5] NFPA, Fire Protection Hand Book, 19th Edition, 2003, page 3-140.
- [6] J.P. Hollman. 1976 .Heat Transfer. McGraw-Hill, New York
- [7] Heskestad, G., and Delichatsios, M.A. 1979. The Initial Convection Flow in Fire: Seventeenth Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA.
- [8] Heskestad, G., and Delichatsios, M.A. 1989. Update: The Initial Convective Flow in Fire. Fire Safety Journal, vol.15, No.5.
- [9] Robert P. Schifiliti. 1986. Use of Fire Plume Theory in the Design and Analysis of Fire Detector and Sprinkler Response. Master's thesis. Worcester Polytechnic Institute, Center for Firesafety Studies, Worcester, MA.
- [10] สุภัทร พัฒนวิชัยโชติ. (2545). โปรแกรมออกแบบระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจจับความร้อนในเชิงประสิทธิภาพ วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [11] NIST, *FDS and Smokeview*, Access Date: 20 April2015,Available: http://www.nist.gov/el/fire_research/fds_smokeview.cfm,
- [12] THUNDERHEAD ENGINEERINGS, Fire Dynamics and Smoke Control with PyroSim, Access : 20 April2015, Available: <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>,
- [13] ณัฐศักดิ์ บุญมี. การหาขนาดกริดที่เหมาะสมสำหรับการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20 18-20 ตุลาคม 2549, จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย