

การศึกษาการระบายควันไฟในโถงสูง อาคารนวัตกรรม การจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

A Numerical Simulation of Atrium Smoke Ventilation in the New Building of
Faculty of Management and Tourism Burapha University at Chon Buri Province

วีรวัฒน์ หงษ์ทอง¹ และ สุรัชย์ รดาการ²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ

E-mail : weerawuth.h@ticon.co.th, fengsrr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเพลิงไหม้และการแพร่กระจายควันไฟภายในอาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ด้วยแบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Fire Dynamics Simulator (FDS) โดยจำลองพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคารเมื่อเกิดเพลิงไหม้ในบริเวณโถง atrium สำหรับกองเพลิง 3 ขนาด คือ กองเพลิงขนาด 2.2 MW 7.1 MW และ 14.2 MW ผลจากการจำลองแสดงให้เห็นว่า ถ้าพิจารณาเฉพาะอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อาจไม่มีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบบระบายควันไฟสำหรับกองเพลิงทุกขนาด แต่เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิในช่องทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ จะมีเพียงกองเพลิงขนาด 2.2 MW เท่านั้นที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบระบายควันไฟ แต่สำหรับกรณีกองเพลิงขนาด 7.1 MW นั้น การติดตั้งระบบระบายควันทางกลเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอ ส่วนกองเพลิงขนาด 14.2 MW จะต้องติดตั้งระบบระบายควันทางกลร่วมกับบอดักควัน จึงจะทำให้อุณหภูมิควันไฟเฉลี่ยที่ช่องทางเดินไปสู่ทางหนีไฟของทุกชั้นมีค่าต่ำกว่า 49 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาถึงการแพร่กระจายของควันพบว่า ทุกขนาดกองเพลิงจำเป็นต้องติดตั้งระบบระบายควันทางกล ร่วมกับบอดักควันและม่านกันควันจึงจะทำให้ช่องทางเดินไปสู่ทางหนีไฟของทุกชั้นปลอดภัย และหากปิดหน้าต่างด้านหลังอาคารร่วมด้วย จะทำให้อาคารปลอดภัยยิ่งขึ้นสำหรับกองเพลิงขนาด 2.2 MW

คำสำคัญ

การจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การระบายควัน แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์

Abstract

This research numerically simulates fire and smoke spread behaviors in the new building of faculty of management and tourism Burapha University at Chon Buri province by a computation fluid dynamics fire model, Fire Dynamics Simulator (FDS). Simulations of smoke spread due to fire in the atrium of the building were performed for 3 fire sizes; 2.2 MW, 7.1 MW, and 14.2

MW. The outcome of this experiment, finally, found that in terms of the danger; in particular of carbon monoxide (CO), it is not necessary to install smoke ventilation systems for every size of fire samples. However, when the temperature in specific area; from corridor to fire exit, is considered, there is only 2.2 MW of fire size that smoke ventilation systems is not required. While it is enough to install only smoke ventilation systems for 7.1 MW of fire size, for 14.2 MW of fire size not only smoke ventilation systems is required, but smoke reservoir is also included in order to encourage the average temperature of smoke within the target area; corridor to fire exit, of every floor to achieve below 49 degree Celsius ($^{\circ}\text{C}$). By considering the spread of smoke, besides, it is found that every size of fire samples requires the installment of smoke ventilation systems along with smoke reservoir and smoke curtain, in order to be able to achieve the safety purpose in the specific area; corridor to fire exit of every floor as consideration. In addition to 2.2 MW of fire size, the windows at the back of building should be closed for more safety.

Keyword:

numerical simulation, smoke ventilation, fire dynamics simulator

1. บทนำ

เนื่องด้วยคณะกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพาจังหวัดชลบุรี มีโครงการก่อสร้างอาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว เพื่อใช้เป็นอาคารอเนกประสงค์ภายในคณะ แนวทางหนึ่งในการเตรียมความพร้อมด้านการป้องกันอัคคีภัยของอาคารคือการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร (building fire modeling) ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองจะช่วยให้สามารถประเมินสถานะต่างๆ ของอาคารในกรณีที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ขึ้น เช่น อุณหภูมิของควัน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และระดับฟลักซ์ความร้อนที่เป็นอันตราย ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความจำเป็นในการเตรียมความพร้อมด้านมาตรการป้องกันอัคคีภัยของอาคารฯ จึงได้ดำเนินการจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคารโดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Fire Dynamics Simulator (FDS)

แบบจำลองเพลิงไหม้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Fire Dynamics Simulator (FDS) [1,2] เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยเฉพาะ สำหรับวิเคราะห์

ปัญหาด้านอัคคีภัยโดยได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจาก National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา นักวิจัยหลายคนใช้ FDS เพื่อจำลองเพลิงไหม้ภายในอาคาร [3, 4] ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น เพื่อทำนายการลามไฟ ทำนายสภาวะภายในอาคารขณะเกิดเพลิงไหม้เพื่อศึกษาการระบายควัน เป็นต้น

2. ทฤษฎี

โปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) [1, 2] ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume method) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่ของของไหลและสมการพลังงานของของไหล (navier stokes equation) และใช้ระเบียบวิธี Large Eddy Simulation (LES) โดยใช้ subgrid scale model สำหรับการจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนในส่วนของการเผาไหม้เพื่อแก้ปัญหาขนาดของกริด FDS ได้ใช้แบบจำลอง mixture-fraction-based infinitely fast chemical reaction บนสมมุติฐานที่ว่าอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศถูกควบคุมโดยอัตราการที่เชื้อเพลิง

กับอากาศเข้าผสมกัน (mixing controlled) ทันทีที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกันเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็ว (infinitely fast chemical reaction) ได้เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

3. แบบจำลองอาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยวมหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

อาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก กว้าง 50 เมตร ยาว 85 เมตร สูง 9 ชั้น มีความสูงจากระดับพื้นดินถึงระดับพื้นชั้นดาดฟ้า 34.30 ม. และมีพื้นที่ใช้งานรวมประมาณ 30,500 ตารางเมตร มีการเปิดพื้นเป็นโถง atrium ตั้งแต่พื้นชั้น 1 จนถึงชั้นหลังคาต่อเนื่องถึงกัน โดยชั้น 2 ถึงชั้น 6 มีพื้นที่เปิดโล่งขนาดกว้าง 6.20 เมตร ยาว 27.75 เมตร และชั้นที่ 7 ถึงชั้นหลังคามีพื้นที่เปิดโล่งขนาดกว้าง 11.50 เมตร ยาว 27.75 เมตร

จากแบบก่อสร้างของอาคาร ผู้วิจัยได้ดำเนินการป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม PyroSim [5] เพื่อสร้างแบบจำลองของอาคาร และส่งต่อไปคำนวณพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของควันด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ FDS (Fire Dynamics Simulator) แบบจำลองของอาคารที่สร้างด้วยโปรแกรม FDS ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ภาพตัดด้านข้างอาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

โดเมนที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดกว้าง 60 เมตร ยาว 100 เมตร และสูง 46 เมตร ซึ่งครอบคลุมอาคารทั้งหลัง ขอบเขตของโดเมน (domain boundaries) ที่ผิวด้านข้างทั้ง 4 ด้านและด้านบน กำหนดให้เปิดสู่สภาวะบรรยากาศภายนอก (open boundary) ซึ่งมีคุณสมบัติที่มวลและความร้อนสามารถไหลออกจากผิวโดเมนได้โดยอิสระ ที่พื้นด้านล่างกำหนดให้ค่าขอบเขตเป็นผิวที่บวม ไม่สามารถไหลผ่านได้ และกำหนดอุณหภูมิที่ผิวด้านล่างคงที่ 25 องศาเซลเซียส (inert boundary) ตลอดเวลาในการจำลอง



ภาพที่ 2 แบบจำลองของอาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยวด้วยโปรแกรม FDS

อาคารนวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรีจัดเป็นอาคารสูงและอาคารขนาดใหญ่พิเศษตามกฎหมายกระทรวงฉบับ 33 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ซึ่งบัญญัติไว้ว่าอาคารสูงหรืออาคารขนาดใหญ่พิเศษที่มีโถงภายในอาคารเป็นช่องเปิดทะลุพื้นของอาคารตั้งแต่สองชั้นขึ้นไป และไม่มีผนังปิดล้อม ต้องจัดให้มีระบบควบคุมการแพร่กระจายของควันที่สามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติเมื่อเกิดเพลิงไหม้ ทั้งนี้เพื่อระบายควันออกสู่ภายนอกอาคารได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมของเพลิงไหม้ภายในอาคารจึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของระบบควบคุมควันไฟแบบต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันไฟ รวมไปถึงอุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ภายใน

โถงทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ เพื่อหาแนวทางในการควบคุมควันไฟอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

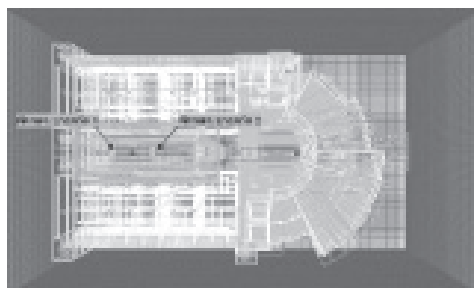
ผู้วิจัยได้กำหนดเหตุการณ์เพลิงไหม้สมมุติที่เลวร้ายที่สุด (worst case fire scenario) โดยให้เกิดเพลิงไหม้ที่กึ่งกลางโถง atrium บริเวณพื้นที่ชั้น 1 (พื้นโถง atrium) เนื่องจากเพลิงไหม้ที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่ทำให้ควันไฟสามารถแพร่กระจายไปตามโถง atrium สูงชันต่าง ๆ ของอาคารได้อย่างรวดเร็วที่สุด กองเพลิงที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดพื้นที่การเผาไหม้เท่ากับ 2×2 ตารางเมตร ตั้งอยู่บนพื้นที่ชั้น 1 กลางโถง atrium ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยจากการศึกษาโดยการทำ grid refinement study ขนาดกริดที่เหมาะสม และใช้ในการจำลองคือ grid ขนาด $0.83 \text{ m} \times 0.83 \text{ m} \times 0.85 \text{ m}$ โดยมีปริมาตรจำกัดทั้งสิ้น 466,560 ปริมาตร

4. การจำลองการแพร่กระจายของควันไฟด้วยแบบจำลอง FDS

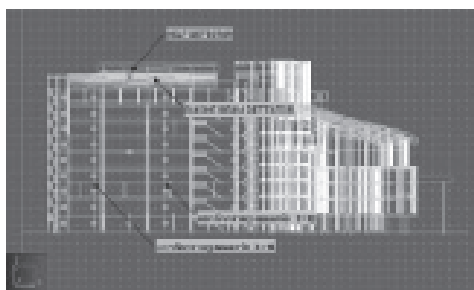
ผู้วิจัยได้ดำเนินการจำลองพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันไฟ โดยติดตั้งพัฒลมระบายควันที่หลังคาของโถง atrium และมีการแปรผันชนิดของระบบควบคุมควันไฟ โดยตารางที่ 1 ได้สรุปกรณีศึกษาทั้งหมด 24 กรณีที่ได้ดำเนินการจำลอง

ผู้วิจัยได้ติดตั้งบ่อกักควันที่โถง atrium ตั้งแต่พื้นที่ชั้นดาดฟ้าถึงพื้นที่ชั้นที่ 7 เพื่อรองรับชั้นควันให้มีความหนาได้ตามมาตรฐาน NFPA 92B [6] ข้อ 4.4.1.1 ที่ระบุถึงการออกแบบความหนาของชั้นควันว่าให้มีความหนาขั้นต่ำประมาณ 20% ของความสูงพื้นที่ถึงเพดาน และติดตั้งม่านกันควันตั้งแต่พื้นที่ชั้นที่ 2 ถึงพื้นที่ชั้นที่ 6 และติดตั้งบ่อกักควัน ม่านกันควัน และปิดหน้าต่างด้านหลังอาคารไว้ตั้งแต่เริ่มต้นการจำลอง ผู้วิจัยได้กำหนดให้ขนาดของพัฒลมระบายควันที่จำลองมีอัตราการระบายควันรวมใกล้เคียงกับอัตราการเกิด

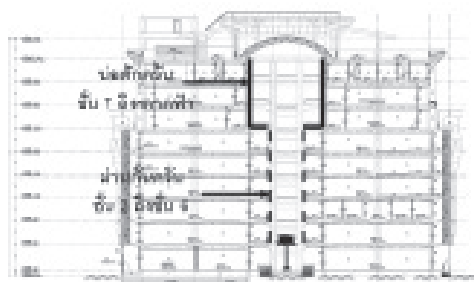
ควันมากที่สุดตามมาตรฐาน NFPA 204 [7] เมื่อเริ่มต้นการจำลองพัฒลมระบายควันทุกเครื่องอยู่ในสภาวะปิด และพัฒลมจะเริ่มทำงานเมื่ออุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (heat detector) หรืออุปกรณ์ตรวจจับควัน (smoke beam detector) ซึ่งติดตั้งไว้ที่เหนือโถงบริเวณชั้นหลังคาอย่างใดอย่างหนึ่งเริ่มทำงานก่อน เพื่อเป็นตัวกระตุ้นให้พัฒลมระบายควันทำงาน



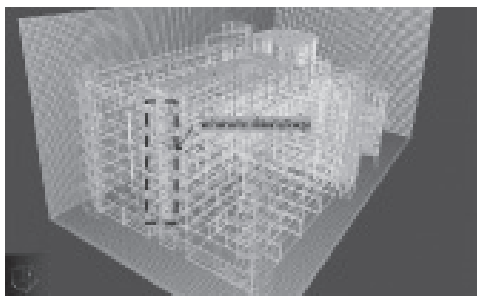
ภาพที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งพัฒลมระบายควัน



ภาพที่ 4 ตำแหน่งอุปกรณ์ตรวจจับควัน และตรวจจับความร้อน



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งบ่อกักควัน และม่านกันควัน



ภาพที่ 6 ตำแหน่งของหน้าต่างที่ถูกปิด

5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการระบายควันภายในอาคาร

ข้อกำหนดตามมาตรฐานการป้องกันอัคคีภัยและการควบคุมควันไฟภายในอาคาร กำหนดเป้าหมายของระบบควบคุมควันไฟที่จะต้องดำเนินการมีรายละเอียดดังนี้

1) ทำให้ควันอยู่เหนือจากพื้นชั้นที่สูงที่สุดซึ่งที่ต่อเชื่อม-ต่อกับโถง atrium อย่างน้อย 1.85 เมตร ตลอดเวลาการอพยพ ซึ่งเป็นตามมาตรฐานทางหนีไฟของ NFPA 101, Life Safety Codes. 2009 [8]

2) ป้องกันไม่ให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่องทางเดินที่เชื่อมต่อไปสู่ทางหนีไฟ (exit access) ของทุกชั้นสูงกว่า 49 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามข้อแนะนำใน Appendix B ของ มาตรฐาน NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System. 2007 [9]

3) ป้องกันไม่ให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ภายในช่องทางไปสู่ทางหนีไฟ (exit access) มีค่าไม่เกิน 800 ppm ตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการหนีไฟ ซึ่งเป็นไปตามข้อแนะนำใน Appendix B ของมาตรฐาน NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System. 2007 [9]

ตารางที่ 1 กรณีศึกษาทั้งหมด 24 กรณี

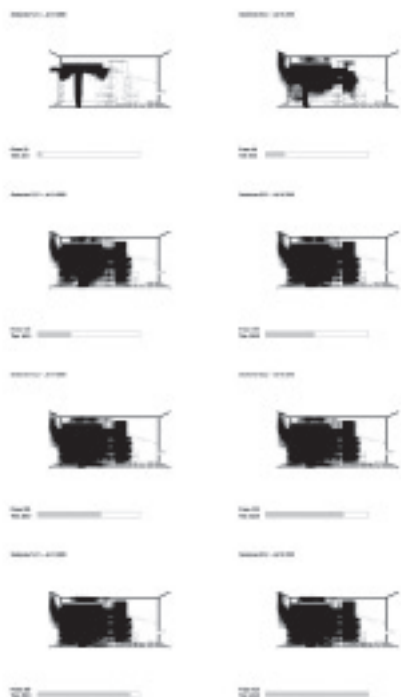
กรณีที่	ความร้อนของกองเพลิง (MW)	ชนิดของระบบควบคุมควันไฟ			
		ขนาดของพัดลมระบายควัน (kg/s) / จำนวนพัดลม (ตัว)	ปอดักควัน	ปิดหน้าต่าง	ม่านกันควัน
1	2.2	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
2	7.1	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
3	14.2	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
4	2.2	131.29/2	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
5	7.1	185.84/2	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
6	14.2	226.33/2	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
7	2.2	131.29/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
8	7.1	185.84/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
9	14.2	226.33/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
10	2.2	103.25/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
11	7.1	145.41/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
12	14.2	176.51/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
13	2.2	83.05/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
14	7.1	116.40/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
15	14.2	140.88/2	มี	ไม่มี	ไม่มี
16	2.2	83.05/2	มี	มี	ไม่มี
17	7.1	116.40/2	มี	มี	ไม่มี
18	14.2	140.88/2	มี	มี	ไม่มี
19	2.2	83.05/2	มี	ไม่มี	มี
20	7.1	116.40/2	มี	ไม่มี	มี
21	14.2	140.88/2	มี	ไม่มี	มี
22	2.2	83.05/2	มี	มี	มี
23	7.1	116.40/2	มี	มี	มี
24	14.2	140.88/2	มี	มี	มี

6. ผลการจำลอง

6.1 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควัน

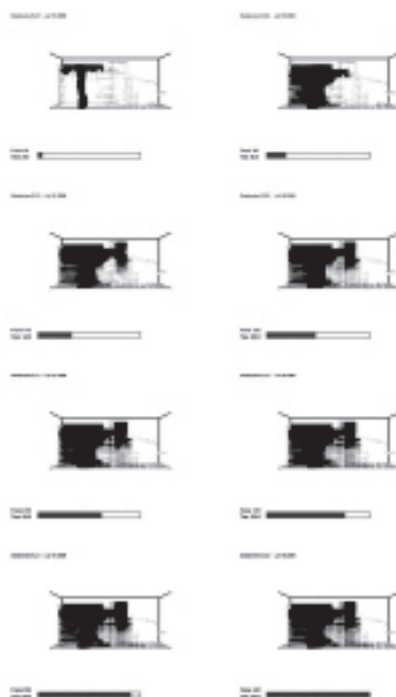
ภาพที่ 7 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคารกรณีที่อาคารไม่มีการติดตั้งระบบระบายควันไฟ สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW (กรณีที่ 2) สังเกตได้ว่าควันร้อนจะลอยตัวขึ้นในแนวดิ่งเนื่องจากแรงลอยตัวอย่างรวดเร็วที่หลังคาชั้นดาดฟ้า เมื่อไม่มีระบบระบายควัน ควันจะสะสมเป็นชั้นหนาขึ้นและลดระดับแพร่กระจายไปยังช่องทางเดินที่มีช่องเปิดเชื่อมต่อกับโถง atrium ทุกชั้นของอาคาร

และปกคลุมเส้นทางหนีไฟที่ผู้ใช้อาคารจะต้องใช้ ในการหนีไฟ ทำให้ผู้ใช้อาคารไม่สามารถอพยพเข้าสู่ บันไดหนีไฟของอาคารได้



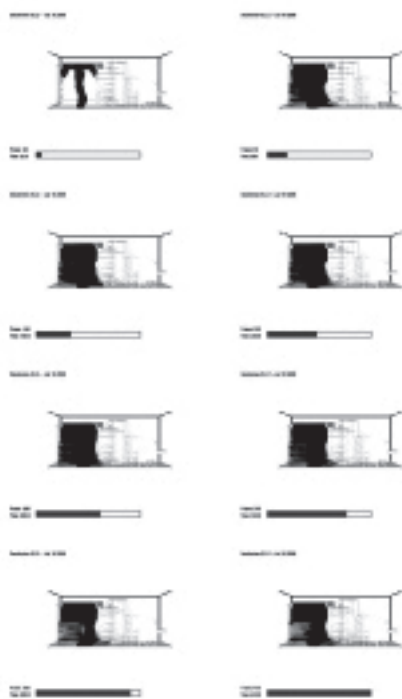
ภาพที่ 7 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายใน อาคาร กรณีที่อาคารไม่มีการติดตั้งระบบระบายควันไฟ สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW

ภาพที่ 8 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของ ควัน ภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายควัน โดย ให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควัน อยู่ ที่เหนือพื้นที่ 9 ซึ่งเป็นชั้นที่สูงที่สุดของอาคารเป็น ระยะ 1.85 เมตร และไม่มีการติดตั้งป้องกันควันและ ม่านกันควันในอาคารสำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW (กรณี 5) พบว่าแม้พัดลมระบายควันจะระบายควัน ร้อนออกไป แต่อัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ ห้องควัน อยู่เหนือพื้นที่ 9 ไม่สามารถทำให้ห้องควัน อยู่เหนือพื้นที่ 9 ได้จริง และช่องทางเดินของชั้นที่ 9 8 และ 7 ก็ยังมีสถานะเหมือนกับการจำลองในกรณีที่ ไม่มีการติดตั้งระบบระบายควัน



ภาพที่ 8 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายใน อาคารเมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายควันกรณีติดตั้ง พัดลมระบายควัน โดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่ คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ 9

ภาพที่ 9 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของควัน ภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายควัน โดย ให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ ที่เหนือพื้นที่ 9 ซึ่งเป็นชั้นที่สูงที่สุดของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตร และติดตั้งป้องกันควันที่ครอบคลุมตั้งแต่ หลังคาชั้นดาดฟ้าถึงพื้นที่ 7 แต่ไม่ติดตั้งม่านกันควัน ในอาคาร สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW (กรณี 8) พบว่าการติดตั้งป้องกันควันส่งผลอย่างมากในการ รวบรวมควัน เพื่อให้พัดลมระบายควันระบายควันร้อน ออกไป แต่ระบบทั้งหมดยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้ อาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 สามารถอพยพไปยัง บันไดหนีไฟได้ทัน เนื่องจากยังมีควันไฟแพร่กระจายไป ปกคลุม นอกจากนี้พบว่าควันไฟไม่ลอยขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากปรากฏการณ์ plugholing เนื่องจากอัตราการระบายควันสูงเกินไป



ภาพที่ 9 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคารเมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควันกรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 9 และมีปอดักควัน

ภาพที่ 10 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควัน กรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 8 ของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตร โดยติดตั้งบ่อกักควันที่ครอบคลุมตั้งแต่หลังคาชั้นดาดฟ้าถึงพื้นที่ชั้น 7 แต่ไม่มีการติดตั้งม่านกันควันในอาคารสำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW ซึ่งพบว่าให้ผลดีขึ้นกว่าการติดตั้งพัดลมระบายควัน โดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 9 ของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตร แต่ระบบทั้งหมดก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้

ผู้ใช้อาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 สามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากควันไฟยังมีการแพร่กระจายไปปกคลุม นอกจากนี้พบว่าควันไฟไม่ลอยขึ้นในแนวดิ่ง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากปรากฏการณ์ plugholing เนื่องจากอัตราการระบายควันสูงเกินไป



ภาพที่ 10 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควัน กรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 8 และมีปอดักควัน

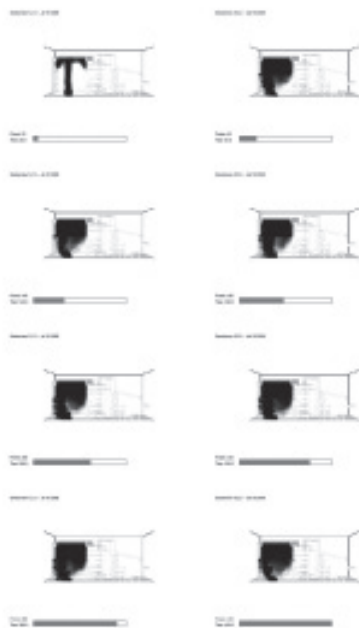
ภาพที่ 11 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคารเมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควัน กรณีที่ติดตั้งพัดลมระบายควัน โดยให้มีอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 7 ของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตร โดยมีการติดตั้งบ่อกักควันที่ครอบคลุม ตั้งแต่หลังคาชั้นดาดฟ้าถึงพื้นที่ชั้น 7 แต่ไม่มีการติดตั้งม่านกันควันในอาคาร

สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW ซึ่งพบว่าให้ผลดีขึ้นกว่าการติดตั้งพัดลมระบายควัน โดยให้อัตราระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 8 ของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตร แต่ระบบทั้งหมดก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้อาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 สามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากควันไฟยังมีการแพร่กระจายไปปกคลุม แต่พบว่าควันไฟลอยขึ้นในแนวตั้งซึ่งสันนิษฐานว่าอัตราการระบายควันของพัดลมไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ plugholing จึงสรุปว่าอัตราการระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 7 ของอาคารเป็นระยะ 1.85 เมตรนี้เป็นอัตราการระบายควันที่เหมาะสมในการคำนวณขั้นต่อไป



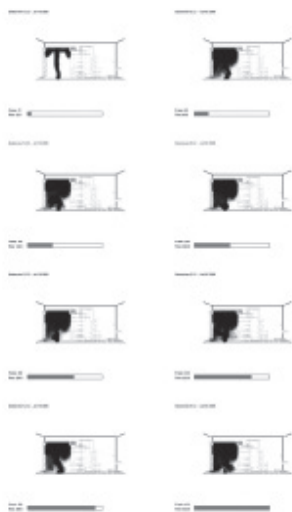
ภาพที่ 11 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควันกรณีติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้อัตราระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 7 และมีปอดักควัน

ภาพที่ 12 แสดงพฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายควันกรณีติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้อัตราระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือระดับพื้นที่ชั้นที่ 7 เป็นระยะ 1.85 เมตร และติดตั้งบ่อกักควันที่ครอบคลุมตั้งแต่หลังคาชั้นดาดฟ้าถึงพื้นที่ชั้น 7 แต่ไม่มีการติดตั้งม่านกันควันในอาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 และเพิ่มการปิดหน้าต่างด้านหลังของอาคาร โดยมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้มีอากาศไหลเข้ามาในอาคารสำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW พบว่าการปิดหน้าต่างทำให้ควันไม่ลอยขึ้นในแนวตั้ง แต่เอียงออกด้านข้างไปทางด้านหน้าต่างที่ปิดไว้ จนทำให้สภาพภายในห้อง atrium ชั้นที่ 6 5 4 3 และ 2 มีควันปกคลุม แต่ผู้ใช้อาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 ยังสามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้เนื่องจากลำควันไฟเอียงไปทางด้านหน้าต่างที่ปิดไว้



ภาพที่ 12 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้งช่องพัดลมระบายควันกรณีติดตั้งพัดลมระบายควันโดยให้อัตราระบายควันตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ชั้นที่ 7 มีบ่อดักควันและปิดหน้าต่างด้านหลังอาคาร

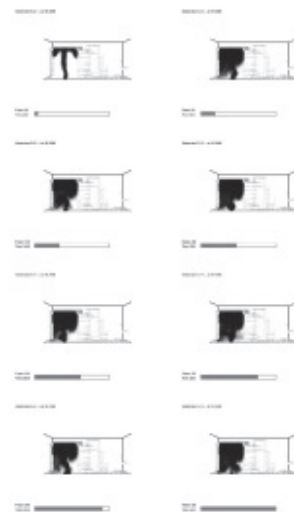
ภาพที่ 13 และภาพที่ 14 แสดงพฤติกรรม การแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อมีการติดตั้ง พัฒนาระบายควัน กรณีที่ติดตั้งพัฒนาระบายควันโดย ให้มีอัตราการระบายควัน ตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่ เหนือระดับพื้นที่ 7 เป็นระยะ 1.85 เมตร และติดตั้ง บ่อกักควันที่ครอบคลุม ตั้งแต่หลังคาชั้นดาดฟ้าถึงพื้น ชั้น 7 นอกจากนี้ยังติดตั้งม่านกันควันในอาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 โดยภาพที่ 13 ไม่ได้ปิดหน้าต่างด้านหลัง ของอาคาร ส่วนภาพที่ 14 มีการปิดหน้าต่างด้านหลัง ของอาคารร่วมด้วย สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 MW พบว่าทั้ง 2 กรณี ระบบทั้งหมดดีขึ้นมากจนเพียงพอที่จะ ทำให้ผู้ใช้อาคาร ตั้งแต่ชั้นที่ 9 จนถึงชั้นที่ 2 สามารถ อพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากไม่มีควันไฟแพร่ กระจายไปปกคลุมเส้นทางหนีไฟ ยกเว้นบริเวณชั้นที่ 1 บริเวณประตูด้านหลังอาคารที่มีควันไฟ ม้วนจาก เพดานโถง atrium ลงมาปกคลุม และพบว่าในกรณี ที่ปิดหน้าต่างด้านหลังของอาคาร สำหรับกองเพลิง ขนาด 2.2 MW ไม่พบควันไฟลงมาปกคลุมบริเวณ ดังกล่าว ส่วนกองเพลิงขนาด 7.1 และ 14.2 MW ยังคงมีควันไฟปกคลุมไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 13 การแพร่กระจายของควันภายในอาคาร เมื่อ มีการติดตั้งพัฒนาระบายควันโดยให้ม้อัตราระบายควัน ตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ 7 มีบ่อดักควัน และมีม่านกันควัน (กรณี ที่ 20)

6.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาคาร

จากการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิไว้ที่กึ่งกลาง ความสูงของชั้นในบริเวณโถงทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ ทุกชั้นของอาคาร เพื่อนำอุณหภูมิที่วัดได้จากการจำลองใน กรณีศึกษาต่างๆ มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐาน NFPA 130 [9] ได้แนะนำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่อง ทางเดินที่เชื่อมต่อไปสู่ทางหนีไฟ (exit access) ของ ทุกชั้นต้องมีค่าไม่สูงกว่า 49 องศาเซลเซียส ภายใน ช่วง 6 นาทีแรก โดยผู้วิจัยได้แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ที่คำนวณได้บริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟที่อัตราการ ปลดปล่อยความร้อนของกอง 7.1 MW ไว้ในตารางที่ 2 พบว่าผลการจำลองในกรณีที่ 2 ที่ในการจำลองยังไม่มี ระบบระบายควัน และระบบควบคุมควันไฟใดๆ อุณหภูมิ เฉลี่ยภายในช่องทางเดินที่เชื่อมต่อไปสู่ทางหนีไฟ (exit access) ของชั้น 9 8 และ 7 มีค่าสูงกว่า 49 องศา เซลเซียส และเมื่อจำลองใส่ระบบระบายควัน และระบบ ควบคุมควันไฟลงไปในกรณีศึกษาที่ 5 8 11 14 17 20 และ 23 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณทางเดินไปสู่ทาง หนีไฟของทุกชั้นมีค่าลดต่ำลงกว่า 49 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการจำลอง 420 วินาทีทุกกรณีศึกษา



ภาพที่ 14 พฤติกรรมการแพร่กระจายของควันภายในอาคาร กรณีที่ติดตั้งพัฒนาระบายควันโดยให้ม้อัตราระบายควัน ตามที่คำนวณให้ห้องควันอยู่ที่เหนือพื้นที่ 7 มีบ่อดักควัน มีม่านกันควันและปิดหน้าต่างด้านหลังอาคาร (กรณี ที่ 23)

ตารางที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ
ที่อัตราการปล่อยความร้อนของกองเพลิง 7.1 MW

กรณี	อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ (องศาเซลเซียส)								
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8	ชั้นที่ 9
2	32.60	33.87	28.98	34.42	43.93	55.93	62.51	64.59	63.71
5	32.31	31.33	25.98	25.85	25.87	26.27	25.58	33.85	39.88
8	30.50	30.69	25.88	25.71	25.69	25.38	25.03	25.04	25.03
11	30.72	31.37	25.88	25.83	25.97	25.65	25.03	25.04	25.02
14	29.94	31.29	25.98	26.35	25.91	26.85	25.28	25.78	25.03
17	31.16	30.11	31.37	30.93	31.72	34.86	25.03	25.05	25.00
20	29.80	25.22	25.10	25.05	25.04	25.04	25.02	25.03	25.02
23	34.87	25.15	25.05	25.03	25.03	25.05	25.02	25.04	25.00

6.3 การกระจายตัวของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ภายในอาคาร

จากการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ไว้ที่กึ่งกลางความสูงของชั้นในบริเวณโถงทางเดินไปสู่ทางหนีไฟทุกชั้นของอาคาร เพื่อนำปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่วัดได้จากการจำลองในกรณีศึกษาต่างๆ มาเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่มาตรฐาน NFPA 130 [9] ที่ได้แนะนำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ภายในช่องทางเดินที่เชื่อมต่อไปสู่ทางหนีไฟ (exit access) ของทุกชั้นต้องมีค่าไม่เกินกว่า 800 ppm ตลอดช่วงเวลาที่ใช้ในการหนีไฟ โดยผู้วิจัยได้แสดงค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่คำนวณได้บริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟที่อัตราการปล่อยความร้อนของกองเพลิง 7.1 MW ไว้ในตารางที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ภายในช่องทางเดินของชั้น 9 และ 7 สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 เมื่อกองเพลิงมีขนาด 7.1 MW และไม่มีระบบระบายควันและระบบควบคุมควันไฟใดๆ มีค่าอยู่ในช่วง 150 ppm ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน NFPA 130 [9]

ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เฉลี่ย
บริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟที่อัตราการปล่อย
ความร้อนของกองเพลิง 7.1 MW

กรณี	อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณทางเดินไปสู่ทางหนีไฟ (องศาเซลเซียส)								
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 4	ชั้นที่ 5	ชั้นที่ 6	ชั้นที่ 7	ชั้นที่ 8	ชั้นที่ 9
2	9.21	12.7	15.2	38.1	74.0	128.1	145.7	152.3	149.3
5	7.96	6.63	1.69	2.11	2.69	4.43	2.58	32.4	67.2
8	5.73	5.78	1.32	1.50	1.74	1.19	0.00	0.00	0.00
11	4.97	5.18	1.29	1.90	2.60	2.09	0.00	0.00	0.00
14	3.30	4.74	1.47	3.16	2.06	6.56	0.99	3.08	0.01
17	3.32	8.16	17.2	16.7	20.3	35.1	0.00	0.00	0.00
20	6.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	13.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

7. สรุป

อาคารไม่ติดตั้งระบบระบายควันไฟ

กรณีที่อาคารไม่มีระบบระบายควันไฟติดตั้งเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ ควันร้อนที่เกิดขึ้นจะแพร่กระจายไปยังเส้นทางอพยพหนีไฟของอาคาร ทำให้ผู้ใช้อาคารไม่สามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิของควันไฟภายในช่องทางเดินชั้น 9 บริเวณที่ติดกับโถง atrium ซึ่งเป็นชั้นสูงสุดของอาคารมีอุณหภูมิเฉลี่ย 40.16 63.71 และ 91.67 องศาเซลเซียส ที่กองเพลิงขนาด 2.2 7.1 และ 14.2 MW ตามลำดับ สำหรับกรณีกองเพลิง 7.1 และ 14.2 MW ห้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 49 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NFPA 130 [9] และควันไฟที่เกิดขึ้นจากกองเพลิงทุกขนาดได้เข้าปกคลุมเต็มช่องทางเดินทุกชั้น ซึ่งไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NFPA 101 [8]

อาคารติดตั้งระบบระบายควันไฟ

เมื่อปรับปรุงระบบควบคุมควันไฟภายในอาคาร นวัตกรรมการจัดการและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี โดยอ้างอิงมาตรฐาน NFPA 92B [6] และมาตรฐาน NFPA 204 [7] ด้วยการติดตั้งระบบควบคุมควันไฟแบบเครื่องกล โดยใช้พัดลมระบายควันพบว่า

1) เมื่อติดตั้งระบบควบคุมควันไฟ โดยติดตั้งพัดลมระบายควันเพียงอย่างเดียว ไม่มีการติดตั้งบ่อกักควัน (smoke reservoir) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว อุณหภูมิของช่องทางเดินที่ชั้น 9 ของอาคารบริเวณที่ติดกับโถง atrium สำหรับการจำลองกรณีกองเพลิงขนาด 2.2 และ 7.1 MW มีอุณหภูมิเฉลี่ย 30.50 และ 39.88 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่า 49 องศาเซลเซียส เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NFPA 130 [9] แต่ในขณะที่การจำลองกรณีกองเพลิงขนาด 14.2 MW อุณหภูมิเฉลี่ยของช่องทางเดินชั้น 9 ของอาคารบริเวณที่ติดกับโถง atrium มีอุณหภูมิ 50.71 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่า 49 องศาเซลเซียส ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NFPA 130 [9] และเมื่อพิจารณาเรื่องการควบคุมระดับความสูงของห้องควันเหนือพื้นที่ชั้นสูงสุดที่เชื่อมต่อกับโถง atrium พบว่าทุกขนาดกองเพลิง เมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายควันโดยไม่มีการติดตั้งบ่อกักควัน ทำให้ไม่สามารถระบายควันออก เพื่อรักษาระดับความสูงของห้องควันให้มีความสูงอย่างน้อย 1.85 เมตร เหนือพื้นที่ชั้น 9 ได้

2) อัตราการระบายควันของพัดลมระบายควันที่เหมาะสมสำหรับกองเพลิงทุกขนาดควรกำหนดให้เป็นไปตามอัตราการระบายควัน กรณีที่ห้องควันอยู่เหนือพื้นที่ชั้น 7 คือห้องควันสูง จากระดับพื้นที่ชั้นล่าง 23.45 เมตร ทั้งนี้เป็นไปตามมาตรฐาน NFPA 92B [6] ข้อ 4.4.1.1 ที่ระบุการออกแบบความหนาของชั้นควันให้มีความหนาขั้นต่ำประมาณ 20% ของความสูงพื้นที่ถึงเพดาน

3) การติดตั้งระบบควบคุมควันไฟ โดยติดตั้งพัดลมระบายควันให้เป็นไปตามอัตราการระบายควันกรณีที่ห้องควันอยู่เหนือพื้นที่ชั้น 7 มีบ่อดักควันครอบคลุม

ตั้งแต่ระดับชั้นดาดฟ้าลงมาถึงระดับพื้นที่ชั้น 7 และปิดประตูด้านหลังอาคารร่วมด้วย สำหรับกองเพลิงทุกขนาดพบว่าระบบทั้งหมด ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้อาคารที่ชั้น 6 5 4 3 และ 2 อพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากยังมีควันไฟแพร่กระจายไปปกคลุม

4) การติดตั้งระบบควบคุมควันไฟ โดยติดตั้งพัดลมระบายควันให้เป็นไปตามอัตราการระบายควันกรณีที่ห้องควันอยู่เหนือพื้นที่ชั้น 7 โดยมีบ่อดักควันครอบคลุมตั้งแต่ระดับชั้นดาดฟ้าลงมาถึงระดับพื้นที่ชั้น 7 และติดตั้งม่านกันควันรอบโถง atrium ของชั้น 2 ถึง 6 ร่วมด้วย สำหรับกองเพลิงทุกขนาดพบว่าระบบทั้งหมดดีขึ้นมากจนเพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้อาคารตั้งแต่ชั้นที่ 9 จนถึงชั้นที่ 2 สามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากไม่มีควันไฟแพร่กระจายไปปกคลุม

5) การติดตั้งระบบควบคุมควันไฟ โดยติดตั้งพัดลมระบายควันตามอัตราการระบายควันกรณีที่ห้องควันอยู่เหนือพื้นที่ชั้น 7 โดยมีบ่อดักควันครอบคลุมตั้งแต่ระดับชั้นดาดฟ้าลงมาถึงระดับพื้นที่ชั้น 7 และติดตั้งม่านกันควันรอบโถง atrium ของชั้น 2 ถึง 6 ร่วมกับการปิดหน้าต่างด้านหลังของอาคารด้วยพบว่าระบบทั้งหมดดีขึ้นมาก จนเพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้อาคารตั้งแต่ชั้นที่ 9 จนถึงชั้นที่ 2 สามารถอพยพไปยังบันไดหนีไฟได้ เนื่องจากไม่มีควันไฟแพร่กระจายไปปกคลุม ซึ่งไม่แตกต่างกันกับกรณีที่ไม่ได้ปิดหน้าต่างด้านหลังร่วมด้วย สำหรับกองเพลิงขนาด 7.1 และ 14.2 MW ส่วนกองเพลิงขนาด 2.1 MW นั้นพบว่าบริเวณชั้น 1 ของอาคารไม่มีควันไฟเข้าปกคลุมบริเวณทางออก



6) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในช่องทางเดินของชั้น 9 8 และ 7 สำหรับกรณีที่อาคารไม่มีระบบระบายควัน และระบบควบคุมควันไฟใดๆ สำหรับกองเพลิง ขนาด 2.2 7.1 และ 11.4 MW มีค่าอยู่ในช่วง 60 150 และ 250 ppm ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่กำหนดโดยมาตรฐาน NFPA 130 [9] และในกรณีที่อาคารติดตั้งระบบระบายควัน และระบบควบคุมควันไฟแล้วพบว่าระดับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในช่องทางเดินมีน้อยมาก และเข้าใกล้ 0 ppm ซึ่งปลอดภัยสำหรับการอพยพ

เอกสารอ้างอิง



1. McGrattan, K., Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide.2007, National Institute of Standards and Technology:Gaithersburg, MD
2. McGrattan, K., Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide.2007, National Institute of Standards and Technology:Gaithersburg, MD.

3. ณัฐศักดิ์ บุญมี, การศึกษาพฤติกรรมการไหลของควันได้เพดานอย่างอิสระด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.61: p. 107-119.

4. ณัฐศักดิ์ บุญมี, การศึกษาขนาดกริดในการจำลองลำควันสมมาตรด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 45 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550. 45: p. 62-69.

5. Thunderhead_Engineering, PyroSim User Manual 2008.1:

<http://thunderheadeng.com/pyrosim/>.

6. NFPA, NFPA 92B Guide for Smoke Management System in Mall, Atria, and Large Areas. 2009.

7. NFPA, NFPA 204 Standard for Smoke and Heat Venting. 2007.

8. NFPA, NFPA 101 Life Safety Codes. 2009.

9. NFPA, NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. 2007.