

การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายควันในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน MRT



นายกิตตินันท์ บุญเปี่ยม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NUMERICAL STUDY OF SMOKE VENTILATION IN UNDERGROUND MRT TUNNEL

Mr. Kittinan Boonpiam



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายควันทันในอุโมงค์รถไฟฟ้ ใต้ดิน MRT
โดย	นายกิตตินันท์ บุญเปี่ยม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ทวี เวชพฤติ)

กิตตินันท์ บุญเปี่ยม : การศึกษาเชิงตัวเลขของการระบายควันในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRT (A NUMERICAL STUDY OF SMOKE VENTILATION IN UNDERGROUND MRT TUNNEL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 94 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการจำลองแบบเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Fire Dynamics Simulator (FDS) เวอร์ชัน 6.0 เพื่อวิเคราะห์การระบายควันของการเกิดเพลิงไหม้ที่ตำแหน่งต่างๆ ของรถไฟฟ้าใต้ดิน MRT คือ หัวขบวนรถไฟ กลางขบวนรถไฟ และท้ายขบวนรถไฟ โดยทำการกระจายตัวของอุณหภูมิ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และการเคลื่อนตัวของควันในอุโมงค์ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างสถานี M2 และ M1 การจำลองสถานการณ์เมื่อรถไฟเคลื่อนตัวออกจากสถานี M2 มาถึงจุดกึ่งกลางของอุโมงค์แล้วมีเพลิงไหม้เกิดขึ้นในกรณีที่เลวร้ายที่สุดโดยรถไฟจะหยุดทันที จากการศึกษาพบว่าระบบการระบายควันแบบที่ 2 เป็นระบบระบายอากาศที่ดีที่สุดในการระบายควัน โดยวิเคราะห์จากระยะการไหลย้อนกลับของควัน เวลาในการระบายควัน การกระจายตัวของอุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณอัตราการไหลจาก 55 เป็น 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ระบบระบายควันแบบที่ 2 สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการระบายควันลงดังนั้นค่าอัตราการไหลและเทคนิคในการออกแบบระบบระบายอากาศที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินได้ ขนาดความกว้างของทางเดินฉุกเฉินที่ 1.2 เมตรจำนวนคนที่สามารถผ่านประตูต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 1.584 คน และความปลอดภัยในการอพยพควรมีค่าความหนาแน่นของคนเท่ากับ 1.07 คนต่อตารางเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670122321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SUBWAY TUNNEL FIRE, FDS, SMOKE MOVEMENT, VENTILATION

KITTINAN BOONPIAM: A NUMERICAL STUDY OF SMOKE VENTILATION IN UNDERGROUND MRT TUNNEL. ADVISOR: ASST. PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D., 94 pp.

This study was numerically investigated the effect of ventilation system on smoke movement in Mass Rapid Transit (MRT) tunnel with three positions of fire (front, middle and rear of the train) using Fire Dynamic Simulator (FDS) version 6.0. The distributions of temperature, CO concentration and smoke movement in a tunnel route between M2 station and M1 station were simulated. In the worst case scenario, the train must stop immediately for evacuation at the middle of the tunnel. According to the data for the ventilation system 1 and 2, the results showed that the ventilation system 2 was the best ventilating system regarding back layering length, evacuating time, the distributions of temperature and CO concentration. The ventilation system 2 suggested that the ventilation time was decreased by increasing the volumetric flow rate from 55 to 70 m³/s. Therefore, the volumetric flow rate and the ventilation system design techniques can reduce the catastrophe caused by conflagration in the subway tunnel. The width of emergency way is 1.2 meters, the number of people who can pass through the gate per second equals 1.584 people per second and the safety for evacuation should have the density of people as 1.07 people per square meter.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำอย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ อีกทั้งยังช่วยอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและช่วยผลักดันให้ผู้วิจัยสามารถทำงานได้สำเร็จตามเป้าหมายด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา ประธานกรรมการ รศ.ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์ และ ศาสตราจารย์ชานทวี เวชพฤติ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ และเพื่อนๆที่น้องๆที่ประจำห้องปฏิบัติ Computational Modelling and Optimisation Laboratory และห้องปฏิบัติการวิจัยนาโนเทคโนโลยี ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและความสนุกสนานในช่วงตลอดเวลาที่ทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกๆด้านมาโดยตลอด จนผู้วิจัยสามารถทำวิจัยสำเร็จได้อย่างตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6 วิธีการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 สมการครอบคลุมหลัก (Governing equations).....	6
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method).....	7
2.3 การไหลแบบปั่นป่วน.....	8
บทที่ 3 การใช้งานและการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	14
3.1 การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์	14
3.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	16
บทที่ 4 วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์	20

4.1 ลักษณะของปัญหา.....	21
4.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	27
4.2.1 ความปลอดภัยในชีวิตเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้	27
4.2.2 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์.....	28
4.2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	32
4.2.4 ความเข้มข้นของก๊าซ CO.....	51
4.2.5 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าของอุโมงค์	61
4.3 การคำนวณเวลาในการอพยพ	75
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 บทสรุป	78
5.2 ข้อจำกัดในการนำข้อมูลไปใช้.....	78
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	79
รายการอ้างอิง	80
ภาคผนวก.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	94

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ	8
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างขนาดความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน	9
รูปที่ 3.1 โปรแกรมคำนวณเซลล์	14
รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Command prompt	15
รูปที่ 3.3 โดเมนของอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษา	15
รูปที่ 3.4 ค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ และการเคลื่อนตัวของควัน	16
รูปที่ 3.5 แผนภาพและภาพตัดขวางของอุโมงค์ (ก) แผนผังของอุโมงค์ที่ถูกลดขนาด (เมตร) (ข) ภาพตัดขวางของอุโมงค์ที่ถูกลดขนาด (เซนติเมตร)	17
รูปที่ 3.6 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลอง	18
รูปที่ 3.7 ค่า Heat Release Rate ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาต่างๆ	19
รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิที่วัดได้ตลอดความยาวของอุโมงค์	19
รูปที่ 4.1 แบบการเดินรถของรถไฟฟ้า MRT	21
รูปที่ 4.2 รูปแบบของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) รูปแบบของรถไฟฟ้า MRT (ข) หน้าตัดของ อุโมงค์ที่ใช้ในการทดลองและอุโมงค์จริง (หน่วย : เมตร)	22
รูปที่ 4.3 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลอง	22
รูปที่ 4.4 ขนาดของรถไฟฟ้าใต้ดิน (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านหน้า (หน่วย : เมตร)	23
รูปที่ 4.5 ระบบระบายอากาศแบบบังคับ (ก) ระบบระบายชนิดที่ 1 (ข) ระบบระบายอากาศชนิด ที่ 2	24
รูปที่ 4.6 อุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงโซล ประเทศเกาหลี	25
รูปที่ 4.7 ความเร็วของรถไฟฟ้าใต้ดินในการเคลื่อนที่	25
รูปที่ 4.8 การวางตัวของพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRT	26
รูปที่ 4.9 ขนาดของช่องพัดลมระบายอากาศชนิดที่ 1 (ก) TVF-02 (ข) TVF-04	26
รูปที่ 4.10 ขนาดของช่องพัดลมระบายอากาศชนิดที่ 2 (ก) TVF-02 (ข) TVF-04	26

รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13	28
รูปที่ 4.12 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14	29
รูปที่ 4.13 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15	30
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้หัวขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13	33
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14	36
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15	39
รูปที่ 4.17 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณหัวขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13.....	42
รูปที่ 4.18 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14	45
รูปที่ 4.19 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณท้ายขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15.....	48
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13	52
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14	55
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15	58

รูปที่ 4.23 โครงสร้างของเจ็ทอิสระ.....	61
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปแบบเวกเตอร์โดยใช้พัดลมเจ็ท.....	61
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 7 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	63
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 7 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	64
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 8 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	65
รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 8 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	66
รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 9 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	67
รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 9 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	68
รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 13 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	69
รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 13 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	70
รูปที่ 4.33 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 14 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	71
รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 14 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	72
รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 15 (ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	73
รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 15 (ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที.....	74
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคนกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทาง.....	76

รูปที่ ข.1 หน้าต่างแสดงการป้อนคำสั่งลงใน Notepad 90

รูปที่ ข.2 หน้าต่าง Command Prompt 91

รูปที่ ข.3 หน้าต่าง Command Prompt 91

รูปที่ ข.4 หน้าต่างโปรแกรม Smoke view 92

รูปที่ ข.5 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงการเคลื่อนตัวของควัน 92

รูปที่ ข.6 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงการกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส 93

รูปที่ ข.7 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO 93



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 สมการความเร็วลมวิกฤต	2
ตารางที่ 4.1 กรณีในการศึกษา.....	20
ตารางที่ 4.2 เกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน	27
ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของเวลาในการอพยพ	75
ตารางที่ 4.4 ความเร็วที่ใช้ในการหนีแยกตามช่วงอายุ.....	77



คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	พื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์, m^2
a	ค่าคงที่สำหรับสมการความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลุ่มคน
C_s	ค่าคงที่สำหรับการใช้ Subgrid scale model
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะ, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	ความหนาแน่นของกลุ่มคน, $person/m^2$
F	ขนาดจริง
Fr	Froude number
$\bar{f}_{b,i}$	Bulk subgrid force term
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
H	ความสูง, m
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot K$ และ enthalpy
K	Turbulent kinetic energy per unit mass
k	Turbulent kinetic energy
k	ค่าคงที่สำหรับสมการความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลุ่มคน
l	ความยาว, m
M	ขนาดจำลอง
P	ความดัน, Pa
Q	อัตราการปล่อยความร้อน, kW
q	ฟลักซ์ความร้อน, W/m^2
S_{ij}	ความเครียดในรูปแบบเทนเซอร์, Pa
T	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$

t	เวลา, s
U_c	ความเร็ววิกฤต, m/s^2
u	ความเร็วในแนวแกน x , m/s^2
V	ปริมาตร, m^3
\dot{V}	อัตราการไหลโดยปริมาตร
v	ความเร็วในแนวแกน y , m/s
ν	Stoichiometric coefficients
w	ความเร็วในแนวแกน z , m/s
y_{CO}	CO yield
y_S	Soot yield
อักษรกรีก	
ρ	ความหนาแน่น, kg/m^3
τ_{ij}	ความเค้นในรูปแบบเทนเซอร์, Pa
μ	ความหนืดพลวัต, $N\cdot s/m^2$
δ_{ij}	Kronecker delta, ($\delta_{ij} = 1$ if $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ if $i \neq j$)
ε	Turbulent kinetic energy dissipation
ϕ	Continuous field
ν	Volume fraction

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากการขยายตัวของเมือง และประชากรที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องมีระบบขนส่งมวลชนที่เพียงพอมารองรับ ซึ่งในระบบขนส่งมวลชนทั้งหมด ระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือระบบรถไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากการประหยัดพลังงาน พื้นที่ในการใช้งานน้อย และผู้โดยสารมีความต้องการใช้งานจำนวนมาก อย่างไรก็ตามความเสี่ยงและเกิดอันตราย โดยเฉพาะในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ในอุโมงค์ ความอันตรายที่ร้ายแรงมักจะเกิดจากความยากลำบากในการอพยพผู้โดยสารโดยมีสาเหตุมาจากทัศนวิสัยที่จำกัด มลพิษจากควัน และความร้อนที่สูง ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการรายงานความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์หลายเหตุการณ์อาทิเช่น เหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟ Summit [1] ในประเทศอังกฤษ และอุโมงค์ Howard Street [2] ในประเทศสหรัฐอเมริกา รวมถึงเหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน Baku [3] ในประเทศอาเซอร์ไบจาน อุโมงค์ Channel [4, 5] ที่ตั้งอยู่ระหว่างประเทศอังกฤษและฝรั่งเศส และอุโมงค์ Daegu [6] ในประเทศเกาหลีใต้

1.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

Thomas [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของควันโดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ขนาด 90×90 ตารางเซนติเมตร โดยในทางทฤษฎีควันที่เกิดจากเพลิงไหม้จะไหลไปยังด้านปลายของอุโมงค์แต่บางส่วนสามารถไหลย้อนกลับมาทางด้านอุโมงค์ได้ ซึ่งจากผลการทดลองจะได้สมการที่สามารถทำนายความเร็วลมวิกฤตดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยต้องป้อนค่าความเร็วลมวิกฤตที่เพียงพอจึงจะสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการไหลย้อนกลับของควันได้

Oka and Atkinson [8] ศึกษาการระบายอากาศตลอดความยาวของอุโมงค์ โดยใช้เทคนิค Froude Scaling ซึ่งเป็นเทคนิคที่แสดงผลลัพธ์ของค่าอัตราการปล่อยความร้อนและค่าความเร็วลมภายในอุโมงค์ขนาดย่อกับอุโมงค์ขนาดจริง ซึ่งพบว่าอัตราการปล่อยความร้อนและค่าความเร็วลมของอุโมงค์ขนาดย่อสอดคล้องกับอุโมงค์ขนาดจริง และทำให้ได้สมการที่สามารถคำนวณความเร็วลมวิกฤตดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สมการความเร็วลมวิกฤต

สูตรคำนวณค่าความเร็วลมวิกฤต	แหล่งที่มา
$U_c = \left(\frac{gHQ}{\rho_0 T_0 c_p A} \right)^{1/3}$	Thomas [7]
$\frac{U_c}{\sqrt{gH}} = 0.35 \left[\frac{Q}{\rho_0 T_0 c_p g^{1/2} H^{1/2} A} \right]^{1/3}$ <p>เมื่อ $\frac{Q}{\rho_0 T_0 c_p g^{1/2} H^{1/2} A} < 0.124$</p> $\frac{U_c}{\sqrt{gH}} = 0.35 \text{ เมื่อ } \frac{Q}{\rho_0 T_0 c_p g^{1/2} H^{1/2} A} > 0.124$	Oka and Atkinson [8]

Kurioka et al. [9] ได้ทำการศึกษาปรากฏการณ์ของแหล่งไฟในอุโมงค์ทำการทดลองโดยรูปแบบอุโมงค์ 3 ชนิด คือ ขนาด 1:10, 1:2 และ 1:1 ซึ่งมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและเกือบห้าเหลี่ยม แหล่งกำเนิดเพลิงเป็นฐานรูปสี่เหลี่ยม และทำให้ได้สมการที่สามารถทำนายอุณหภูมิสูงสุดของควันไฟ (ΔT_{\max}) ในการระบายควันไฟภายในอุโมงค์ในกรณีของเปลวไฟสัมผัสกับเพดานอุโมงค์ได้

Hu et al. [10] ใช้โปรแกรม Fire Dynamics Simulation (FDS) ในการศึกษาการเผาไหม้ภายในอุโมงค์ที่มีความยาว 3.27 กิโลเมตรและ 1.032 กิโลเมตร ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีระบบระบายอากาศ โดยติดตั้งตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิไว้ที่ใต้เพดาน และใช้ความเร็วของอากาศที่แตกต่างกัน โดยมีฐานเพลิงขนาด 1.6 และ 3 เมกะวัตต์ และอุณหภูมิของควันที่ทำนายได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการของ Kurioka et al. [9] ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องกัน และต่อมาได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม [11, 12] โดยวิเคราะห์ความเร็วลมวิกฤตซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมการกระจายตัวของควันที่เกิดจากเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์ที่บริเวณใกล้กับผนังและกึ่งกลาง โดยมีแบบจำลองของอุโมงค์ความสูง 7.2 เมตร ความกว้าง 10 เมตร และความยาว 50 เมตร โดยมีตำแหน่งที่เกิดเพลิงไหม้ที่ระยะ 25 เมตรจากต้นอุโมงค์ พบว่าที่ความเร็ววิกฤตที่เท่ากัน ตำแหน่งเพลิงที่เกิดใกล้กับผนังยังมีการเกิดการไหลย้อนกลับของควัน ดังนั้นจะต้องใช้ความเร็วลมวิกฤตที่มีค่ามากกว่าบริเวณกึ่งกลางในการป้องกันการไหลย้อนกลับได้ จากนั้นทำการศึกษาค่าความเร็วลมวิกฤต

ตลอดแนวยาวความยาวของการระบายอากาศ และการกระจายของอุณหภูมิภายในอุโมงค์ โดยมีกองไฟขนาด 3.2 เมกะวัตต์ ซึ่งผลที่ได้พบว่าจากการทดสอบการเผาไหม้เต็มรูปแบบที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความเร็วลมวิกฤตที่คาดการณ์ไว้ในการศึกษาครั้งนี้มีความคล้ายคลึงกับที่พบในการทดลอง, การจำลองทาง CFD และการประมาณแบบง่ายโดย Thomas [7]

Lee and Ryou [13, 14] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและการทดลองเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์ขนาดย่อที่มีค่าอัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (aspect ratio) ที่ต่างกัน โดยใช้เทคนิค Froude Scaling โดยอุโมงค์ขนาดย่อที่ใช้มีอัตราส่วน 1:20 ความยาว 10.4 เมตร และค่าอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของอุโมงค์เท่ากับ 0.5, 0.667, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง และมีการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิที่ได้เพดานในตำแหน่งกึ่งกลางของอุโมงค์ โดยผลที่ได้พบว่าผลการวัดอุณหภูมิที่ได้มีความสอดคล้องกับอุโมงค์ขนาดจริงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อค่าอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุโมงค์มีขนาดแคบลง ทำให้อัตราการเย็นตัวของอุณหภูมิของควันลดลงจนทำให้เกิดความร้อนสูงภายในอุโมงค์ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการเลือกนำไปใช้ในการออกแบบอุโมงค์

Harish and Venkatasubbaiah [15] ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม Fire Dynamics Simulation (FDS) ทำการจำลองการวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆโดยใช้รูปแบบและกำหนดขอบเขตการทดลองตามวิธีการทดลองของ Lee and Ryou [13] อุโมงค์ที่ใช้มีความยาว 10.4 เมตรและมีค่า aspect ratio เท่ากับ 0.5 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ขนาดของกริดที่ใช้คือ 650 x 40 x 20 เซลล์ และค่าอัตราการปล่อยความร้อนของเพลิงเท่ากับ 8.27 กิโลวัตต์โดยมีการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง ผลที่ได้พบว่าข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญ

Weng et al. [16] ได้ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินโดยทำการทดลองภายในอุโมงค์ที่แบ่งออกเป็นสองส่วนโดยในส่วนแรกมีความยาว 211 เมตร และความสูง 5.16 เมตร ส่วนที่สองมีความยาว 138 เมตร และความสูง 7.32 เมตร ซึ่งมีการป้อนอากาศเข้ามาภายในอุโมงค์เพื่อช่วยในการระบายควัน ในขณะเดียวกันได้ทำการจำลองปัญหาด้วยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองพบว่าผลลัพธ์มีค่าใกล้เคียงกันมาก จากนั้นทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของควันเพื่อช่วยในการอพยพโดยมีการระบายอากาศโดยวิธีทางธรรมชาติและทางกลที่มีระบบป้อนอากาศและระบายอากาศที่ต่างกัน ผลที่ได้พบว่า ระบบระบายอากาศทางกลให้ประสิทธิภาพในการระบายควันได้ดีที่สุด

Li et al. [17] ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินปักกิ่ง ระหว่างสถานีจีสุ่ยถัน ถึงสถานีกุโหลวโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ลักษณะของอุโมงค์ที่ใช้มี 2 ช่องทางซึ่งมีความกว้าง 8.8 เมตร ความยาว 1290 เมตร และความสูง 4.4 เมตร มีผนังกันระหว่าง อุโมงค์ขนาด 0.6 เมตร ที่ตลอดความยาวของอุโมงค์มีช่องเชื่อมกันระหว่างอุโมงค์ทุกระยะ 30 เมตร เพื่อการระบายควัน รถไฟมีขนาดความกว้าง 2.65 เมตร ความยาว 120 เมตร และความสูง 3.5 เมตร ทั้งนี้อุโมงค์ที่ใช้มีขนาดลดลงมา 8 เท่าเนื่องจากการทดลองขนาดจริงจำเป็นต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมาก กรณีในการศึกษาคือตำแหน่งการเกิดกองเพลิงที่บริเวณหัวรถไฟ กลางรถไฟ และท้ายรถไฟ ควบคุมไว้กับเวลาในการเปิดพัดลมระบายอากาศเพื่อทำการระบายควันที่ 0 60 และ 120 วินาที ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิสูงจากพื้น 1.5 เมตร ผลที่ได้พบว่าเมื่อเกิดเหตุที่บริเวณหัวรถไฟจำเป็นต้องเปิดพัดลมระบายอากาศทันทีเนื่องจากควันจะลอยมาที่ด้านหน้ารถไฟอย่างรวดเร็ว ที่บริเวณกลางรถไฟ จำเป็นต้องเปิดพัดลมหลังจาก 120 วินาทีเพื่อระบายควันไปยังส่วนท้ายของขบวนรถ และที่บริเวณ ท้ายรถไฟนั้นเป็นกรณีเดียวที่มีความปลอดภัยในการอพยพผู้คนมากที่สุดเพราะอุณหภูมิมีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤตเป็นเวลา 10 นาทีซึ่งมีเวลาเพียงพอที่จะอพยพ การตรวจสอบผลที่ได้จากการจำลองมีความ สอดคล้องกันอย่างมีนัยสำคัญกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. เพื่อศึกษาการเคลื่อนตัวของควันไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และค่าความเข้มข้นของ ก๊าซ CO ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยใช้โปรแกรม Fire dynamics simulation และ Smoke view
2. ศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของควันไฟภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ ดินระหว่างสองสถานีโดยใช้การจำลองรูปแบบอุโมงค์อย่างง่าย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถจำลองสภาวะควันไฟเมื่อเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินด้วยโปรแกรม Fire dynamics simulation และ Smoke view
2. สามารถทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเคลื่อนตัวของควันไฟเมื่อเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นประกอบการออกแบบระบบระบายควันไฟในอุโมงค์

1.6 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลและความเป็นมาของการเกิดอุบัติเหตุในอดีตจนทำให้เกิดความเสียหายจากเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบายควันไฟภายในอุโมงค์
3. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม Fire Dynamics Simulation และ Smoke View [18] จากคู่มือ
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม Fire Dynamics Simulation และ Smoke View [18] ในการคำนวณผลในกรณีที่กำหนดปัญหาอย่างง่าย
5. ตรวจสอบความถูกต้องของการใช้งานโปรแกรมกับผลงานการวิจัยหรือผลจากการทดลองของผู้ที่เคยศึกษาในอดีต
6. วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการระบายควันภายในอุโมงค์
7. สรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้จะกล่าวถึงสมการครอบคลุมพื้นฐาน (Governing equations) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Large eddy simulation (LES) ซึ่งถูกใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนและการไหลของปัญหา

สำหรับสมมติฐานของงานวิจัยนี้ พิจารณาการไหลแบบปั่นป่วนและไม่อัดตัวภายใต้สภาวะคงตัวในสองมิติ รวมถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลเป็นค่าคงที่

2.1 สมการครอบคลุมหลัก (Governing equations)

สมการครอบคลุมการไหลของของไหลประกอบด้วย มวลของของไหลจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงของอนุภาคของไหล (กฎข้อที่ 2 ของนิวตัน) อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจะเท่ากับผลรวมของอัตราของความร้อนที่เพิ่มขึ้นกับงานที่ทำของอนุภาคของไหล (กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์) ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องจึงประกอบด้วยสมการดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_i \bar{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i''' \quad (2.2)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} \right) + \nabla p = \rho \bar{\mathbf{g}} + \bar{\mathbf{f}} + \nabla \tau \quad (2.3)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \bar{\mathbf{u}} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \bar{\mathbf{q}}_r + \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad (2.4)$$

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มเป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเพื่อวิเคราะห์สภาวะของการไหล และเป็นระเบียบวิธีที่ถูกใช้ในซอฟต์แวร์ที่จำหน่ายกันในระดับสากล สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลได้เป็นอย่างดี โดยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มคือการแบ่งของไหลในโดเมนออกเป็นปริมาตร (Volume) หรือเซลล์ (Cell) แล้วสร้างสมการพีชคณิต (Algebraic Equation) ที่สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในปริมาตรหรือเซลล์นั้นๆ สามารถยกตัวอย่างการดิสครีไทซ์ (Discretize) สมการอนุรักษ์โมเมนตัมดังแสดงในสมการที่ (2.2, 2.3) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในรูปแบบสองมิติ หรือ พิกัด $X - Y$ โดยกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ เป็นการไหลแบบไม่ขึ้นกับเวลา และไม่มี Body force มาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

ทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ (2.5) บนปริมาตร ΔV ของเซลล์ P ใดๆ ดังนี้

$$\int_{\Delta V} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} dV + \int_{\Delta V} \rho v \frac{\partial u}{\partial y} dV = - \int_{\Delta V} \frac{\partial p}{\partial x} dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) dV \quad (2.6)$$

จากนั้นประยุกต์ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ลงบนแต่ละพจน์ดังนี้

$$\int_{\Delta V} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} dV = \rho u A_e u_e - \rho u A_w u_w = F_e u_e - F_w u_w \quad (2.7ก)$$

$$\int_{\Delta V} \rho v \frac{\partial u}{\partial y} dV = \rho v A_n u_n - \rho v A_s u_s = F_n u_n - F_s u_s \quad (2.7ข)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial p}{\partial x} dV = \frac{(p_P - p_W)}{\Delta x} \Delta V$$

(2.7ค)

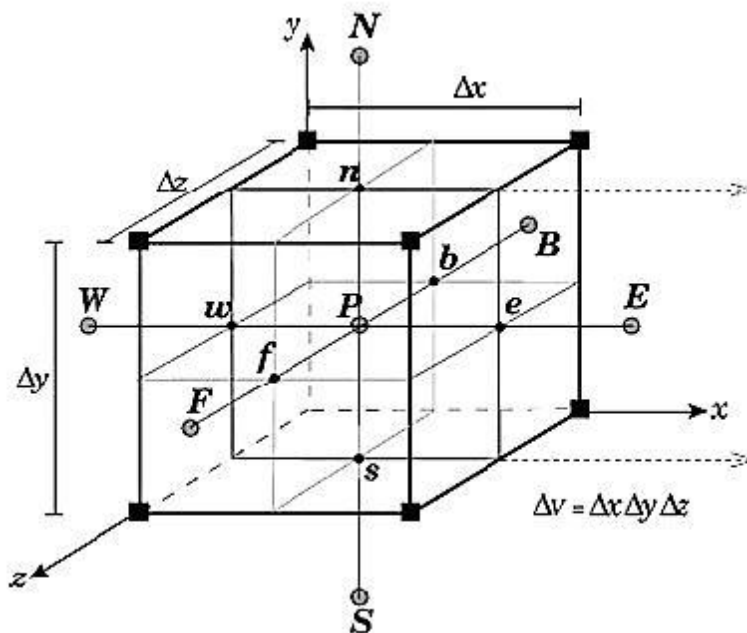
$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) dV = \mu A_e \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_e - \mu A_w \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_w = D_e (u_E - u_P) - D_w (u_P - u_W) \quad (2.7ง)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) dV = \mu A_n \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_n - \mu A_s \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_s = D_n (u_N - u_P) - D_s (u_P - u_S) \quad (2.7จ)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการ (2.7) ได้เป็น

$$\begin{aligned} & (F_e u_e - F_w u_w) + (F_n u_n - F_s u_s) \\ & = D_e (u_E - u_P) - D_w (u_P - u_W) + D_n (u_N - u_P) - D_s (u_P - u_S) \end{aligned} \quad (2.8)$$

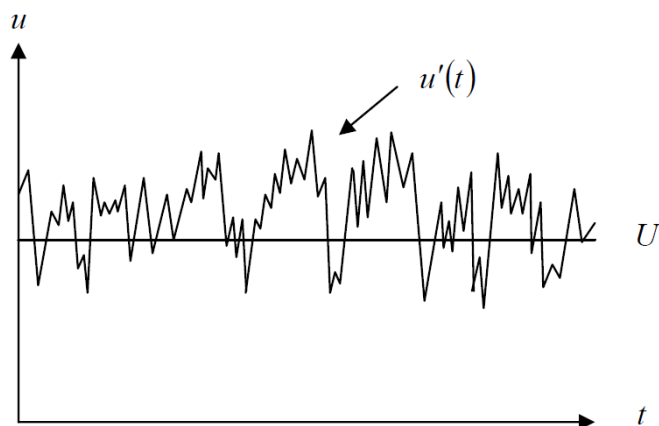
จากสมการที่ (2.8) คือสมการไฟไนต์วอลุ่มแบบทั่วไป (Typical equation) สำหรับเซลล์ P ใดๆที่อยู่ในโดเมนการไหล ซึ่งการวางตัวของแต่ละจุดบนปริมาตรควบคุมสามารถดูได้จากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสามมิติ

2.3 การไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนนั้นคือความเร็วที่ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนที่เป็นค่าแปรปรวน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลจึงต้องใช้ทฤษฎีการไหลแบบปั่นป่วน โดยค่าเรย์โนลด์ของการไหลมีปริมาณความสัมพันธ์ของแรงภายในหรือแรงเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ในการทดสอบระบบการไหล สังเกตว่าค่าเรย์โนลด์ที่ต่ำกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤต ($Re_{critical}$) การไหลจะสม่ำเสมอและชั้นของของไหลที่ติดกันจะเลื่อนผ่านไปอย่างเป็นระเบียบ ถ้าทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเป็นการไหลแบบคงที่เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์มากกว่าค่าเรย์โนลด์วิกฤต ($Re_{critical}$) พฤติกรรมการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน การเคลื่อนที่ภายในจะไม่คงที่ แม้ว่าเงื่อนไขขอบเขตที่ใส่เข้าไปจะคงที่ ความเร็วและค่าการไหลอื่น ๆ จะแปรผันตามการไหลที่มีทิศทางสุ่มและวุ่นวาย เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ความเร็วในรูปที่ 2.1 สามารถแยกออกได้เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยคงที่ U กับส่วนที่ผันผวน $u'(t)$ ที่วางซ้อนกันอยู่ จะได้ว่า $u(t) = U + u'(t)$ ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น ค่าความเร็วของการไหลนั้นมีค่าไม่คงที่



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างขนาดความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน

ทฤษฎีในการประดิษฐ์แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ทฤษฎี ดังนี้

1. Large eddy simulation (LES) เป็นการจำลองพฤติกรรมของ Eddy ขนาดใหญ่และพิจารณาว่าพฤติกรรมของ Eddy ขนาดเล็กนั้นไม่แปรเปลี่ยนตามปัญหาโดยข้อดีของทฤษฎีนี้คือส่วนของการสร้างแบบจำลองถูกจำกัดให้มีขนาดเล็กหรือใกล้เคียงกับรูปแบบของไอโซโทรปิกและข้อด้อยนี้คือโดยทั่วไปจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณสูงกว่าทฤษฎี Eddy viscosity model (EVM)
2. Reynolds stress method (RSM) มีสมการเพิ่มเติมจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Reynolds stresses แต่ละตัวใน Reynolds stresses tensor ซึ่งทฤษฎีนี้ซับซ้อนมากกว่าทฤษฎี EVM และเกี่ยวข้องกับสมการจำนวนมาก นอกจากนั้นยังมีค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองซึ่งมีหลายจำนวน และไม่ค่อยชัดเจน อีกทั้งทฤษฎีนี้ยังใช้เวลาในการวิเคราะห์นานกว่าทฤษฎี EVM และ LES ด้วยทำให้ทฤษฎี RSM ไม่ค่อยได้รับความนิยม
3. Eddy viscosity model (EVM) เป็นที่นิยมและใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน ทฤษฎีนี้พิจารณาว่า Reynolds stresses นั้นสัมพันธ์กับเกรเดียนต์ความเร็ว

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน Large eddy simulation (LES)

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โปรแกรม Fire Dynamic Simulation (FDS) ในการจำลองโดยมีแบบจำลองการไหลปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธี Large eddy simulation (LES) ในการแก้สมการการเคลื่อนที่และสมการพลังงานของของไหลโดยสมการ LES จะได้มาโดยการใช้ Low-pass filter ที่มีความกว้าง Δ เพื่อใช้ในสมการ DNS โดยในโปรแกรม FDS นั้น Filter width ถูกนำไปเป็นรากที่สาม

ของปริมาณเซลล์นั้นคือ $\Delta = V_C^{1/3}$ โดย $V_C = \delta x \delta y \delta z$ สำหรับ Continuous field (ϕ) และ filtered field ถูกกำหนดให้เป็น

$$\bar{\phi}(x, y, z, t) = \frac{1}{V_C} \int_{x-\delta x/2}^{x+\delta x/2} \int_{y-\delta y/2}^{y+\delta y/2} \int_{z-\delta z/2}^{z+\delta z/2} \phi(x', y', z', t) dx' dy' dz' \quad (2.9)$$

นอกจากนี้การกำหนด Mass weighted หรือ Favre filter ดังกล่าวไว้ว่า $\bar{\rho} \tilde{\phi} \equiv \overline{\rho \phi}$

DNS Momentum Equation

ในรูปแบบของ Conservative form สมการโมเมนตัม DNS สำหรับองค์ประกอบที่ i ใดๆ ของความเร็วเป็น

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (2.10)$$

LES Momentum Equation

ทำการแทนค่าสมการที่ 2.10 เข้ากับสมการ 2.11 ทำได้ผลดังนี้

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''' u_{b,i}} \quad (2.11)$$

ค่าเฉลี่ยของเซลล์ ($\overline{\rho u_i u_j}$) เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถคำนวณทางคอมพิวเตอร์ได้เนื่องจากเป็นค่าที่อยู่ภายใต้เครื่องหมายค่าเฉลี่ยจึงจำเป็นต้องกำจัดทิ้งโดยทำการแทนค่าด้วย Favre Filter จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b''' \tilde{u}_{b,i}} \quad (2.12)$$

เนื่องจากค่า $\tilde{u}_i \tilde{u}_j$ ไม่สามารถหาได้โดยง่าย ในที่นี้จึงใช้ค่าความเค้นของ Subgrid-scale (SGS) เพื่อช่วยในการประมาณค่าดังต่อไปนี้

$$\tau_{ij}^{SGS} \equiv \bar{\rho} \left(\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right) \quad (2.13)$$

แทนค่าสมการที่ 2.14 ลงใน 2.13 ซึ่งจะเป็นตัวแทนของสมการ LES Momentum ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b \tilde{u}_b i} \quad (2.14)$$

ค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ 2.14 สามารถคำนวณทางคอมพิวเตอร์ได้ และถูกเรียกว่าสมการ LES Momentum Equation แต่ยังคงมีตัวแปรบางตัวที่ยังไม่สอดคล้องกับรูปแบบของ FDS จำเป็นต้องกำจัดค่าความเค้น SGS และใช้กฎความหนืดของนิวตันเข้ามาช่วยจนสามารถสร้างแบบจำลองค่าความเค้น Total deviatoric ได้ดังนี้

$$\tau_{ij}^{dev} \equiv \bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^{sgs} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{sgs} \delta_{ij} = -2(\mu + \mu_t) \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) \delta_{ij} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ μ คือความหนืดพลวัต S_{ij} คือความเครียดในรูปแบบเทนเซอร์ และ δ_{ij} คือ Kronecker delta เมื่อ ($\delta_{ij} = 1$ if $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ if $i \neq j$)

ใน LES ที่มีกริดแบบเลขมัลติสเกล ไอโซโทรปิกในส่วนของค่าความเค้น SGS ต้องถูกสนับสนุนโดยสมการ pressure term จึงกำหนดให้ subgrid kinetic energy เป็นครึ่งหนึ่งของ SGS Stress ดังนี้

$$k_{sgs} \equiv \frac{1}{2} \tau_{kk}^{sgs} \quad (2.16)$$

และกำหนด modified filtered pressure ได้ดังนี้

$$\bar{p} = \bar{p} + \frac{2}{3} k_{sgs} \quad (2.17)$$

แทนสมการที่ 2.16 และ 2.18 ลงในสมการที่ 2.15 จะได้ว่า

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^{dev}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b \tilde{u}_b i} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.1 เมื่อทำการแทนสมการที่ 2.19 ลงไปจะได้ว่า

$$\bar{\rho} \frac{D \tilde{u}_i}{Dt} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{dev}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \underbrace{\bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}_b (\tilde{u}_b i - \tilde{u}_i)}}_{\bar{f}_{b,i}} \quad (2.19)$$

$\bar{f}_{b,i}$ เรียกว่า Bulk subgrid force term

Production of Subgrid Kinetic Energy

สำหรับสมการอนุรักษ์พลังงาน สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ต่อมวล

$K \equiv \frac{1}{2} \tilde{u}_i \tilde{u}_i$ โดยมีที่มาจากกระจายอยู่ทั่วไปในสมการโมเมนตัม LES และการแก้ไขเวกเตอร์ความเร็ว ผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\begin{aligned} \frac{\overline{\rho DK}}{\overline{\rho}} &= -\tilde{u}_i \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} - \tilde{u}_i \frac{\partial \tau_{ij}^{dev}}{\partial x_j} + (\overline{\rho g_i} + \overline{f_{b,i}}) \tilde{u}_i \\ \frac{\overline{\rho DK}}{\overline{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left[\overline{p \delta_{ij}} + \tau_{ij}^{dev} \right] \tilde{u}_i \right) &= \overline{p} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \tau_{ij}^{dev} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + (\overline{\rho g_i} + \overline{f_{b,i}}) \tilde{u}_i \end{aligned} \quad (2.20)$$

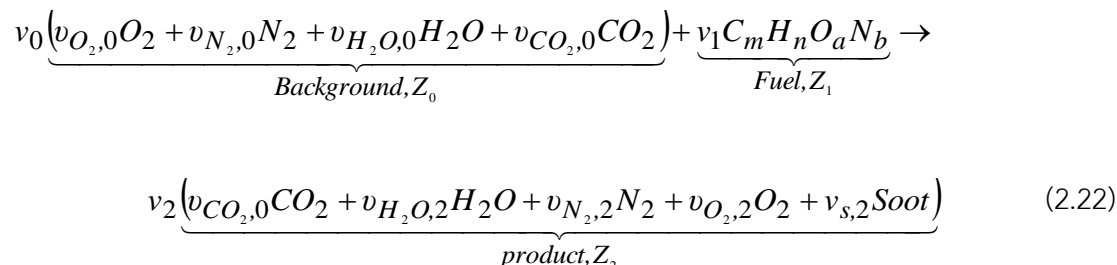
การใช้ Subgrid scale model ของ Smagorinsky [19] สำหรับการจำลองสภาวะการไหลแบบปั่นป่วนในส่วนของการเผาไหม้เพื่อแก้ปัญหาค่าของกริดซึ่งไม่สามารถทำให้ละเอียดเพียงพอที่จะจำลองพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศในการคำนวณซึ่งมีโดเมนการคำนวณขนาดใหญ่ FDS และการวิเคราะห์ความหนืดไหลวนสามารถจำลองดังต่อไปนี้

$$\mu_t = \rho (C_s \Delta)^2 |S| ; |S| = \left(2S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

เมื่อ $C_s = 0.2$ ซึ่งเป็นค่าคงที่ และค่าความกว้างของ Filter คือ $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{1/3}$ และได้ใช้แบบจำลอง Mixture fraction-based infinitely fast chemical reaction บนสมมุติฐานที่ว่า อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศถูกควบคุมโดยอัตราการที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกัน (mixing controlled) ทันทีที่เชื้อเพลิงกับอากาศเข้าผสมกันเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็ว (infinitely fast chemical reaction) ได้เป็นก๊าซผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

Default Hydrocarbon Combustion Chemistry

สมการการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นในโปรแกรม FDS หรือที่เรียกว่า "Simple Chemistry" ถูกกำหนดดังแสดงในสมการที่ 2.22



Carbon monoxide yield และ Soot yield ที่ค่าเริ่มต้นจะเท่ากับ 0 ทั้งนี้สามารถระบุค่า CO yield และ Soot yield (y_{CO} และ y_S ตามลำดับ) ได้เอง โดยค่าของ CO yield และ Soot yield หาได้จากมวลของ CO ในผลิตภัณฑ์ ต่อ มวลของเชื้อเพลิงของปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2.23

$$y_{CO} = \frac{\text{mass CO in product}}{\text{mass of fuel reacted}} \quad (2.23)$$

ในระบบปฏิกิริยานี้ อากาศ คือ Lumped species 0, เชื้อเพลิงคือ Lumped species 1 และ ผลิตภัณฑ์คือ Lumped species 2 ในโปรแกรม FDS การหาสัมประสิทธิ์ stoichiometric ของ CO และ Soot ในผลิตภัณฑ์ Lumped species ดังแสดงในสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$v_2 v_{CO,2} = -v_1 \frac{W_1}{W_{CO}} y_{CO} \quad (2.24)$$

$$v_2 v_{S,2} = -v_1 \frac{W_1}{W_S} y_S \quad (2.25)$$

บทที่ 3

การใช้งานและการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 การใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้โปรแกรมฟรีแวร์ (Freeware program) ซึ่งได้ถูกพัฒนาจากสถาบัน National institute of standards and technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในการสร้างแบบจำลองและแก้ปัญหาเพื่อวิเคราะห์ผลต่างๆ ซึ่งโปรแกรมที่นำมาใช้งาน ได้แก่ Fire dynamics simulation และ Smoke view ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ได้มาตรฐานและมีการนำเอาโปรแกรมทั้งสองนี้ไปใช้ในงานที่มีความเกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) เป็นที่แพร่หลายที่เกี่ยวข้องกับการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ [10, 11, 12, 14, 15, 16, 17]

ในการใช้งานโปรแกรม Fire dynamics simulation และ Smoke view ขั้นตอนแรกจะทำการกำหนดขนาดของอุโมงค์และเลือกขนาดของเซลล์รูปทรงลูกบาศก์ที่ต้องการใช้ในการศึกษาและป้อนข้อมูลใน FDS Mesh Size Calculator ดังแสดงในรูปที่ 3.1

FDS Mesh Size Calculator

Enter x, y, z offsets and your requested cell size in meters

X0: X1:

Y0: Y1:

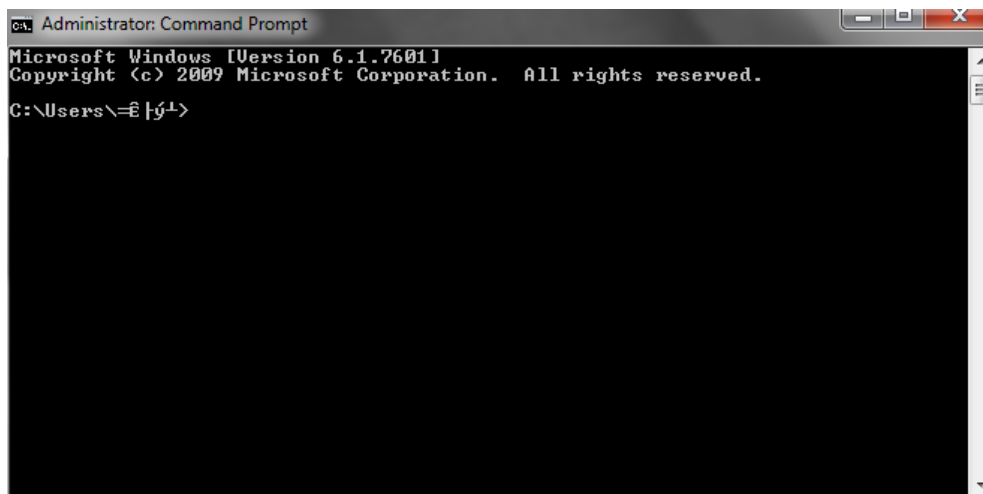
Z0: Z1:

Requested cell size (for dx, dy, and dz):

Calculate MESH Line

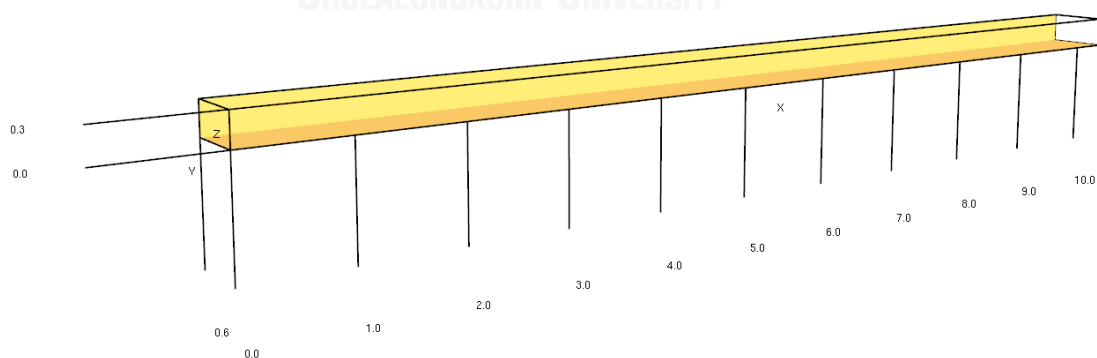
รูปที่ 3.1 โปรแกรมคำนวณเซลล์

เมื่อใส่ค่าทั้งหมดแล้วจะได้จำนวน กริดที่ต้องการใช้ในการคำนวณ จากนั้นทำการสร้าง Note pad โดยทำให้เป็นไฟล์สกุล .FDS เพื่อใช้ในการเขียนคำสั่งในการคำนวณโดยสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ขั้นตอนต่อมาเมื่อทำการเขียนคำสั่งเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการรันโปรแกรม Fire dynamics simulation ผ่าน Command prompt ดังแสดงในรูปที่ 3.2



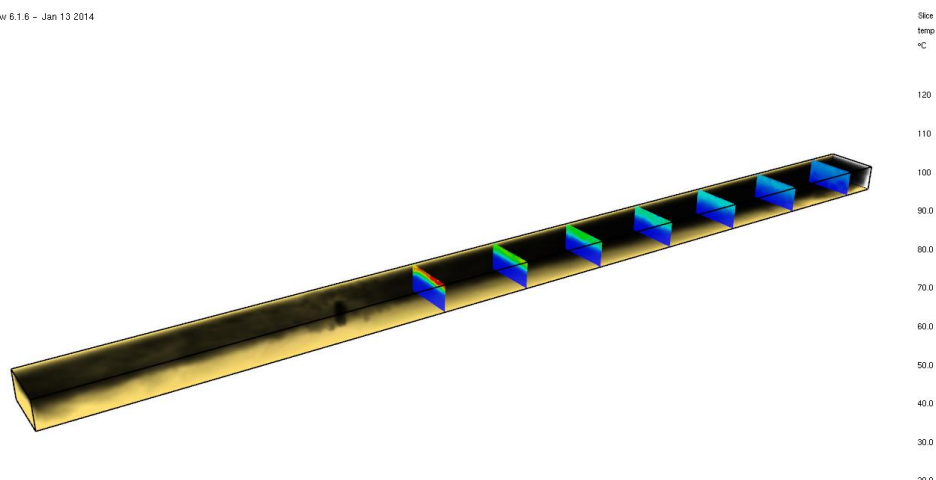
รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Command prompt

รอจนถึงเวลาที่กำหนดในการแสดงผลหรือเวลาที่ใช้คำนวณถือเป็นอันเสร็จสิ้นการคำนวณ และจะสังเกตเห็นไฟล์สกุล .SMV ให้ทำการเปิดด้วยโปรแกรม Smoke view ซึ่งโปรแกรมนี้จะเป็นการแสดงผลในการคำนวณจากโปรแกรม Fire dynamics simulation อาทิเช่น แสดงโดเมนของ อุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษา และการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ สามารถดูรายละเอียดการใช้งานโปรแกรมเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.3 โดเมนของอุโมงค์ที่ใช้ในการศึกษา

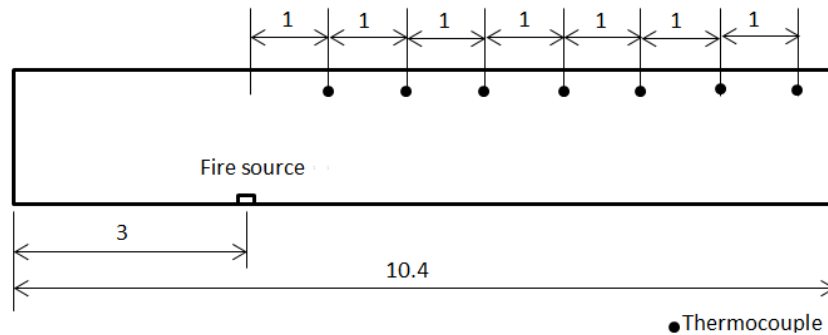
Smokeview 6.1.6 - Jan 13 2014



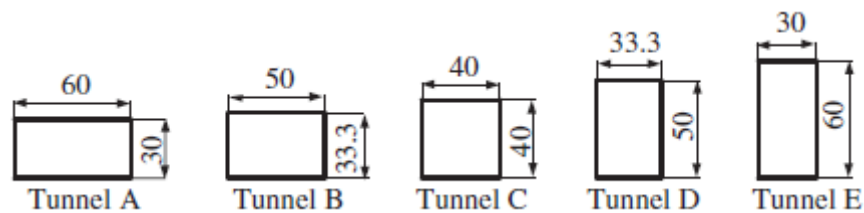
รูปที่ 3.4 ค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ และการเคลื่อนตัวของควัน

3.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้โปรแกรมในการคำนวณ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลในการทำนายลักษณะการไหลในอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้กับผลการทดลองในงานวิจัยของ Lee and Ryou [13, 14] และผลการทดลองเชิงตัวเลขของ Harish and Venkatasubbaiah [15] โดยงานวิจัยทั้งสองนี้ได้ทำการศึกษาด้วยการระบายอากาศตามยาวภายในอุโมงค์ที่มีอัตราส่วนของด้านที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนของด้านสามารถหาได้จากระยะความสูงหารด้วยระยะความยาวและมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 7 จุดใต้เพดานเพื่อทำวัดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางออก โดยอุโมงค์มีความยาว 10.4 เมตร และตำแหน่งของกองเพลิงห่างจากอุโมงค์ทางด้านซ้ายที่เปิดเป็นระยะทาง 3 เมตรดังแสดงรูปที่ 3.5ก และใช้อัตราส่วนของด้านเท่ากับ 0.5 หรือ Tunnel A ในรูปที่ 3.5ข



(ก)



(ข)

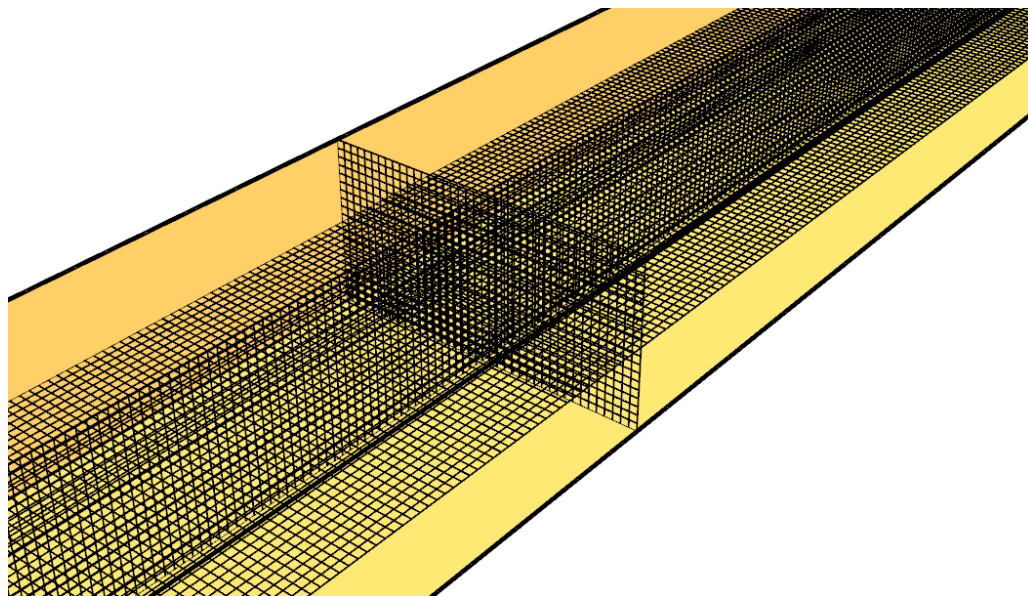
รูปที่ 3.5 แผนภาพและภาพตัดขวางของอุโมงค์ (ก) แผนผังของอุโมงค์ที่ถูกลดขนาด (เมตร)
(ข) ภาพตัดขวางของอุโมงค์ที่ถูกลดขนาด (เซนติเมตร)

วิธีการจำลองแบบเชิงตัวเลข (Numerical simulation method)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดแบบจำลองการไหลปั่นป่วนเป็นแบบ Large eddy simulation (LES) และวิธีการคำนวณปัญหาของการไหลแบบ Explicit, Second-order และ Kinetic-energy-conserving ทั้งนี้ยังกำหนดค่า Schmidt และ Prandtl numbers ให้เป็นค่าคงที่ และระเบียบไฟไนต์วอลุ่มถูกใช้ในสมการการแผ่รังสีของกลุ่มควันสีเทา

การสร้างกริด (Numerical grid)

กริดที่ใช้มีลักษณะของการเรียงตัวที่มีความเป็นระเบียบเรียกว่า Staggered grid โดยจำนวนกริดที่ใช้ในการจำลองคือ $650 \times 40 \times 20$ เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



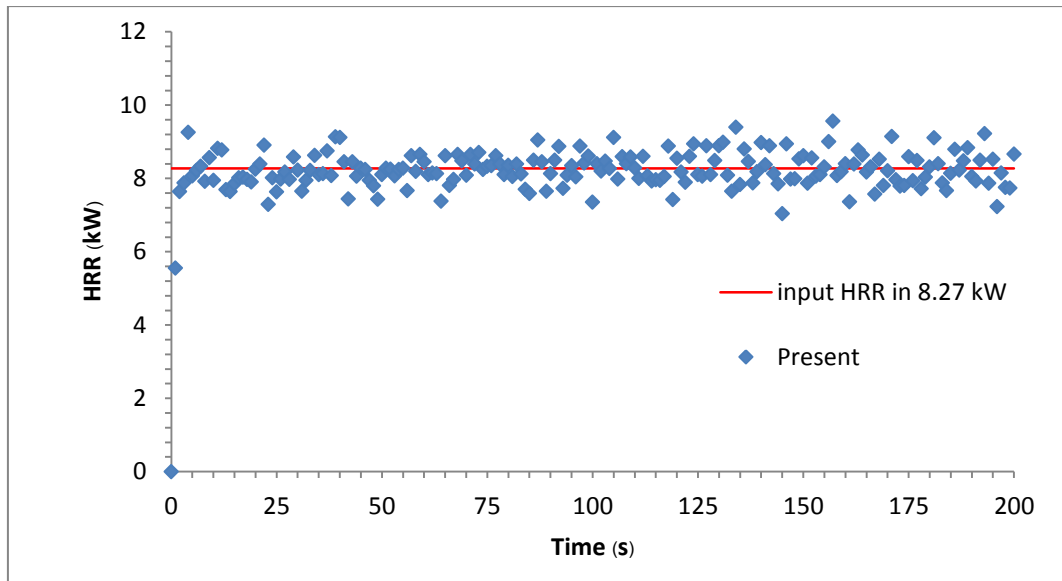
รูปที่ 3.6 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลอง

เงื่อนไขของปัญหา

1. เวลาที่ใช้ในการแสดงผลและการคำนวณ คือ 200 วินาที
2. อุโมงค์มีอัตราส่วน 1 ต่อ 20 โดยมีขนาดความยาว 10.4 เมตร ความกว้าง 0.6 เมตร และความสูง 0.3 เมตร
3. ฐานเพลิงเป็นรูปกล่องลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์มิลลิเมตรห่างจากต้นอุโมงค์เป็นระยะทาง 3 เมตร
4. อัตราการปล่อยความร้อนที่ 8.27 กิโลวัตต์
5. เชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่ เอทานอล
6. บริเวณอุโมงค์ฝั่งซ้าย และขวาเปิดสู่ออกบรรยากาศ
7. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิที่ 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 เมตร

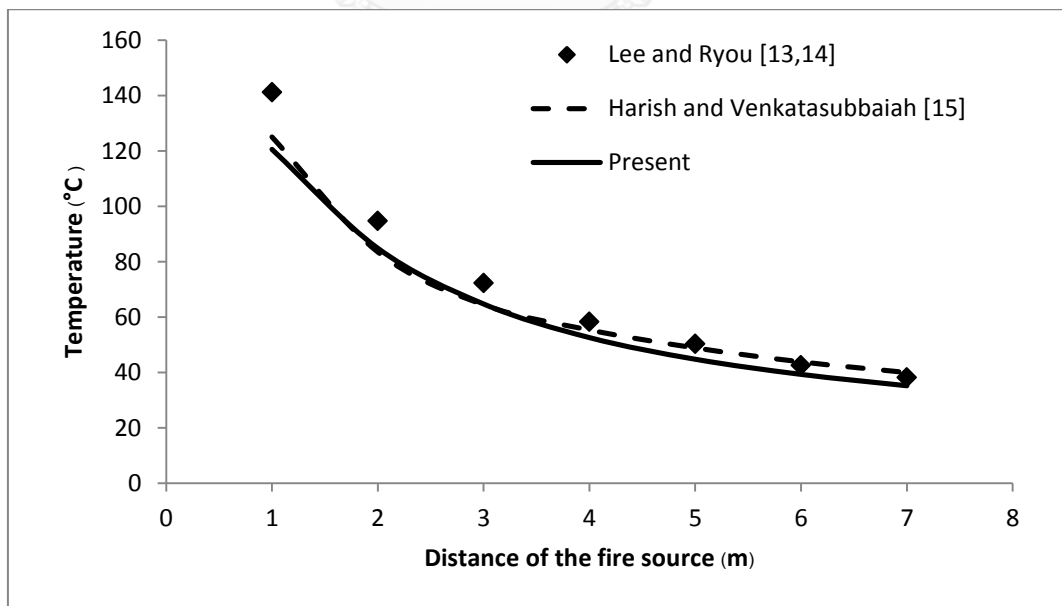
ผลการทดลอง

เพื่อให้แน่ใจว่าค่าอัตราการปล่อยความร้อน หรือ Heat Release Rate (HRR) ที่ได้มาจากการคำนวณจำเป็นต้องมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ค่า Heat Release Rate ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาต่างๆ

รูปที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการวิจัยเชิงตัวเลขของ Harish and Venkatasubbaiah [15] และผลจากการทดลองของ Lee and Ryou [13, 14] ในส่วนของการวัดค่าอุณหภูมิพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 3.8 การเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิที่วัดได้ตลอดความยาวของอุโมงค์

บทที่ 4

วิเคราะห์และสรุปผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงไว้ในบทที่ 4 นั้น แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้โปรแกรมในการจำลองได้อย่างถูกต้อง ในบทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมกับการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของควัน ความเข้มข้นของก๊าซ CO และการกระจายตัวของอุณหภูมิซึ่งเป็นหัวข้อหลักในการวิจัยนี้ โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 15 กรณีดังแสดงในตารางที่ 4.1

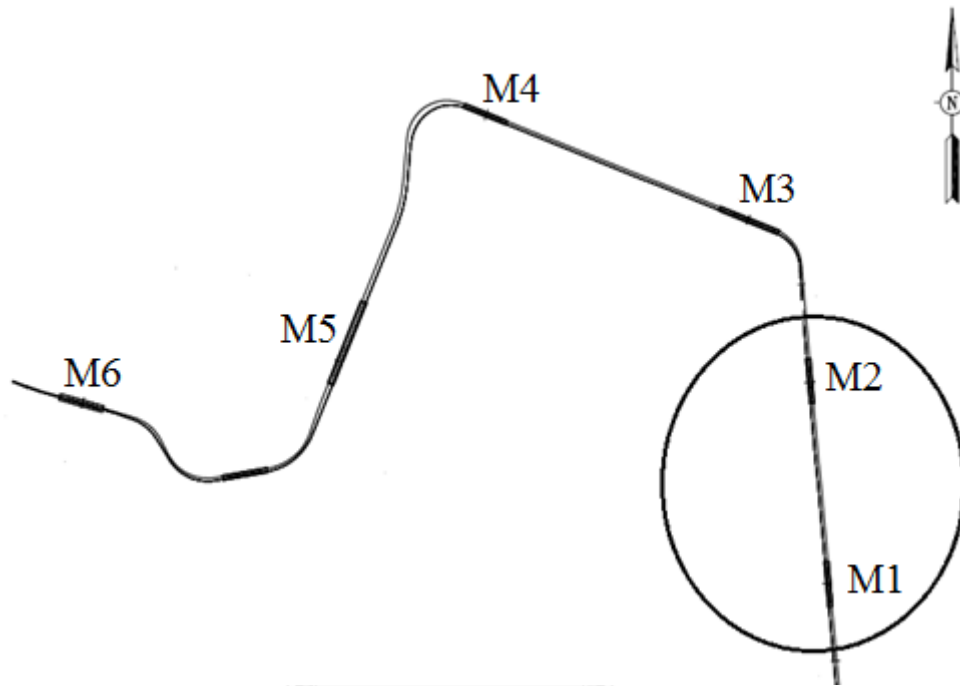
ตารางที่ 4.1 กรณีในการศึกษา

กรณีในการศึกษา	ตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้	ระบบระบายอากาศ	ค่าความเร็วลมโดยปริมาตร (ลบ.ม ต่อ วินาที)	ชนิดของระบบระบายอากาศ
กรณีที่ 1	หัวขบวนรถไฟ	แบบธรรมชาติ	-	-
กรณีที่ 2	กลางขบวนรถไฟ	แบบธรรมชาติ	-	-
กรณีที่ 3	ท้ายขบวนรถไฟ	แบบธรรมชาติ	-	-
กรณีที่ 4	หัวขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	1
กรณีที่ 5	กลางขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	1
กรณีที่ 6	ท้ายขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	1
กรณีที่ 7	หัวขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	1
กรณีที่ 8	กลางขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	1
กรณีที่ 9	ท้ายขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	1
กรณีที่ 10	หัวขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	2
กรณีที่ 11	กลางขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	2
กรณีที่ 12	ท้ายขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	55	2
กรณีที่ 13	หัวขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	2
กรณีที่ 14	กลางขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	2
กรณีที่ 15	ท้ายขบวนรถไฟ	แบบบังคับ	70	2

4.1 ลักษณะของปัญหา

สำหรับการศึกษาการเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินนั้น จะพิจารณาการไหลแบบสามมิติ โดยมีเงื่อนไขในการจำลองดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเส้นทางการเดินจากสถานี (M2) ไป สถานี (M1) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

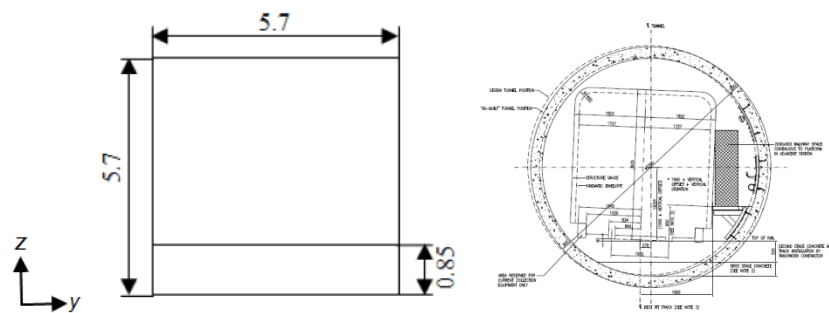


รูปที่ 4.1 แบบการเดินรถของรถไฟฟ้า MRT

2. ศึกษาในช่องทางการเดินรถ South Bound โดยอุโมงค์มีขนาดความยาว 1013 เมตร ความกว้าง 5.7 เมตร และความสูง 5.7 เมตร ในความเป็นจริงลักษณะของอุโมงค์เป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.7 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2



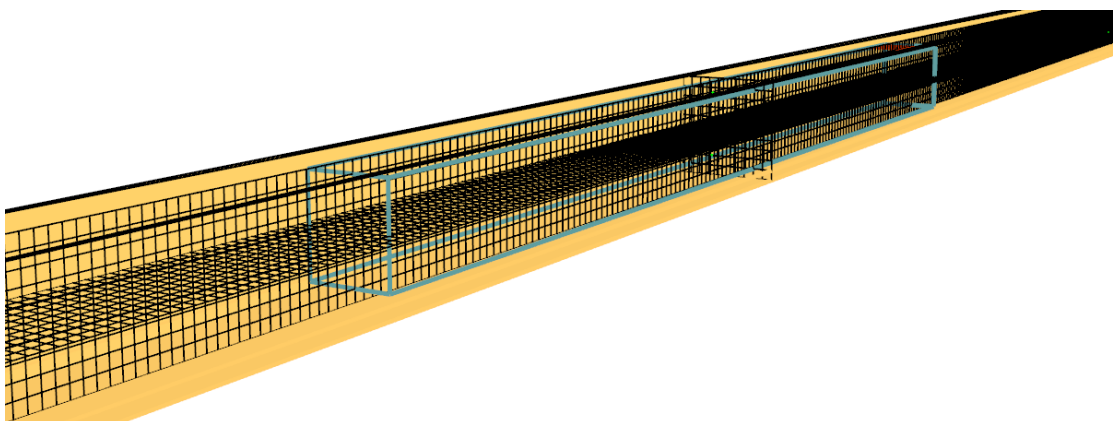
(ก)



(ข)

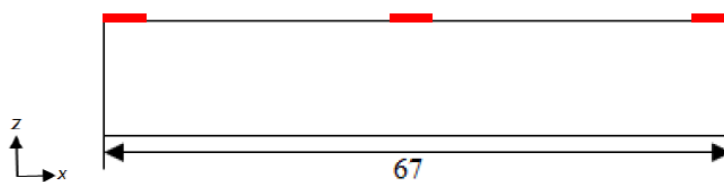
รูปที่ 4.2 รูปแบบของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) รูปแบบของรถไฟฟ้า MRT (ข) หน้าตัดของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดลองและอุโมงค์จริง (หน่วย : เมตร)

3. ใช้กริดขนาด 1875 x 10 x 10 ดังแสดงในรูปที่ 4.3

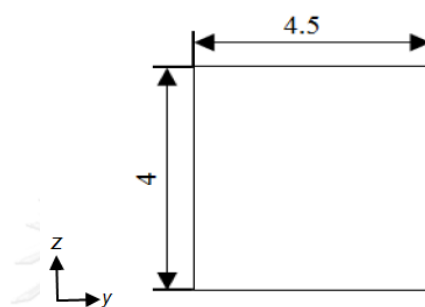


รูปที่ 4.3 รูปแบบของกริดที่ใช้ในการจำลอง

4. ตัวรถไฟฟ้าใต้ดินมีความยาว 67 เมตร ความสูง 4 เมตร และความกว้าง 4.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4



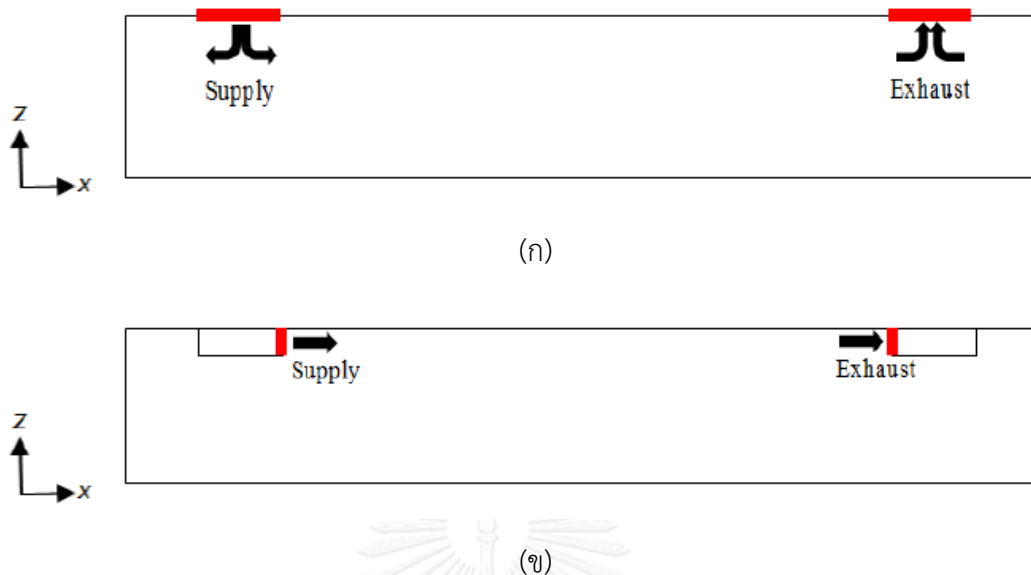
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.4 ขนาดของรถไฟฟ้าใต้ดิน (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านหน้า (หน่วย : เมตร)

4. เวลาที่ใช้ในการแสดงผลและการคำนวณ คือ 600 วินาที หรือ 10 นาที
5. บริเวณอุโมงค์ฝั่งซ้าย และขวาถูกเปิดออก
6. ตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้แบ่งออกเป็นหัว กลาง และท้ายขบวนรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.4ก
7. อัตราการปล่อยความร้อนของเพลิงไหม้ที่ 5 เมกะวัตต์
8. ระบบระบายอากาศที่ใช้มี 2 แบบ คือ แบบธรรมชาติ และ แบบบังคับโดยในระบบระบายอากาศแบบบังคับแบ่งชนิดออกเป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 และ ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.5

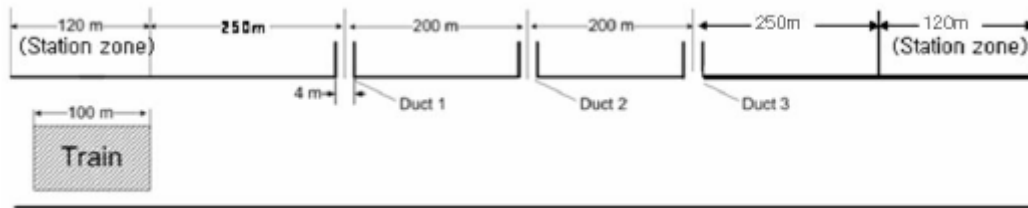


รูปที่ 4.5 ระบบระบายอากาศแบบบังคับ (ก) ระบบระบายชนิดที่ 1 (ข) ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2

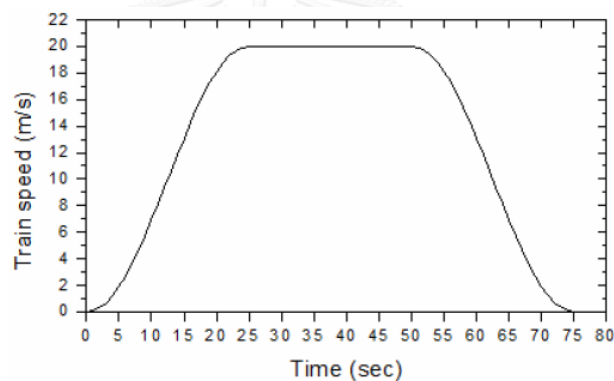
Huang et al. [20] ได้ทำการศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของอากาศในระบบระบายอากาศทางธรรมชาติที่มีลักษณะไม่คงที่ในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินในกรุงโซล ประเทศเกาหลีใต้ โดยใช้วิธีการ Dynamics layering สำหรับขอบเขตของการเคลื่อนที่ของรถไฟ เพื่อทำนายการกระจายตัวของค่าความดัน ความเร็วของอากาศในอุโมงค์ และค่าอัตราการไหลของมวลอากาศที่ถูกระบายผ่านปล่องระบายอากาศ ผลที่ได้พบว่าการดูด และการระบายอากาศทางธรรมชาติในปล่องระบายอากาศได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงจากการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าใต้ดิน เมื่อรถไฟเข้าใกล้ปล่องระบายอากาศที่เวลา 24.42 วินาทีอากาศจะถูกผลักออกจากอุโมงค์ผ่านปล่องระบายอากาศทำให้เกิดอัตราการไหลของมวลอากาศที่ระบายออกสูงสุด เมื่อรถไฟเคลื่อนตัวผ่านปล่องระบายอากาศที่เวลา 30.42 วินาทีอากาศจะถูกดูดเข้ามาโดยเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากการระบายสู่การดูดอากาศและพบค่าสูงสุดของอัตราการไหลของมวลอากาศที่ดูดเข้า

จากงานวิจัยของ Huang et al. [20] ได้ใช้ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.6 และค่าความเร็วของตัวรถไฟที่ออกจากสถานีหนึ่งและเข้าสู่อีกสถานีหนึ่งแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อที่เวลา 24.42 วินาทีรถไฟฟ้าเคลื่อนตัวมาถึงใกล้กับปล่องระบายควันปล่องแรกที่ระยะทาง 240 เมตรมีความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที จากการเคลื่อนตัวของรถไฟในอุโมงค์มีลักษณะคล้ายการทำงานของลูกสูบ หรือเรียกว่าปรากฏการณ์ลูกสูบ (Piston effect) ส่งผลให้เกิดความดันที่มีค่าสูง โดยในงานวิจัยนี้ตำแหน่งการติดตั้งพัดลม TVF-02 ในระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 2 อยู่ห่างจากสถานี M2 เป็นระยะทาง

10 เมตร เมื่อรถไฟเคลื่อนตัวออกจากสถานี M2 พบว่ายังมีความเร็วไม่สูงมากนักจึงไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับตัวพัดลมได้เช่นเดียวกับพัดลม TVF-04 ที่ติดกับสถานี M1 รถไฟจะลดความเร็วเพื่อเข้าจอดสถานี M1 ดังนั้นจึงไม่เกิดความเสียหายจากปรากฏการณ์ลูกสูบ แต่อุโมงค์จริงมีลักษณะโค้งอาจทำให้เกิดปัญหาในการติดตั้งพัดลมในรูปแบบนี้ได้



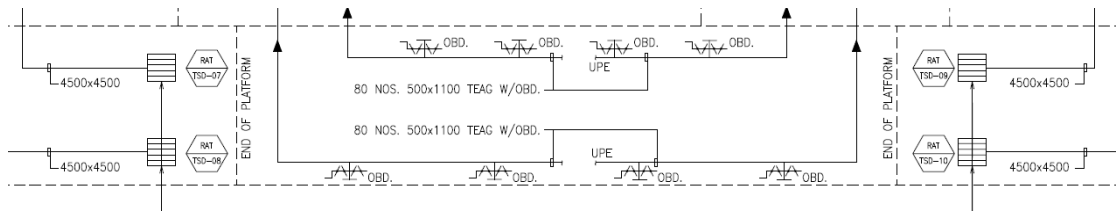
รูปที่ 4.6 อุโมงค์รถไฟใต้ดินในกรุงโซล ประเทศเกาหลี Huang et al. [20]



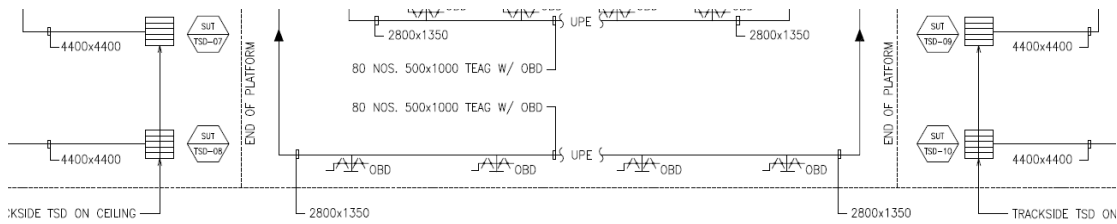
รูปที่ 4.7 ความเร็วของรถไฟใต้ดินในการเคลื่อนที่ Huang et al. [20]

9. ขนาดของช่องพัดลมใกล้กับสถานี M2 มีขนาด 4.5 x 4.5 ตารางเมตร (TVF-02) และที่ติดกับสถานี M1 มีขนาด 4.4 x 4.4 ตารางเมตร (TVF-04) ดังแสดงในรูปที่ 4.8ก และ ข ตามลำดับ

10. ระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 มีพื้นที่หน้าตัดของพัดลมที่ 20.25 และ 19.36 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9ก และ ข ตามลำดับ

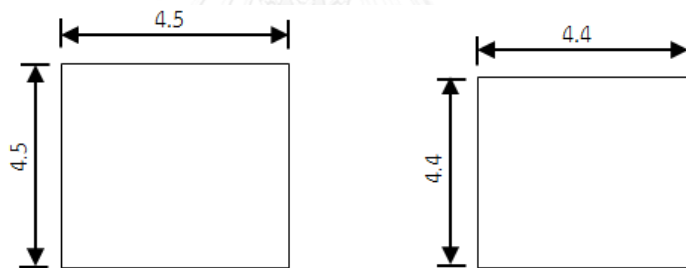


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 การวางตัวของพัดลมระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน MRT
(ก) สถานี M2 (ข) สถานี M1



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 ขนาดของช่องพัดลมระบายอากาศชนิดที่ 1 (ก) TVF-02 (ข) TVF-04

11. ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 มีพื้นที่หน้าตัดของพัดลมที่ 2.475 และ 2.420 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10ก และ ข ตามลำดับ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 ขนาดของช่องพัดลมระบายอากาศชนิดที่ 2 (ก) TVF-02 (ข) TVF-04

12. ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรในระบบระบายอากาศแบบบังคับอยู่ที่ 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

13. ตำแหน่งวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO และการกระจายตัวของอนุภาคที่มีบริเวณกึ่งกลางของทางหนีไฟและมีการตั้งจุดวัดอนุภาคที่มีความสูง 2.35 เมตร (สูงจากพื้นคอนกรีต 1.5 เมตร) แต่ละจุดห่างกัน 100 เมตร จำนวน 11 จุด

4.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง

4.2.1 ความปลอดภัยในชีวิตเมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้

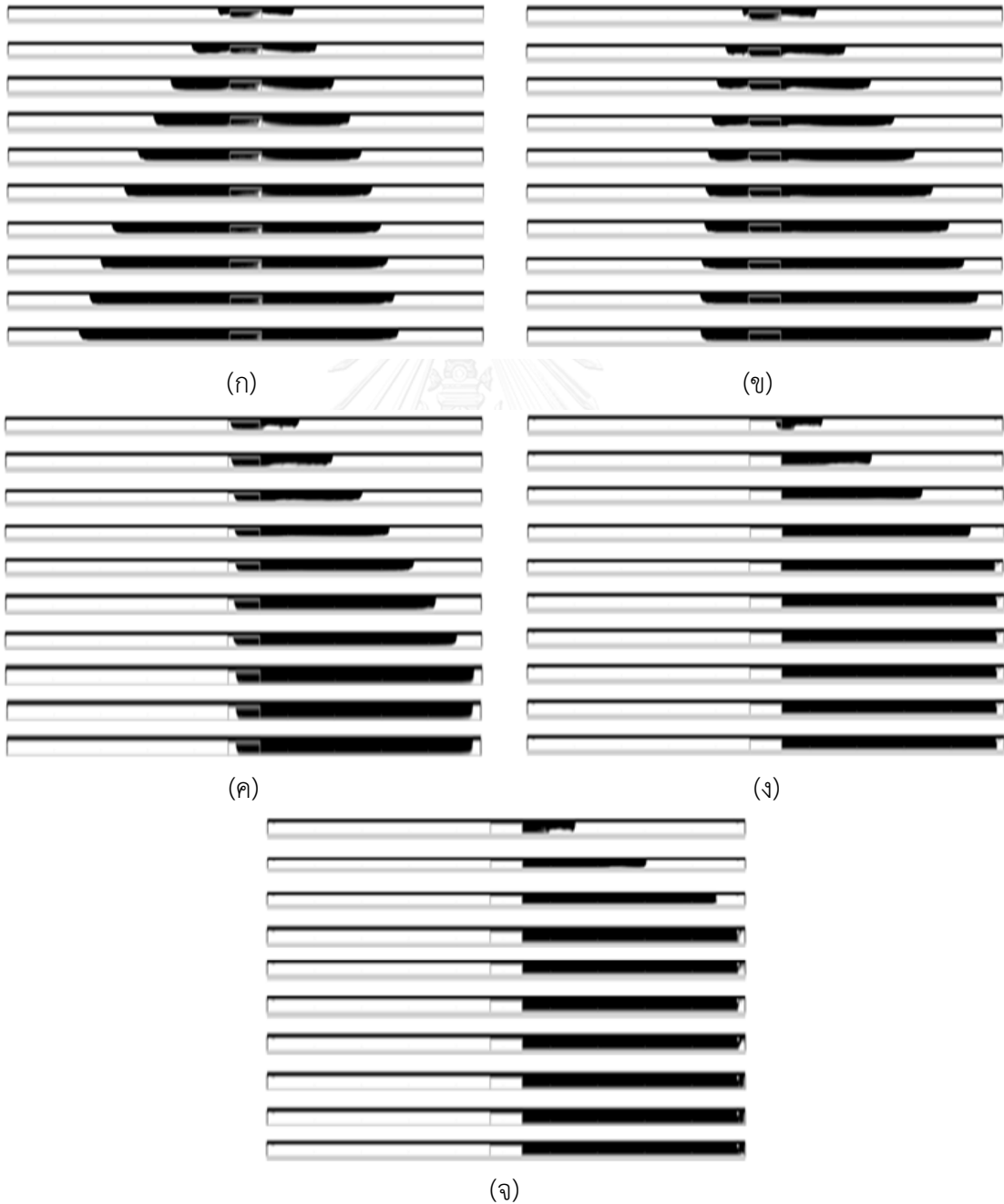
สถานการณ์ที่เป็นอันตรายมากที่สุดคือการเกิดเหตุเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ความร้อน และก๊าซ พิษที่เป็นสาเหตุของการตาย Hadjisophocleous and Benichou [21] ได้รายงานถึงเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินโดยมีเงื่อนไขดังนี้

ตารางที่ 4.2 เกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน

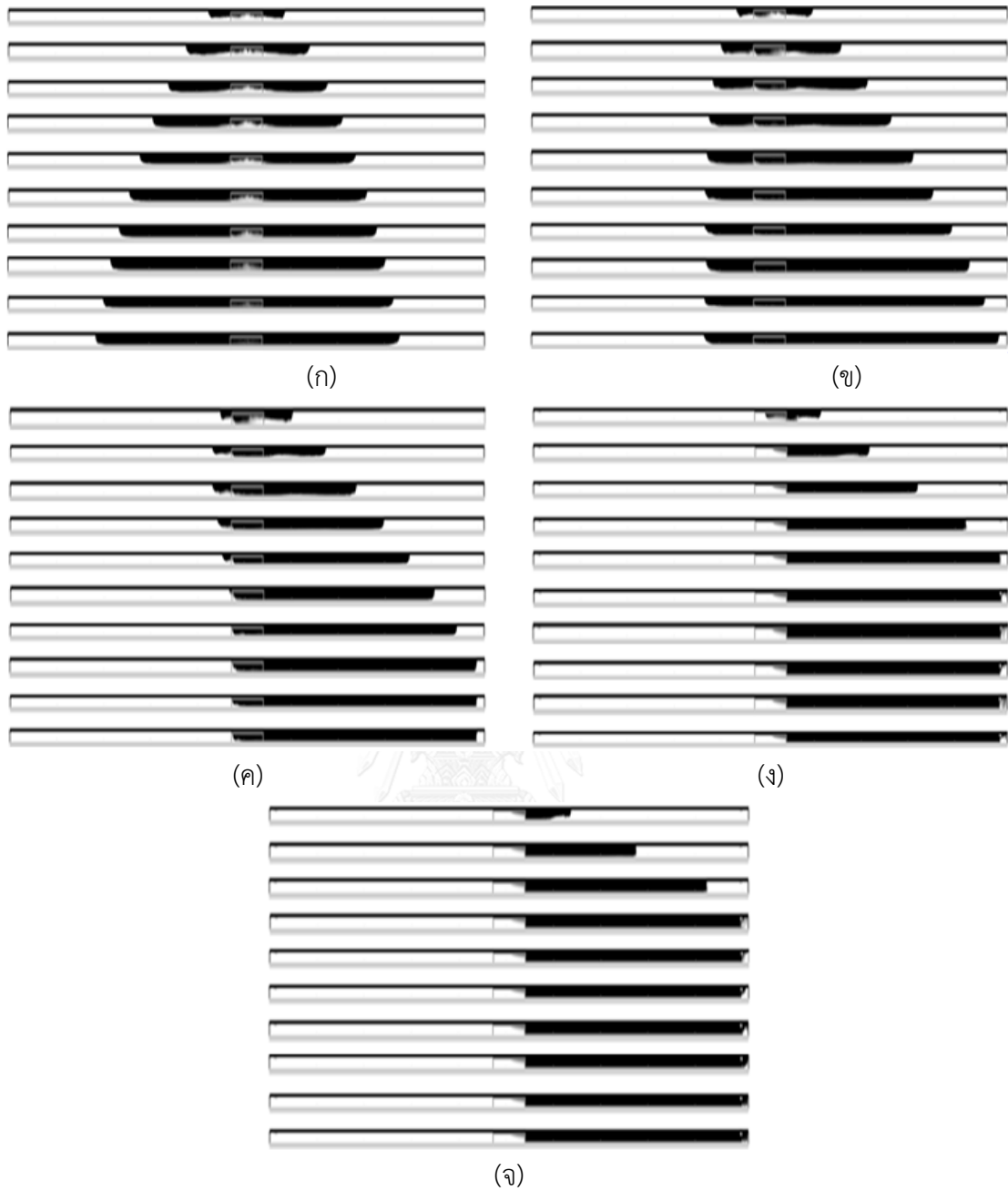
ตัวแปร	ข้อจำกัดของตัวแปรที่ไม่ส่งผลให้เกิดอันตราย
การพาความร้อน (Convection Heat)	อุณหภูมิของชั้นก๊าซมีค่าไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส
ทัศนวิสัยในการมองเห็น (Smoke Obscuration)	ทัศนวิสัยในการมองเห็นไม่ควรต่ำกว่า 2 เมตร
ความเป็นพิษ (Toxicity)	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของก๊าซ CO น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1,400 ppm (สำหรับเด็กเล็กควรมีค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO น้อยกว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO ผู้ใหญ่ครึ่งหนึ่ง) - HCN ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 ppm - O₂ ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 12% - CO₂ ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5%

4.2.2 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์

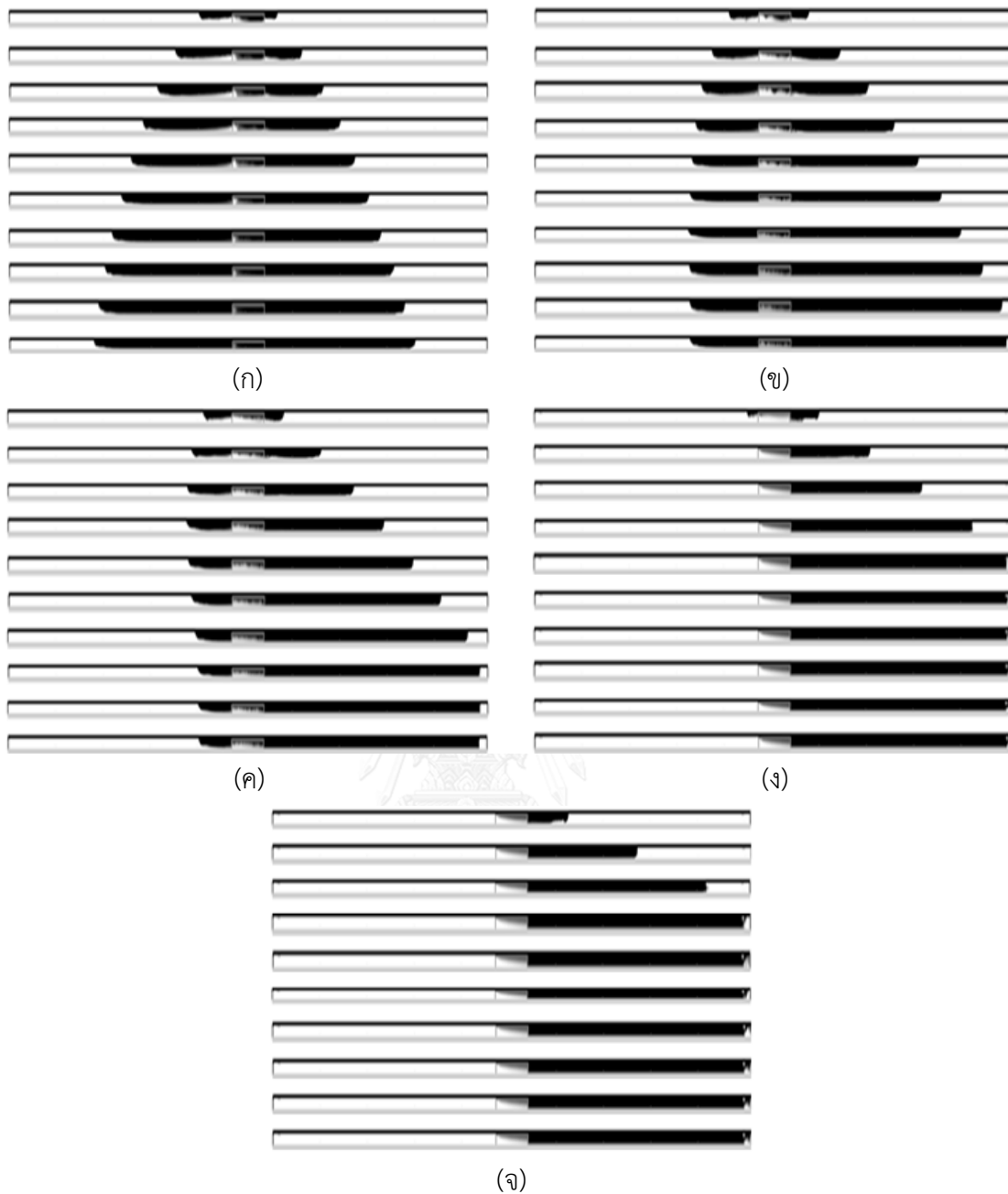
การแสดงผลการเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์ โดยในแต่ละกรณีจะแสดงผลการเคลื่อนที่ของควันทุกๆ 60 วินาทีจนถึง 600 วินาที กล้องสี่เหลี่ยมด้านในอุโมงค์คือรถไฟฟ้าใต้ดิน MRT และควันมีสีดำ ในรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 เป็นการแสดงผลการเคลื่อนตัวของควันที่มีการเกิดเพลิงไหม้ที่บริเวณด้านหน้า กึ่งกลาง และท้ายขบวนของรถไฟฟ้าใต้ดินตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การเคลื่อนตัวของควันภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



รูปที่ 4.12 การเคลื่อนตัวของควันทันภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



รูปที่ 4.13 การเคลื่อนตัวของคว้นภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ทำยขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

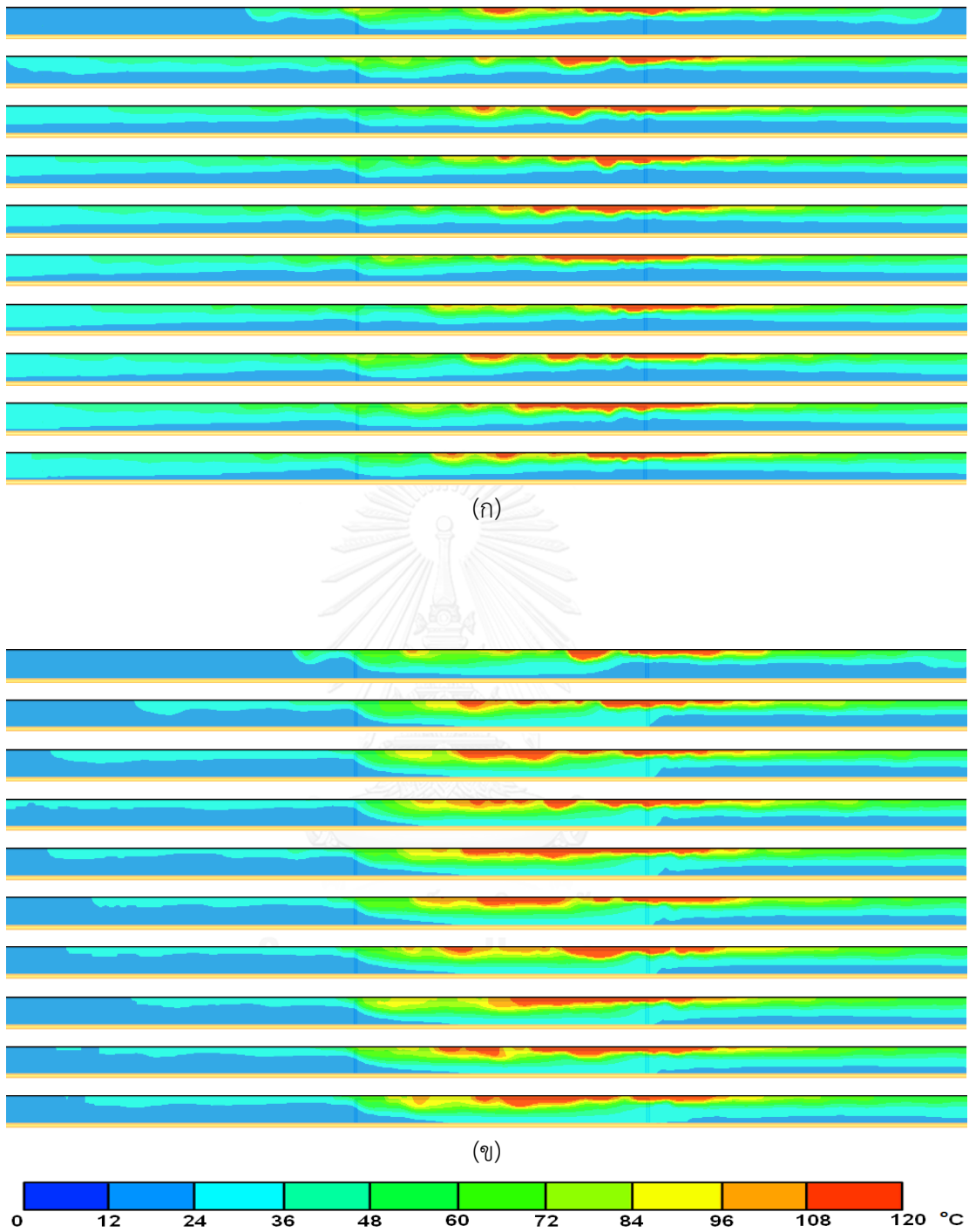
รูปที่ 4.11 แสดงพฤติกรรมการกระจายตัวของควันทันไฟภายในอุโมงค์โดยเหตุเพลิงไหม้เกิดที่บริเวณหัวขบวนของรถไฟใต้ดินในระบบระบายอากาศต่างชนิด โดยในกรณีที่ 1 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ ส่วนในกรณีที่ 4, 7, 10 และ 13 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบบังคับ โดยในกรณีที่ 4 และ 7 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และในกรณีที่ 10 และ 13 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าในกรณีที่ 1 ควันทันจะลอยไปทั้งด้านหน้าและหลังของตัวรถไฟใต้ดินอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงวินาทีที่ 420 ความเร็วในการเคลื่อนตัวของควันทันมีการชะลอตัวลงพร้อมกับทำให้เกิดควันทันหนาแน่นเต็มอุโมงค์เมื่อมีการใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 พบว่าในกรณีที่ 4 ยังมีระยะทางในการไหลย้อนกลับของควันทันที่ลดลงแต่ความหนาแน่นของปริมาณควันทันยังมีค่ามากอยู่ที่ช่วงท้ายขบวนของรถไฟใต้ดิน และเมื่อเพิ่มความเร็วลมในกรณีที่ 7 พบว่าทำให้เกิดระยะเวลาไหลย้อนกลับของควันทันลดลงจากในกรณีที่ 4 แต่ยังไม่เพียงพอเนื่องจากควันทันจำนวนมากยังลอยอยู่หนาแน่นที่ช่วงกลางขบวนรถไฟตลอดระยะเวลา 600 วินาที จึงได้เปลี่ยนมาใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 พบว่า ใช้เวลา 28 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทันในกรณีที่ 10 และเมื่อเพิ่มความเร็วลมใช้เวลา 20 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทันในกรณีที่ 13

พฤติกรรมการกระจายตัวของควันทันไฟภายในอุโมงค์โดยเหตุเพลิงไหม้เกิดที่บริเวณกึ่งกลางขบวนของรถไฟใต้ดินในระบบระบายอากาศต่างชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยในกรณีที่ 2 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ ส่วนในกรณีที่ 5, 8, 11 และ 14 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบบังคับ โดยในกรณีที่ 5 และ 8 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และในกรณีที่ 11 และ 14 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าในกรณีที่ 2 ควันทันจะแพร่ไปทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของอุโมงค์เรื่อยๆจนถึงวินาทีที่ 540 เริ่มมีความเร็วในการเคลื่อนตัวของควันทันลดลง ในกรณีที่ 5 และ กรณีที่ 7 ซึ่งเป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 ยังไม่สามารถระบายควันทันออกไปได้หมด โดยในกรณีที่ 5 ควันทันที่มีความเข้มข้นสูงยังคงลอยตัวอยู่หนาแน่นเต็มบริเวณในด้านหลังของตัวรถไฟ เมื่อเพิ่มความเร็วลมในกรณีที่ 7 ยังพบว่าควันทันของลอยนิ่งอยู่ที่บริเวณด้านท้ายเช่นเดียวกัน เมื่อทำการใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ในกรณีที่ 11 และ 14 พบว่าในกรณีที่ 11 ใช้ระยะเวลา 33 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทัน และใช้ระยะเวลาที่ 17 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทันในกรณีที่ 14

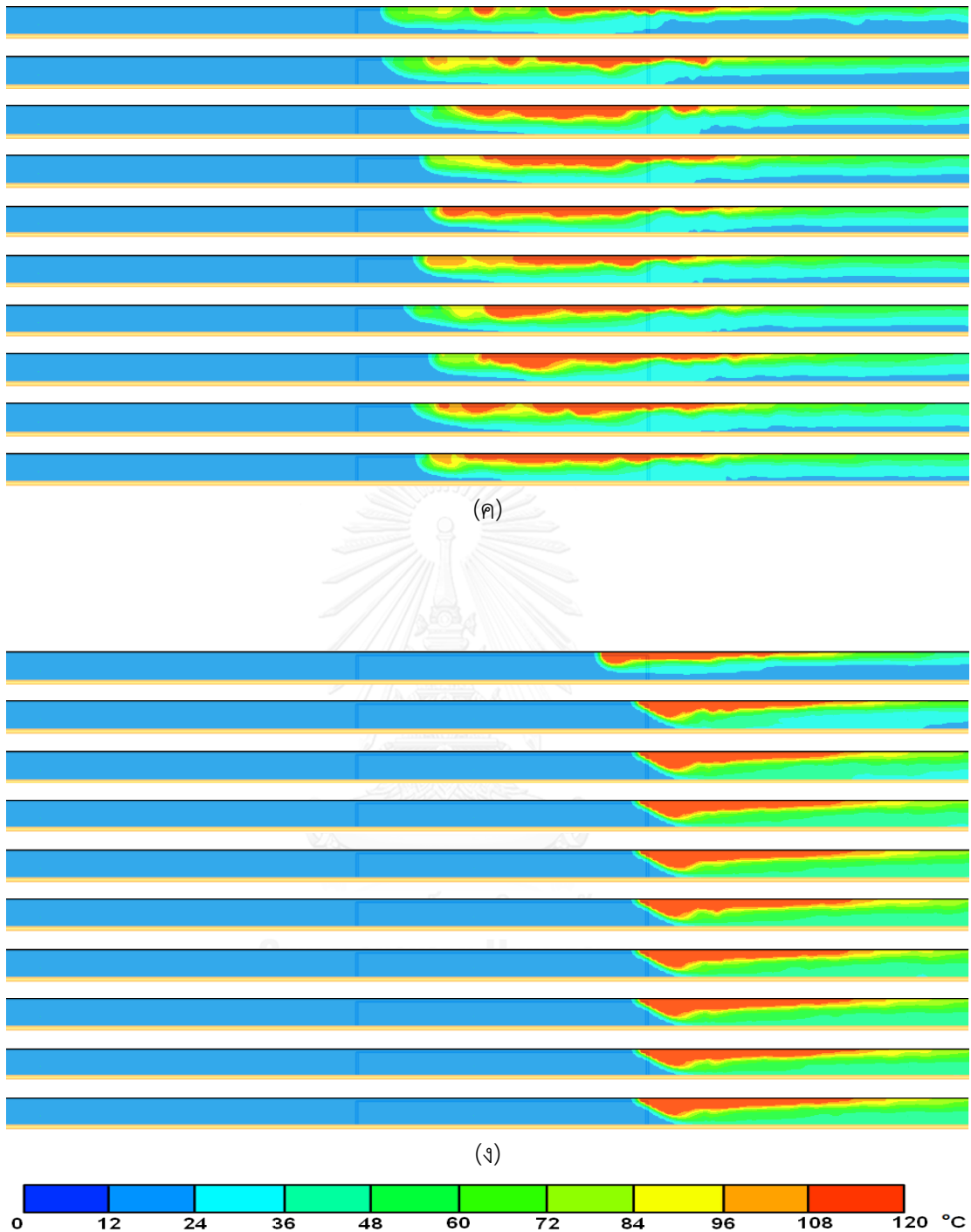
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะการกระจายตัวของควันทันไฟภายในอุโมงค์โดยเหตุเพลิงไหม้เกิดที่บริเวณท้ายขบวนของรถไฟใต้ดินในระบบระบายอากาศต่างชนิด โดยในกรณีที่ 3 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ ส่วนในกรณีที่ 6, 9, 12 และ 15 จะเป็นระบบระบายอากาศแบบบังคับ โดยในกรณีที่ 6 และ 9 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และในกรณีที่ 12 และ 15 เป็นระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ที่ความเร็วลม 55 และ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าในกรณีที่ 3 6 และ 9 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับผลที่ได้จากเพลิงไหม้ที่บริเวณด้านหัวและกึ่งกลางขบวนรถไฟ คือยังมีควันทันลอยหนาแน่นที่บริเวณด้านท้ายของรถไฟอยู่ และเมื่อทำการใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ในกรณีที่ 12 และ 15 พบว่าในกรณีที่ 11 ใช้ระยะเวลา 41 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทัน และใช้ระยะเวลาที่ 24 วินาทีในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันทันในกรณีที่ 14 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 มีประสิทธิภาพในการระบายควันทันดีที่สุด ในกรณีที่เพลิงไหม้เกิดขึ้นที่บริเวณหัว กลาง และท้ายขบวนรถไฟจะอยู่ในช่วงวิกฤตที่ระยะเวลา 20 17 และ 24 วินาทีตามลำดับเนื่องจากแก๊สพิษและความร้อนที่แพร่มาทางท้ายของขบวนรถไฟซึ่งเป็นเส้นทางในการอพยพและหลังจากระยะเวลาดังกล่าวเป็นต้นไปเหตุการณ์จะอยู่ในสถานการณ์ที่สามารถควบคุมได้โดยควันทันและความร้อนทั้งหมดจะถูกระบายออกไปทางขวาของอุโมงค์ทั้งหมดซึ่งส่งผลทำให้เกิดความปลอดภัยในเส้นทางการอพยพ

4.2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

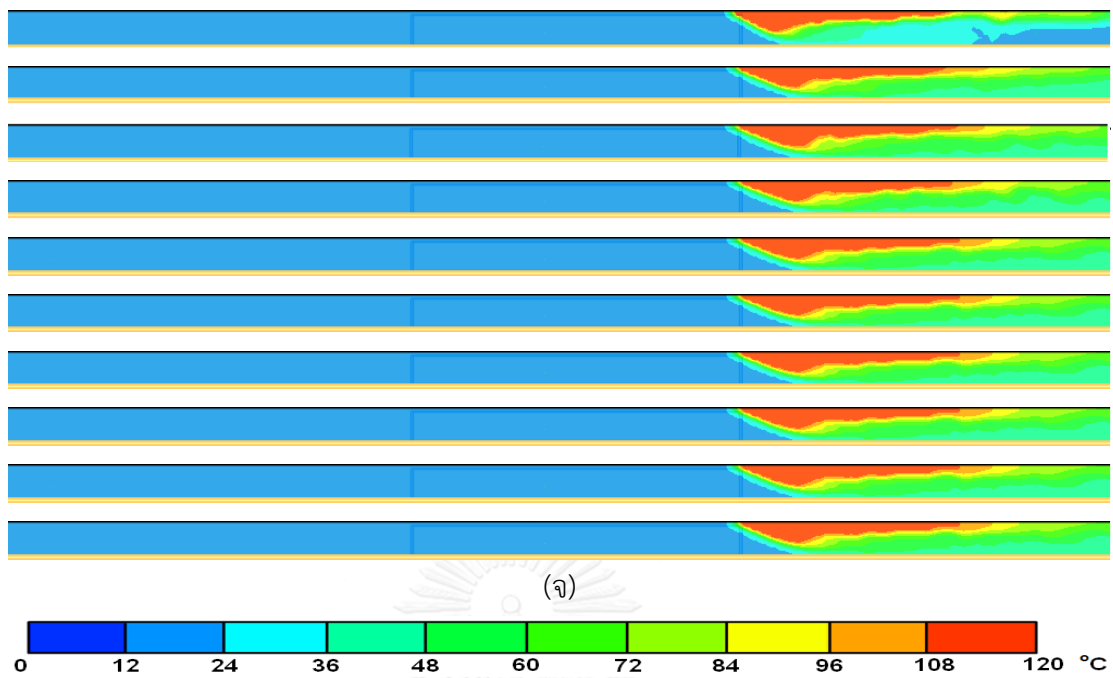
จากเกณฑ์ความปลอดภัยภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดิน ได้กำหนดให้อุณหภูมิของชั้นก๊าซต้องมีค่าไม่เกิน 65 องศาเซลเซียส และที่บริเวณเพดานไม่ควรมีค่าเท่ากับ 200 องศาเซลเซียสนานเกิน 20 วินาที (ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้ Weng et al. [16] ได้กล่าวถึงระยะความสูงที่ส่งผลทำให้เกิดอันตรายในการหายใจที่ 1.5 เมตร โดยในการศึกษาครั้งนี้จะอยู่ที่ 2.35 เมตร เนื่องจากมีการเทพื้นคอนกรีตสูง 0.85 เมตร ในรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 เป็นการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้บริเวณหัว กึ่งกลาง และท้ายขบวนรถไฟ ตามลำดับ โดยผลที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิมีค่าไม่ถึง 200 องศาเซลเซียส



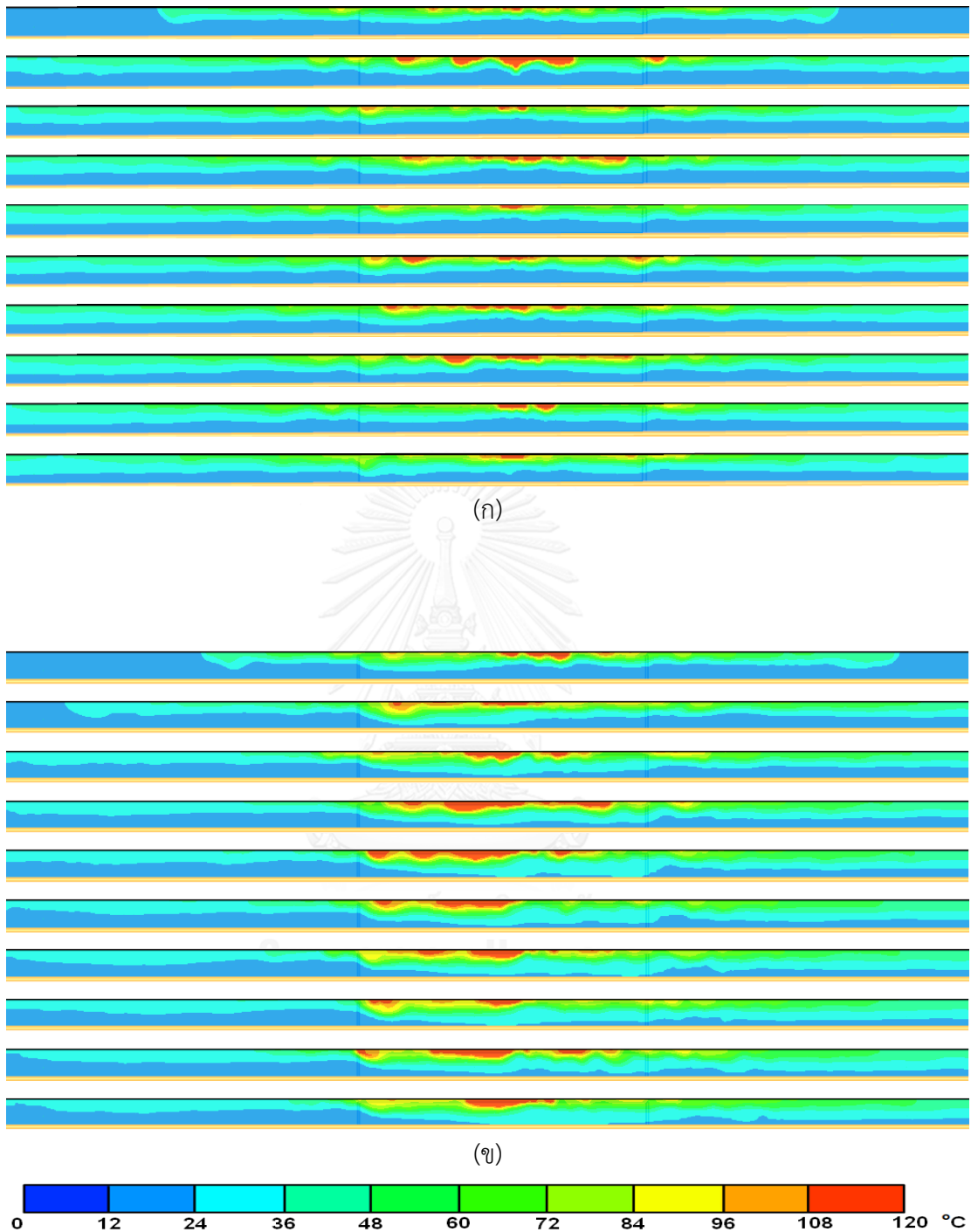
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้หัวขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



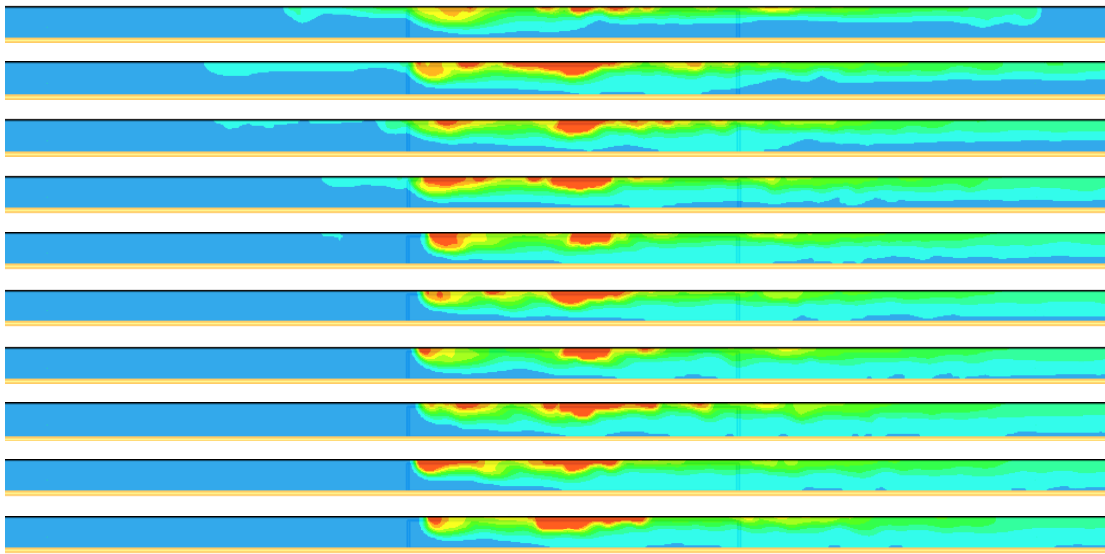
รูปที่ 4.14 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้หัวขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



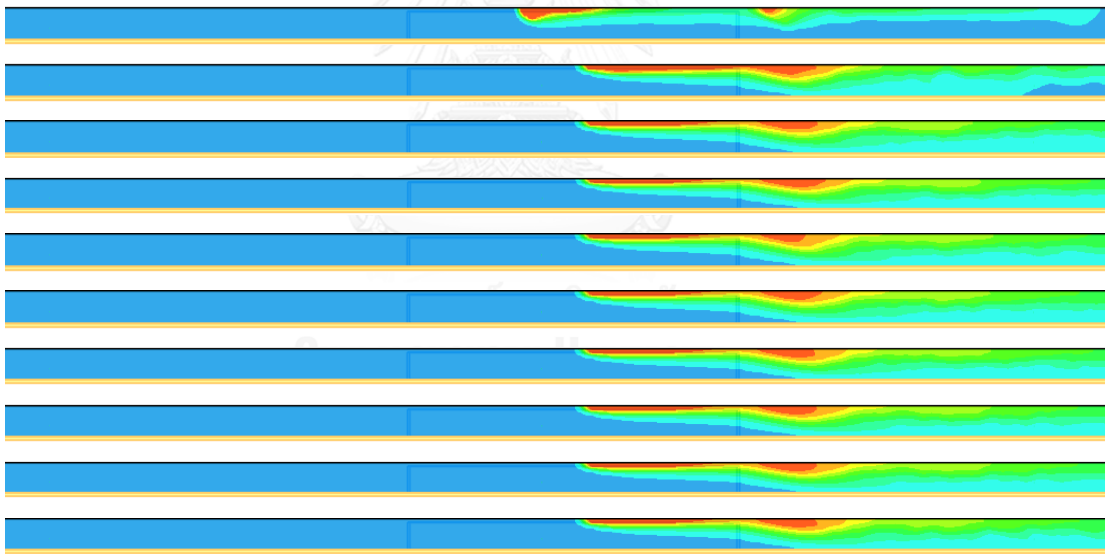
รูปที่ 4.14 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้หัวขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



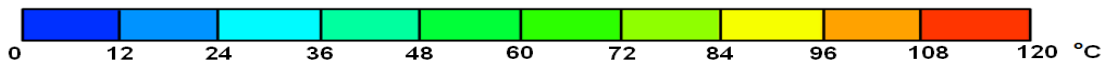
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



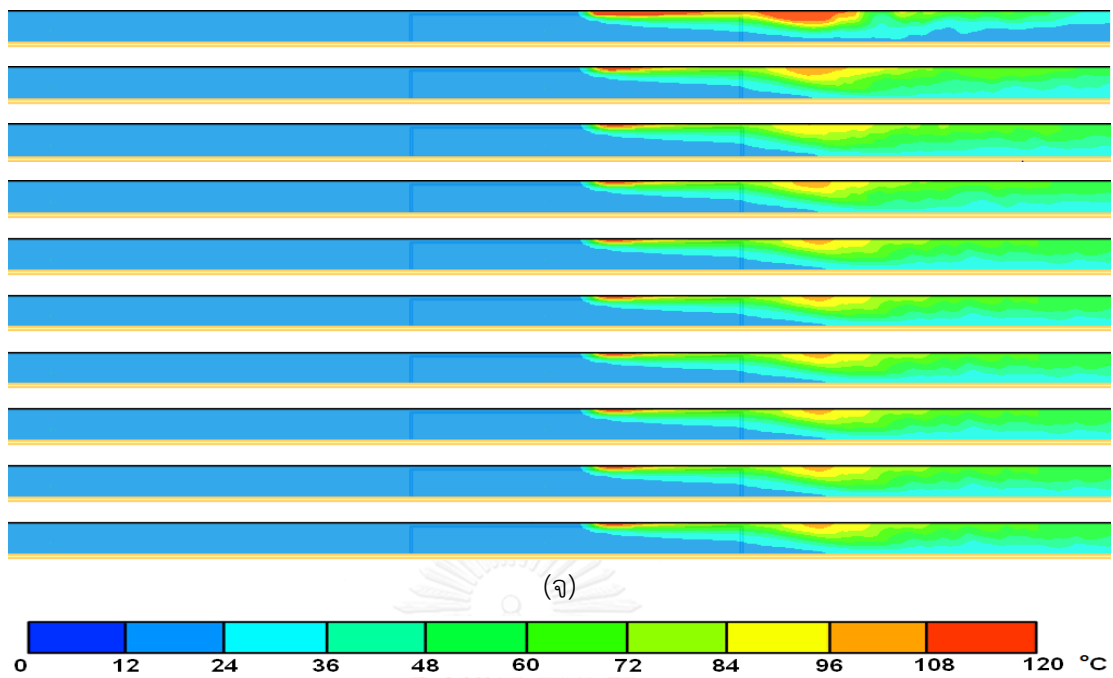
(ค)



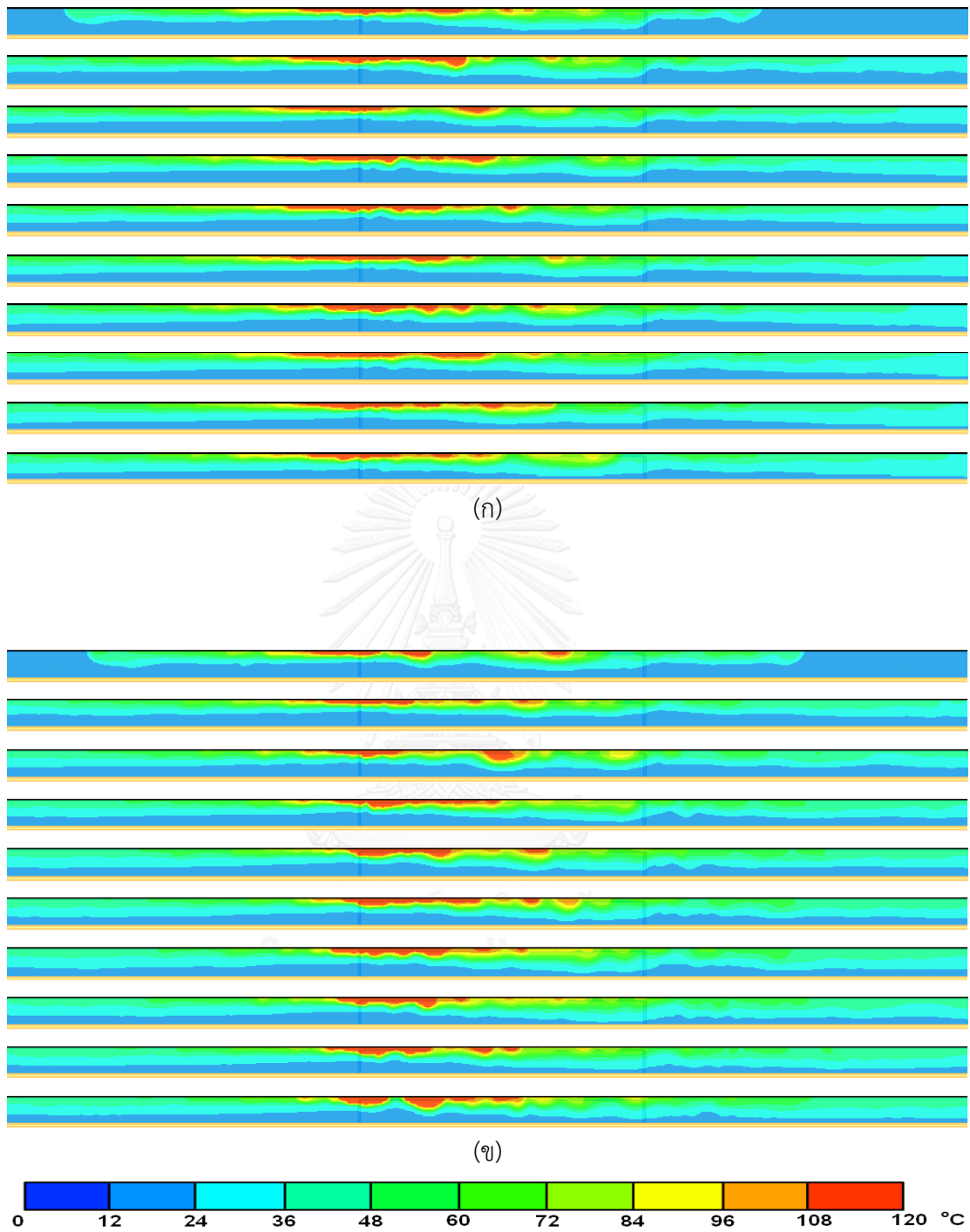
(ง)



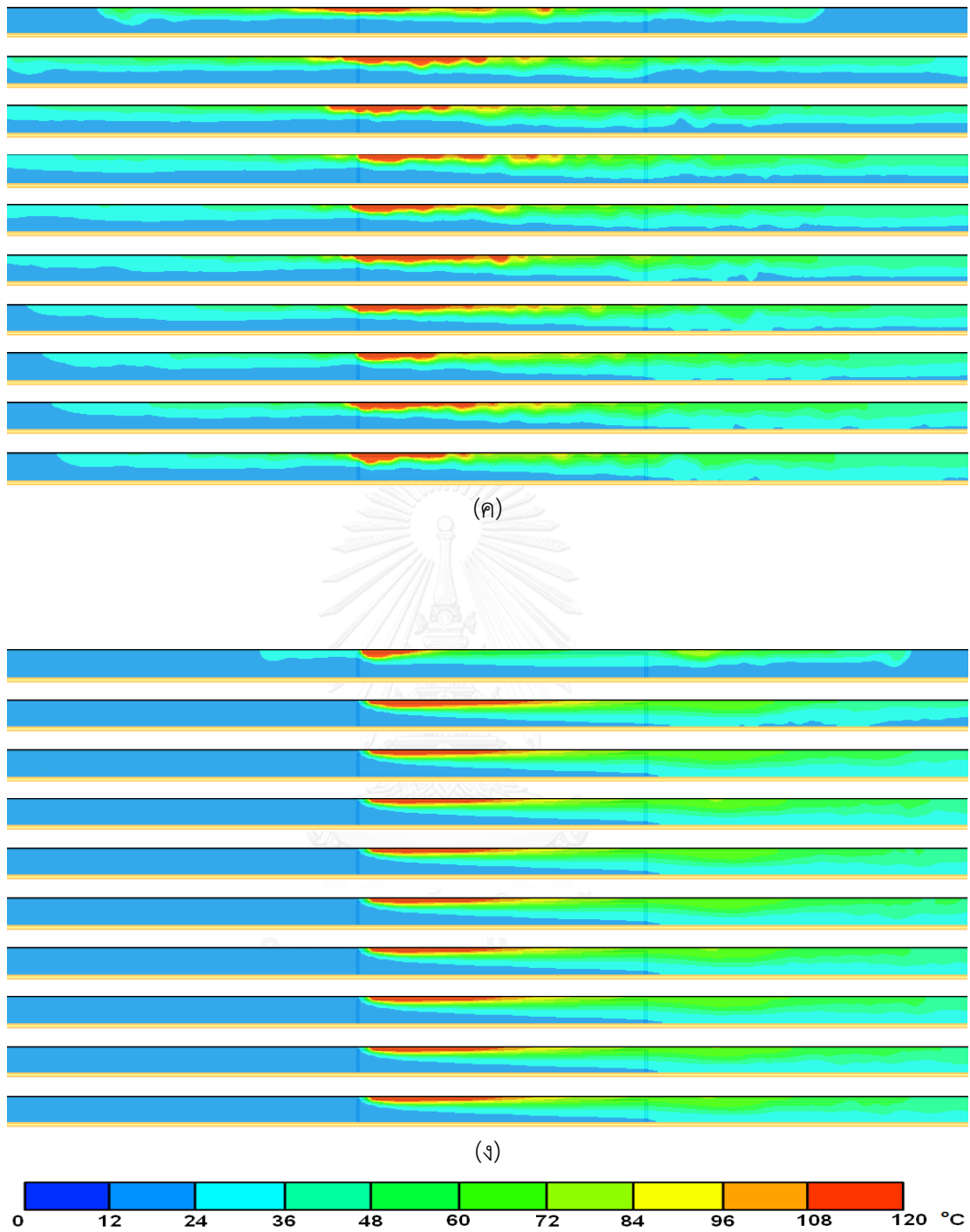
รูปที่ 4.15 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



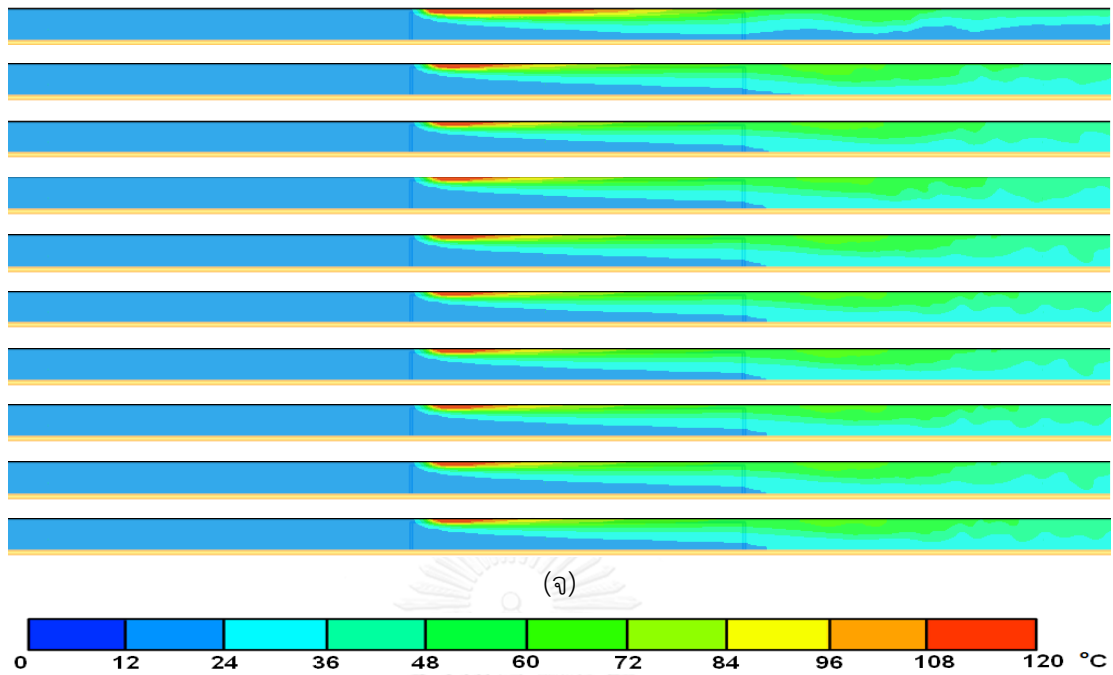
รูปที่ 4.15 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

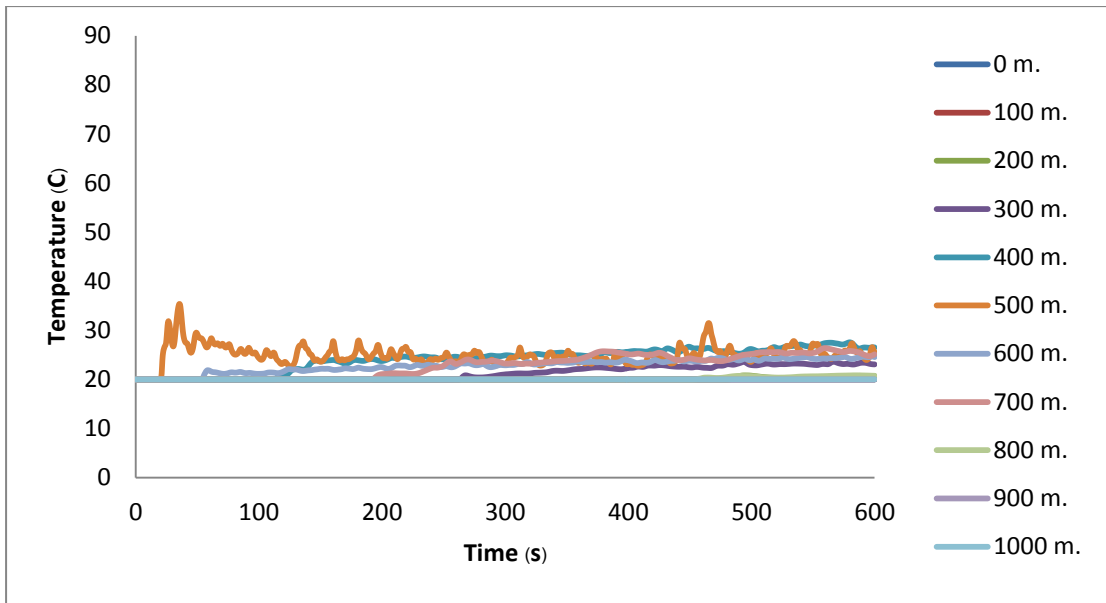


รูปที่ 4.16 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

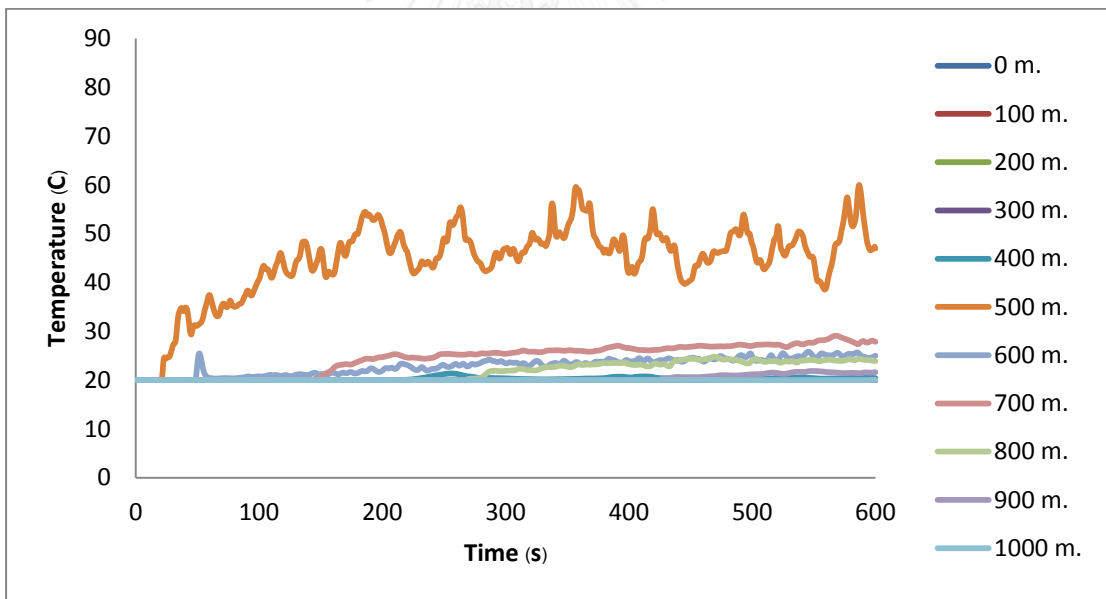


รูปที่ 4.16 (ต่อ) การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

เพื่อให้เห็นภาพค่าของอุณหภูมิในระยะความสูงที่ส่งผลให้เกิดอันตรายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้ทำการนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและค่าของอุณหภูมิที่ทำการวัดได้โดยมีฐานเพลิงที่ต่างกันคือที่บริเวณหัว กึ่งกลาง และท้ายขบวนดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 ตามลำดับ

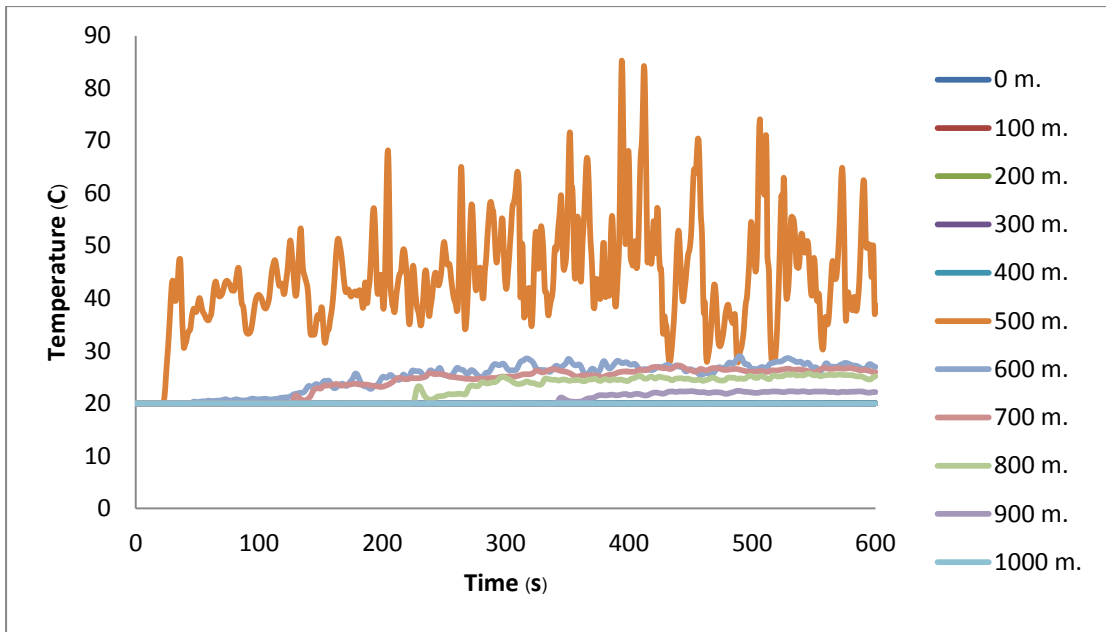


(ก)

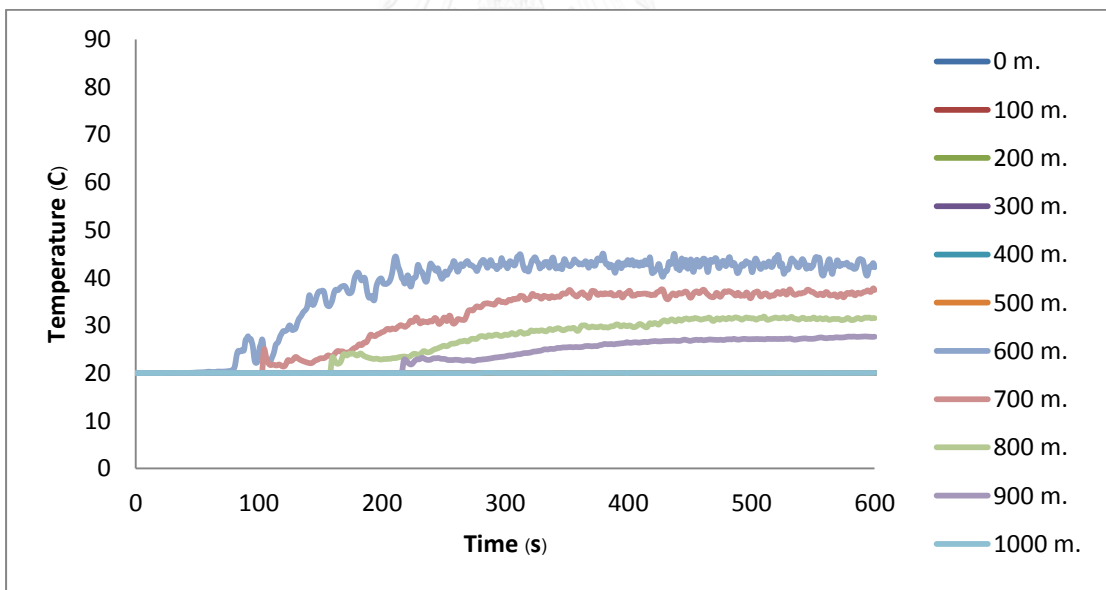


(ข)

รูปที่ 4.17 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณหัวขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7
(ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13

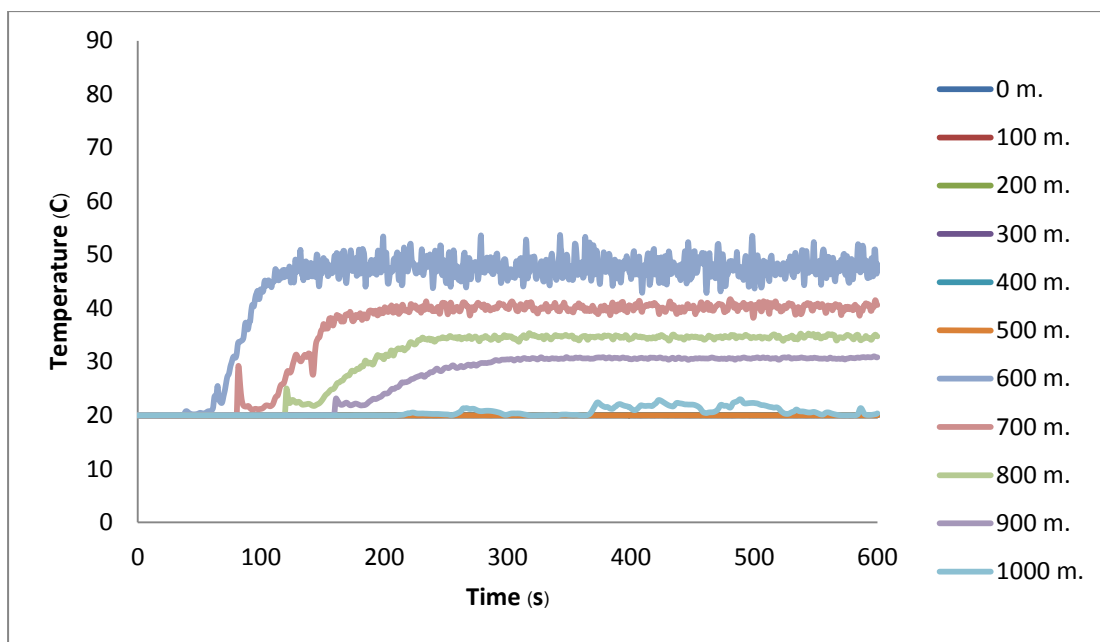


(ค)



(ง)

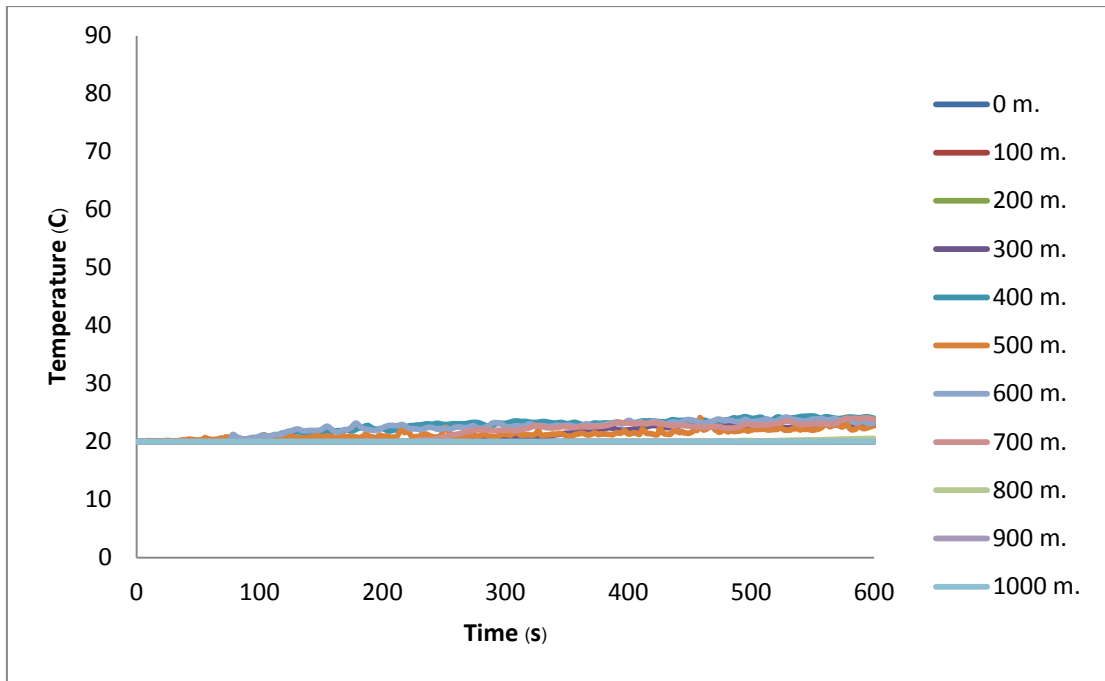
รูปที่ 4.17 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณหัวขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7
(ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



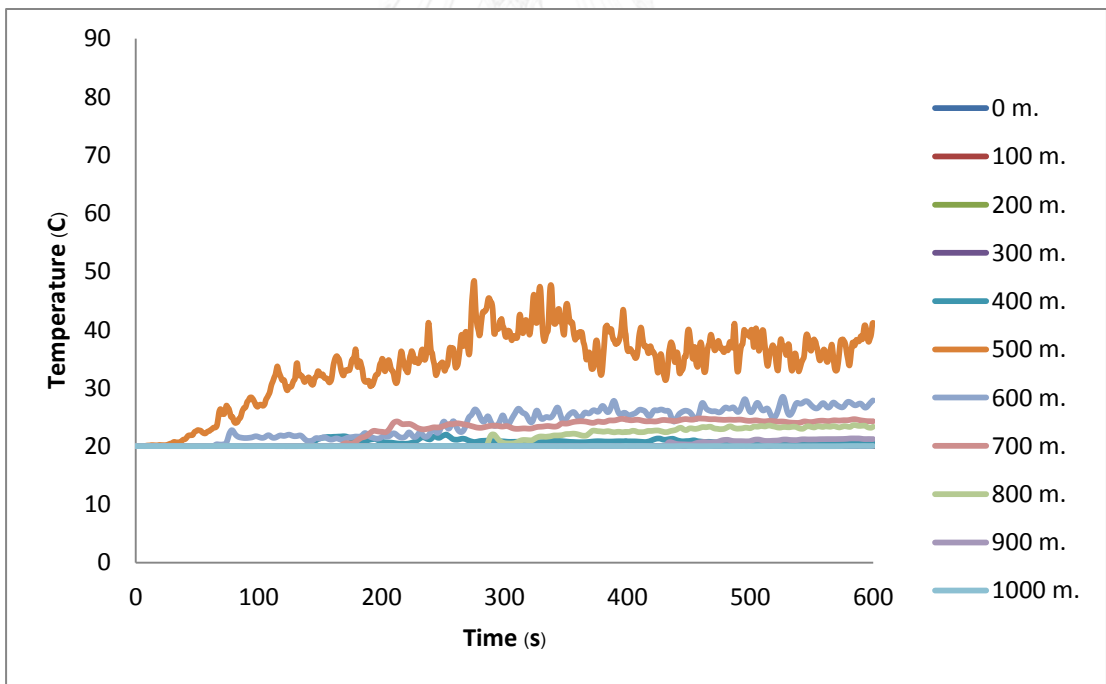
(จ)

รูปที่ 4.17 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณหัวขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13

จากรูปที่ 4.17 เป็นการจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณหัวขบวนรถไฟโดยมีระบบระบายอากาศต่างชนิดกัน ที่ตำแหน่งจุดวัดเดียวกันในระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติจะมีอุณหภูมิที่มีค่าต่ำกว่าในระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 เนื่องจากในระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติควันจะแพร่กระจายไปอย่างอิสระจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิมีค่าต่ำ แต่ที่ระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 นั้นโดยในกรณีที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ 4 และมีค่าที่เกินเกณฑ์ความปลอดภัยตั้งแต่ช่วงเวลาที่ 200 จนถึง 600 วินาทีเนื่องจากความเร็วลมที่สูงส่งผลทำให้ระยะในการไหลย้อนกลับลดลงจึงส่งผลทำให้ควันลอยตัวอยู่ใกล้กับที่ระยะ 500 เมตรมากกว่าจึงทำให้มีค่าอุณหภูมิที่สูงกว่า เมื่อใช้ระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 พบว่าในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 500 เมตรซึ่งเป็นเส้นทางในการอพยพไปยังสถานี M2 ไม่พบค่าของอุณหภูมิที่เกินเกณฑ์ความปลอดภัยทั้งในกรณีที่ 10 และ 13

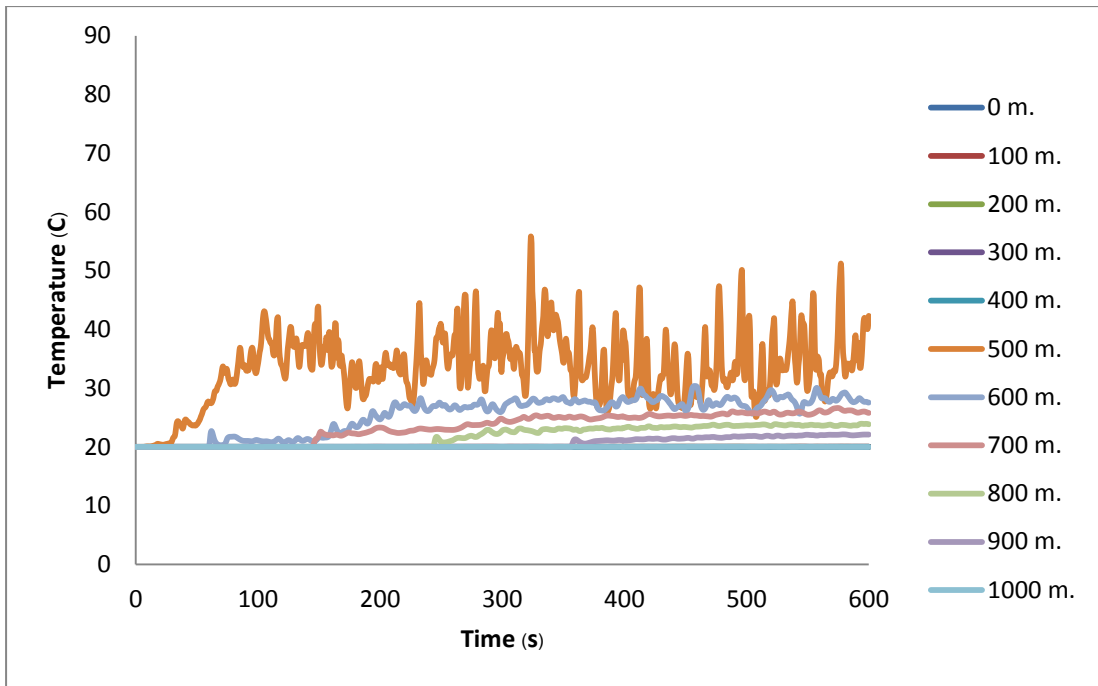


(ก)

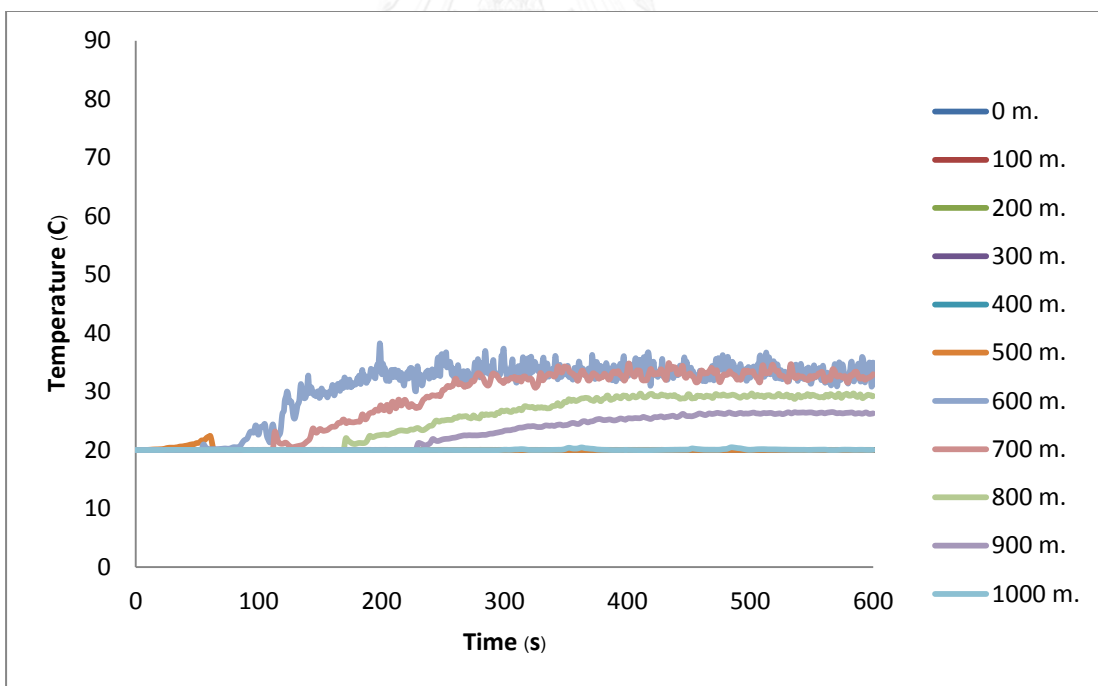


(ข)

รูปที่ 4.18 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8
(ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14

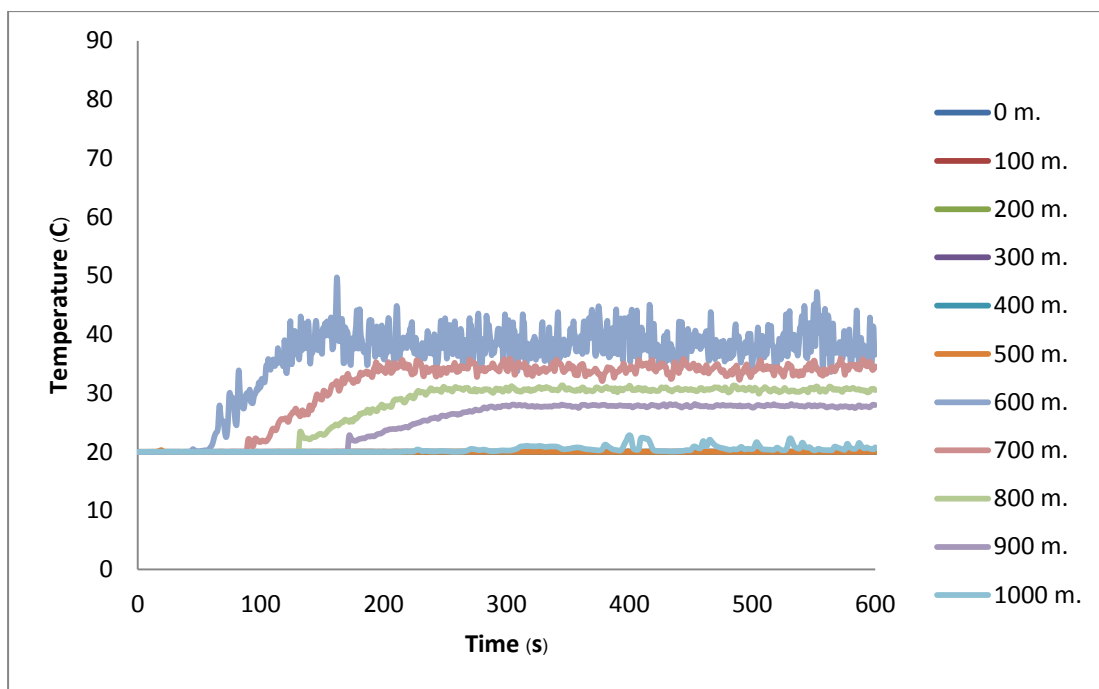


(ค)



(ง)

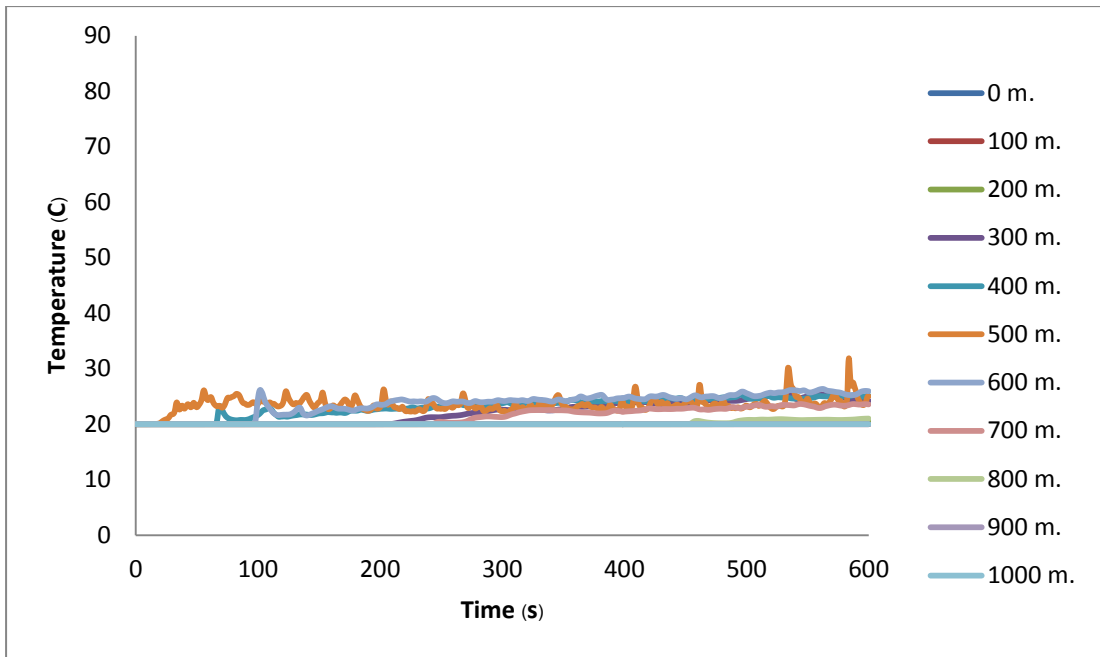
รูปที่ 4.18 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8
(ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



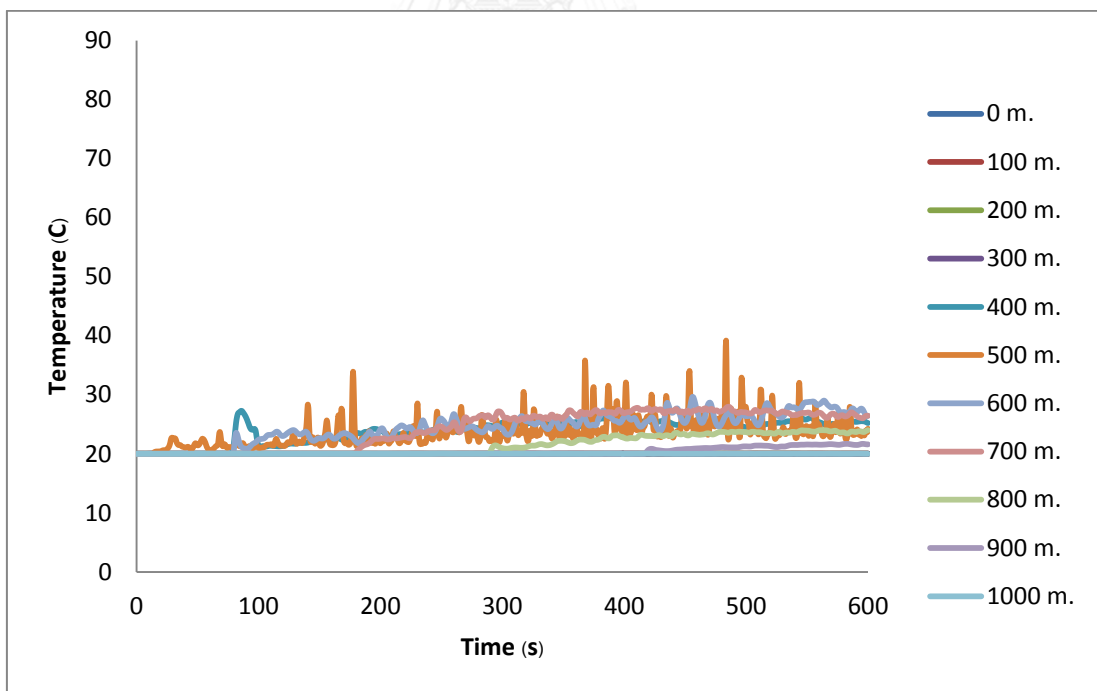
(จ)

รูปที่ 4.18 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14

รูปที่ 4.18 แสดงค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณกึ่งกลางของรถไฟ ผลที่ได้พบว่าระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติในตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้มีค่าอุณหภูมิที่ต่ำมากแทบจะไม่มีอันตรายที่เกิดจากอุณหภูมิ ที่ระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 ในกรณีที่ 5 และ 8 พบว่าที่ตำแหน่งจุดวัดที่ 500 เมตรมีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัดแต่มีค่าต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียสดังนั้นจึงถือว่ามีความปลอดภัย และระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 ในกรณีที่ 11 มีค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการไหลย้อนกลับของควันที่ระยะเวลาสั้นๆ แต่ค่าของอุณหภูมียังอยู่ในเกณฑ์เช่นเดียวกับในกรณีที่ 14 โดยในกรณีที่ 14 เป็นกรณีที่มีความปลอดภัยมากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่ทั้งหมดในตำแหน่งของการเกิดเพลิงไหม้เดียวกัน

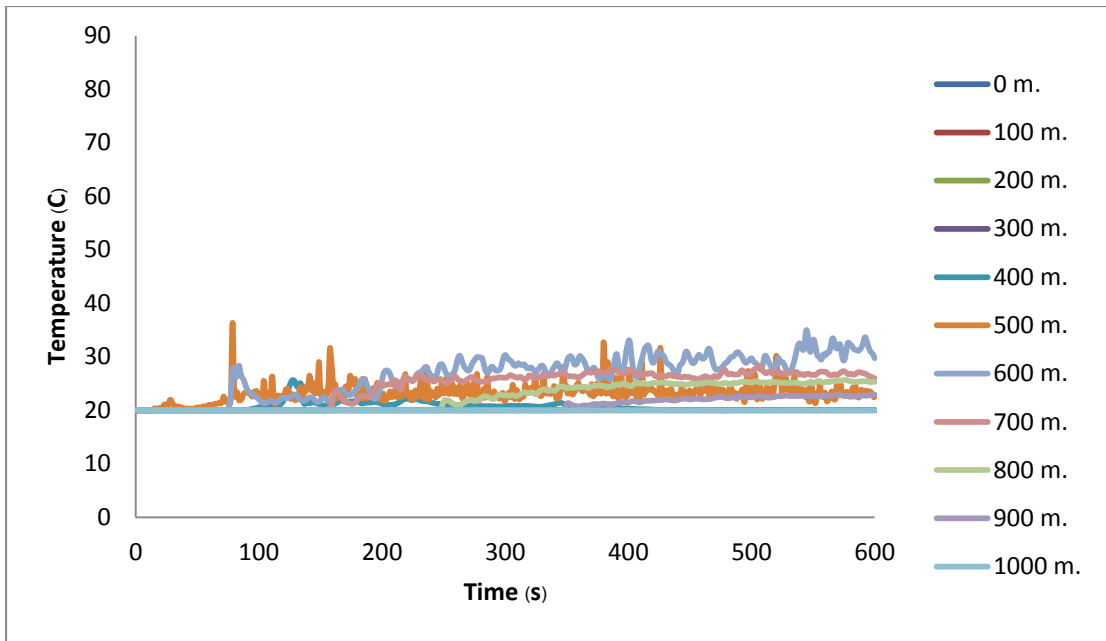


(ก)

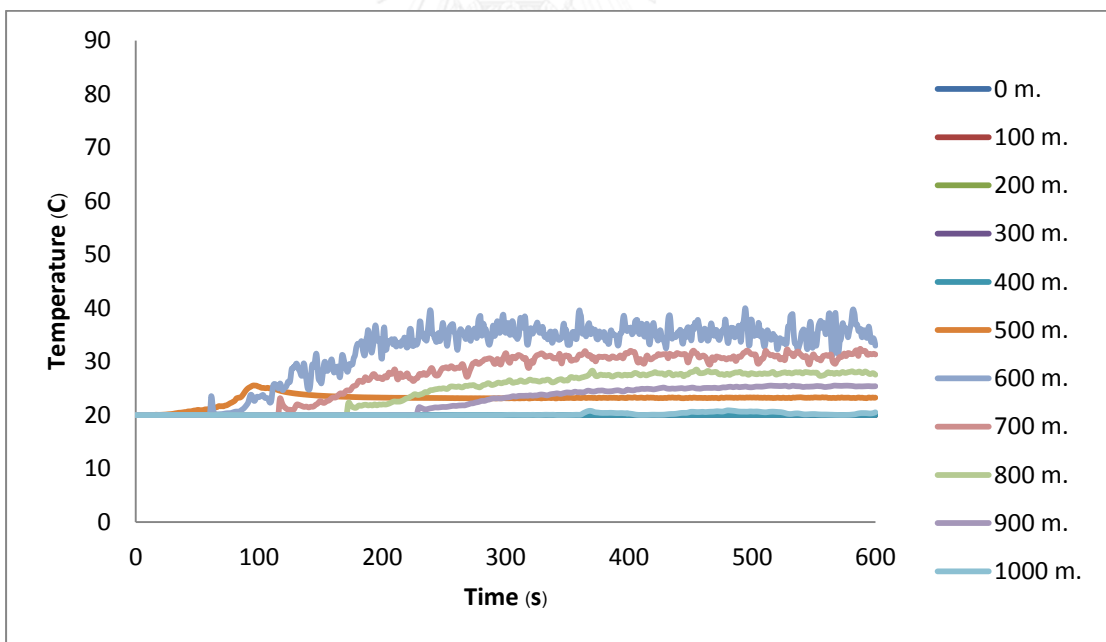


(ข)

รูปที่ 4.19 ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณท้ายขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9
(ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

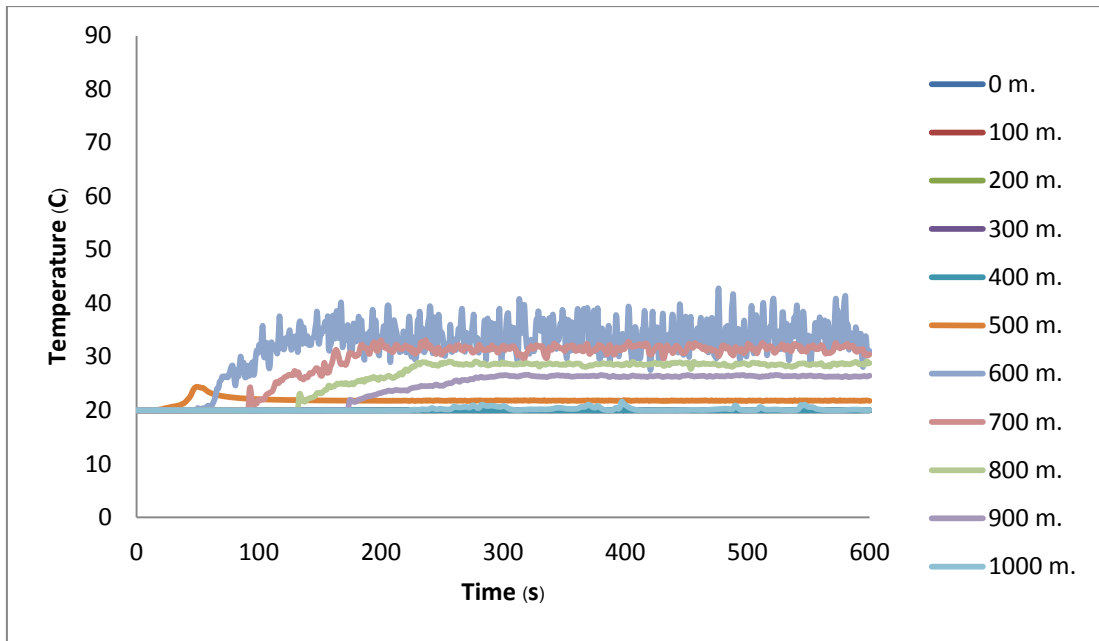


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร
เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณท้ายขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9
(ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15



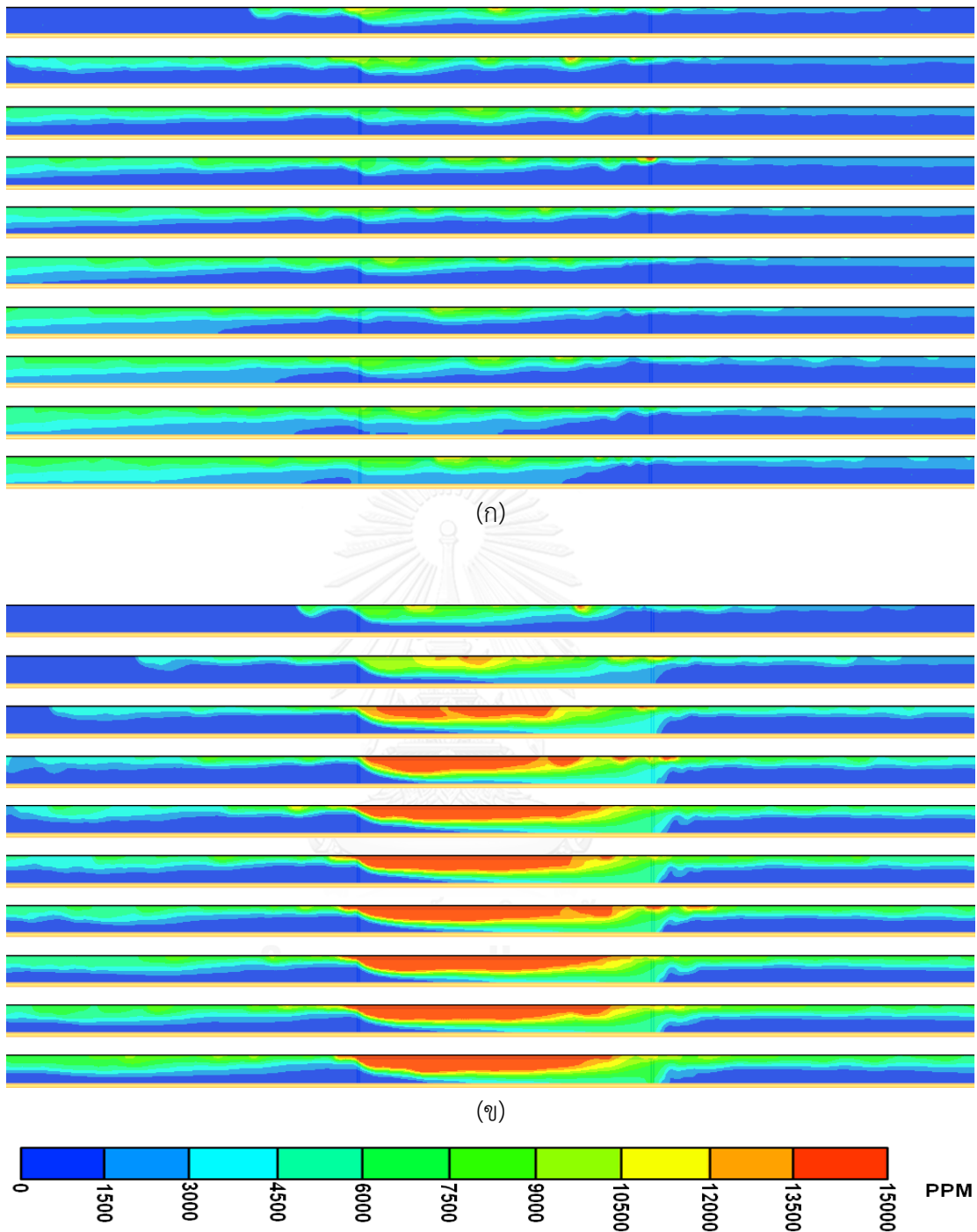
(จ)

รูปที่ 4.19 (ต่อ) ค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่ 0 – 1000 เมตร และสูง 2.35 เมตร เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณท้ายขบวนรถไฟ (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

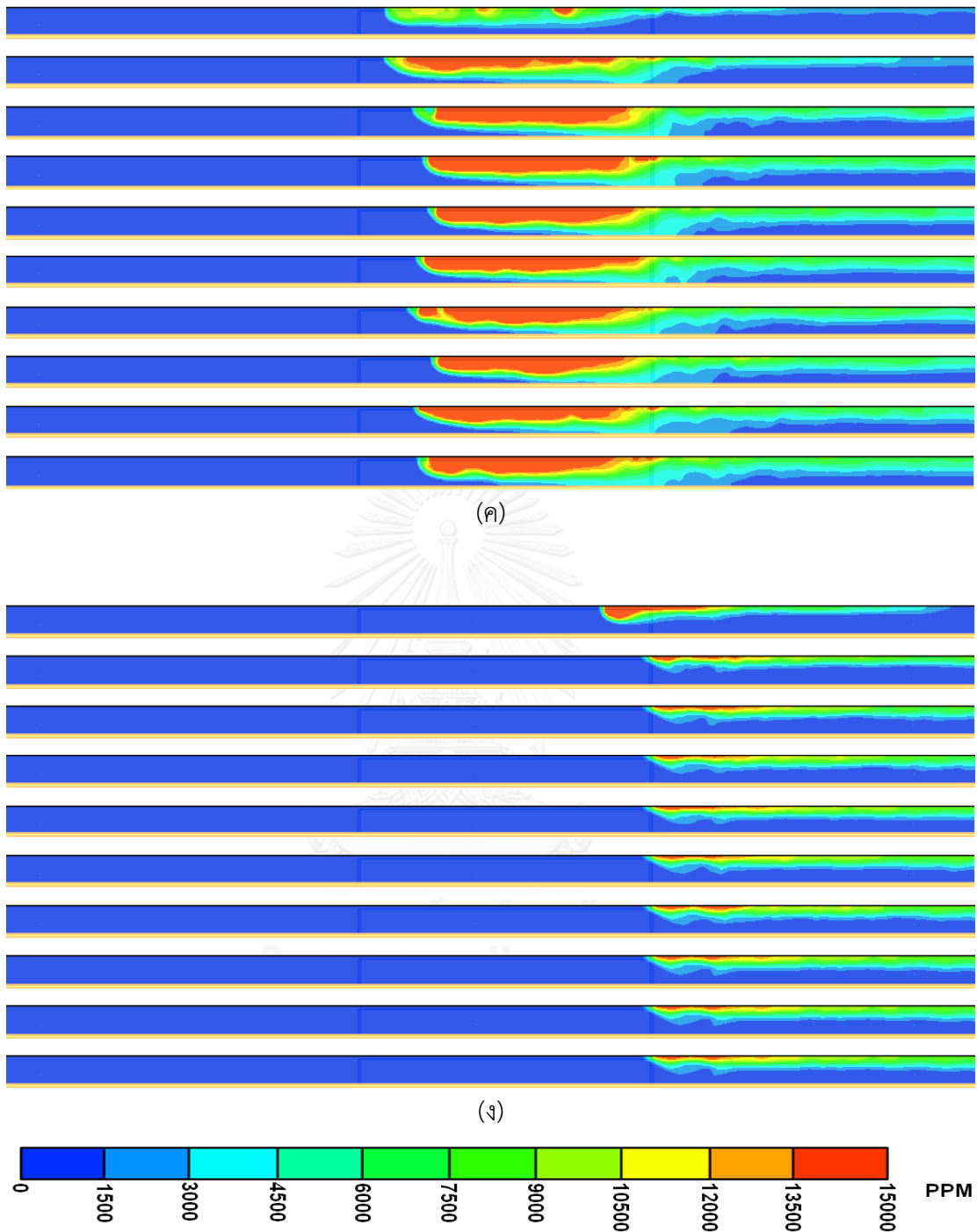
รูปที่ 4.19 แสดงค่าที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเกิดเหตุการณ์เพลิงไหม้ที่บริเวณท้ายของรถไฟ ผลที่ได้พบว่าเมื่อใช้ระบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 พบว่ายังมีการตรวจจับค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 500 เมตรได้ เนื่องจากตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้อยู่ที่บริเวณท้ายขบวนซึ่งอยู่ใกล้กับเส้นทางในการอพยพมากที่สุด จึงทำให้เกิดควันพัดไปค้างอยู่ที่ระยะของตัวรถไฟจึงส่งผลทำให้เกิดความร้อนที่บริเวณดังกล่าวแต่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย

4.2.4 ความเข้มข้นของก๊าซ CO

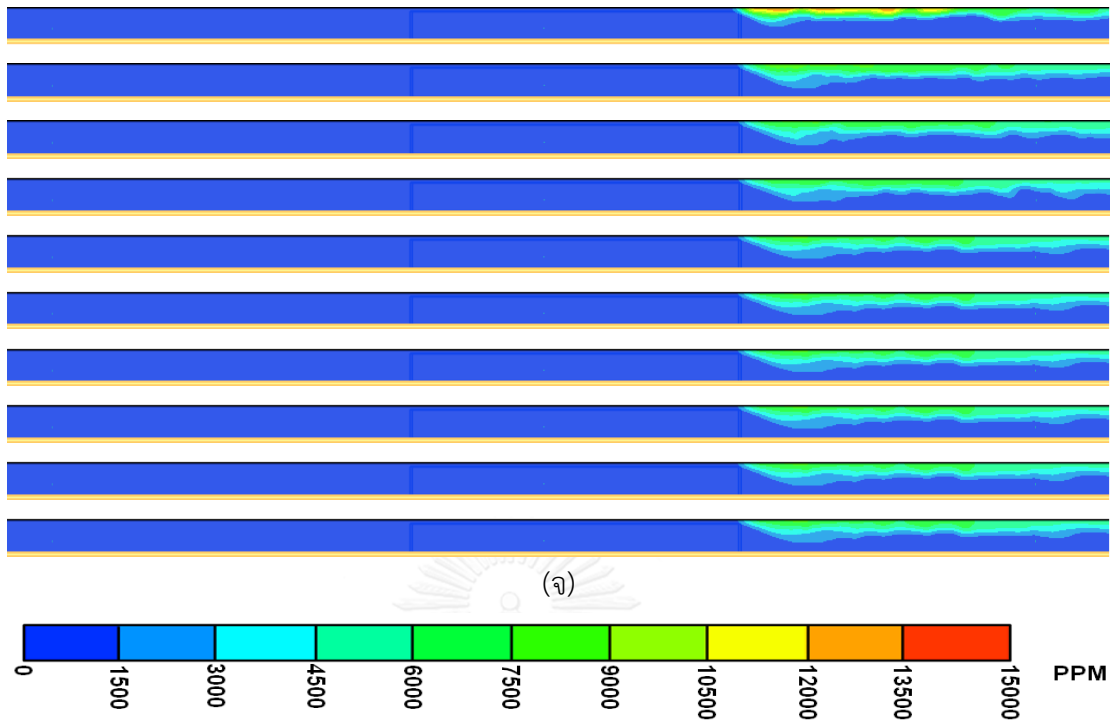
เกณฑ์ความปลอดภัยของค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1,400 ppm ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ในรูปที่ 4.20 ถึง 4.22 เป็นการแสดงความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถที่เวลา 60-600 วินาที เมื่อมีการเกิดเพลิงไหม้ที่บริเวณด้านหัว กึ่งกลาง และท้ายขบวนตามลำดับ จากการพิจารณาค่าความเข้มข้นของ CO ที่เส้นทางในการอพยพเข้าสู่สถานี M2 พบว่า ในกรณีที่มีระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติที่ตำแหน่งการเกิดเพลิงไหม้ทั้ง 3 บริเวณจะมีค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 1,500 ถึง 12,000 ppm เนื่องจากควันได้ลอยอย่างหนาแน่นตลอดเส้นทางการอพยพ โดยแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) 4.21 (ก) และ 4.22 (ก) เมื่อในระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 พบว่าความเร็วลมที่ 55 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีได้ช่วยหยุดการไหลย้อนกลับของควันได้ในระดับหนึ่งและเมื่อเพิ่มความเร็วลมไปที่ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีที่ช่วยให้ระยะในการไหลย้อนกลับได้ต่ำกว่าแต่ทำให้ควันเกิดการอันที่บริเวณคั่นปะทะกับความเร็วของลมจึงทำให้เกิดค่าความเข้มข้นที่สูงมากถึง 15,000 ที่บริเวณกลางขบวนรถซึ่งถือว่ามีความรุนแรงมากโดยเกิดขึ้นกับทุกบริเวณการเกิดเพลิงไหม้ทั้ง 3 ดังรูปที่ 4.20 (ข,ค) 4.21 (ข,ค) และ 4.22 (ข,ค) ตามลำดับ และเมื่อใช้ระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 พบว่าในเส้นทางการอพยพที่ความเร็วลมที่ 70 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีที่มีค่าความเข้มข้นของควันน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความเร็วลมที่ 55 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีเนื่องจากที่ความเร็วที่ 55 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทียังเกิดการไหลย้อนกลับของควันอยู่เล็กน้อย



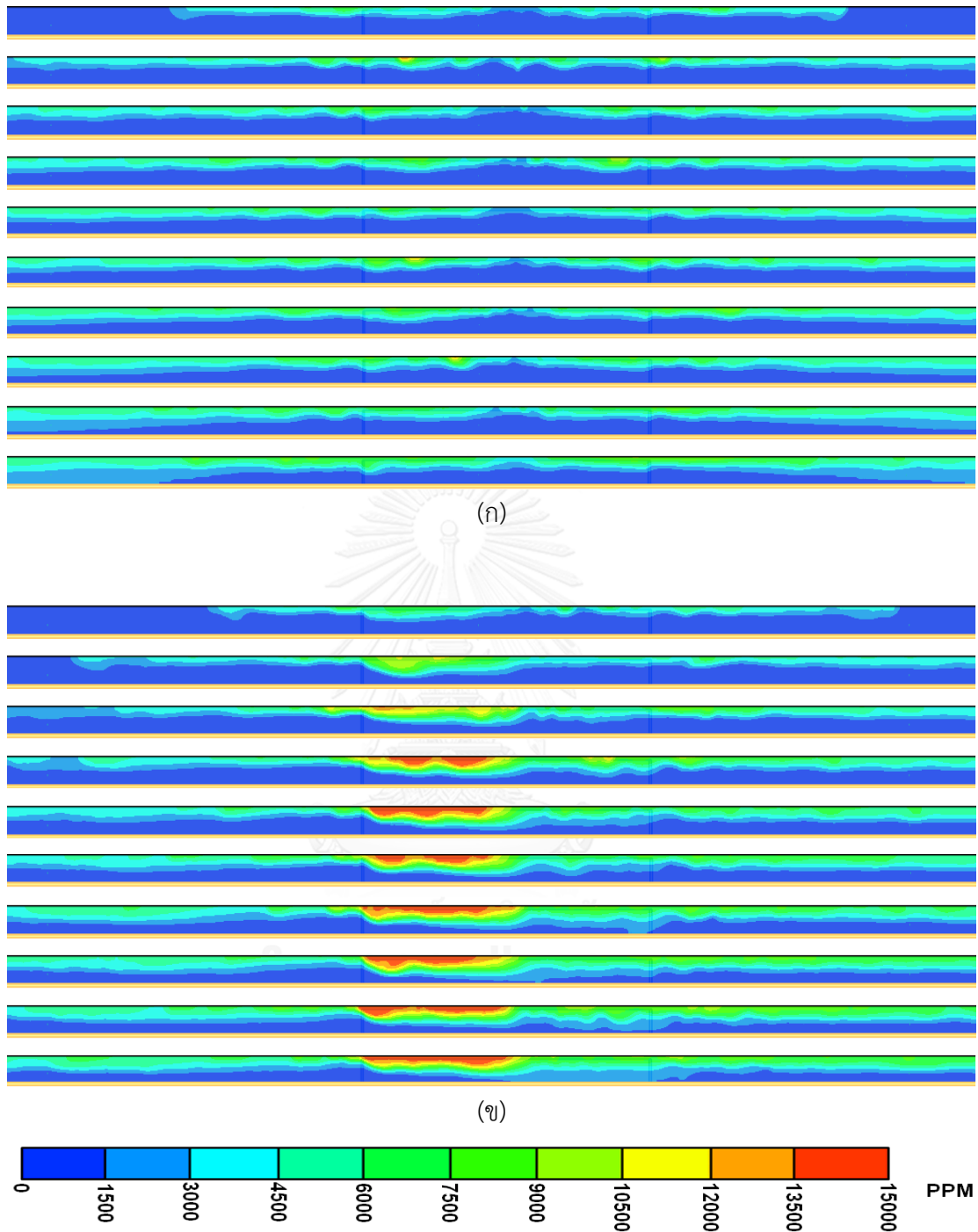
รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของก๊าซ co ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



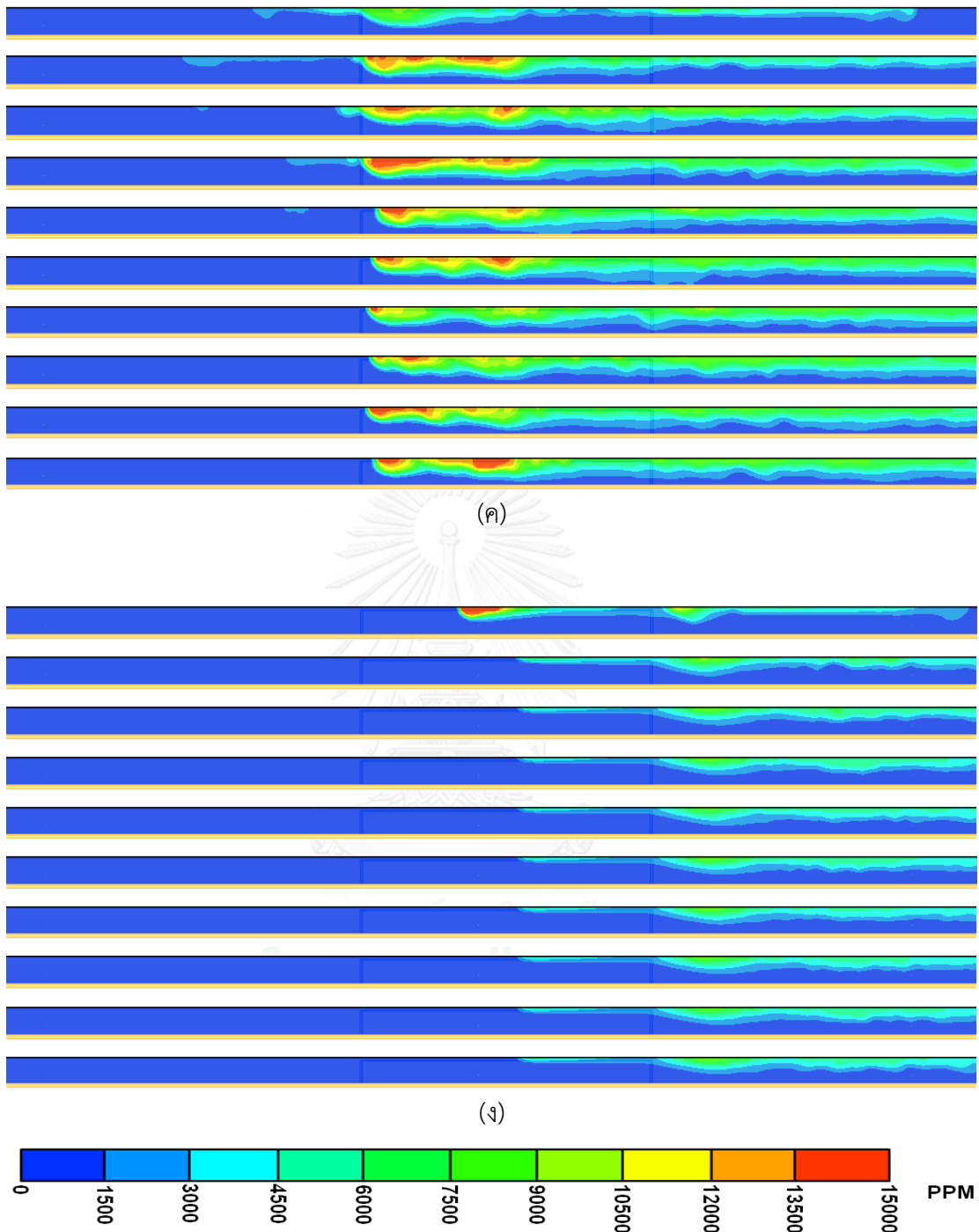
รูปที่ 4.20 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ co ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



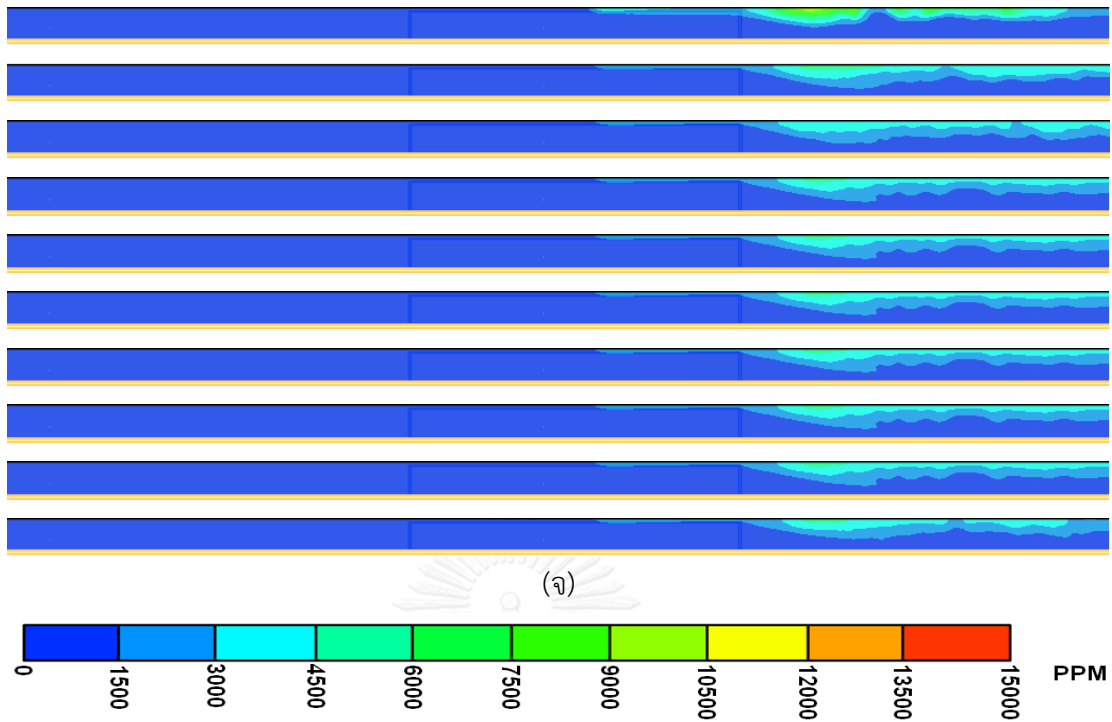
รูปที่ 4.20 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่หัวขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 4 (ค) กรณีที่ 7 (ง) กรณีที่ 10 (จ) กรณีที่ 13



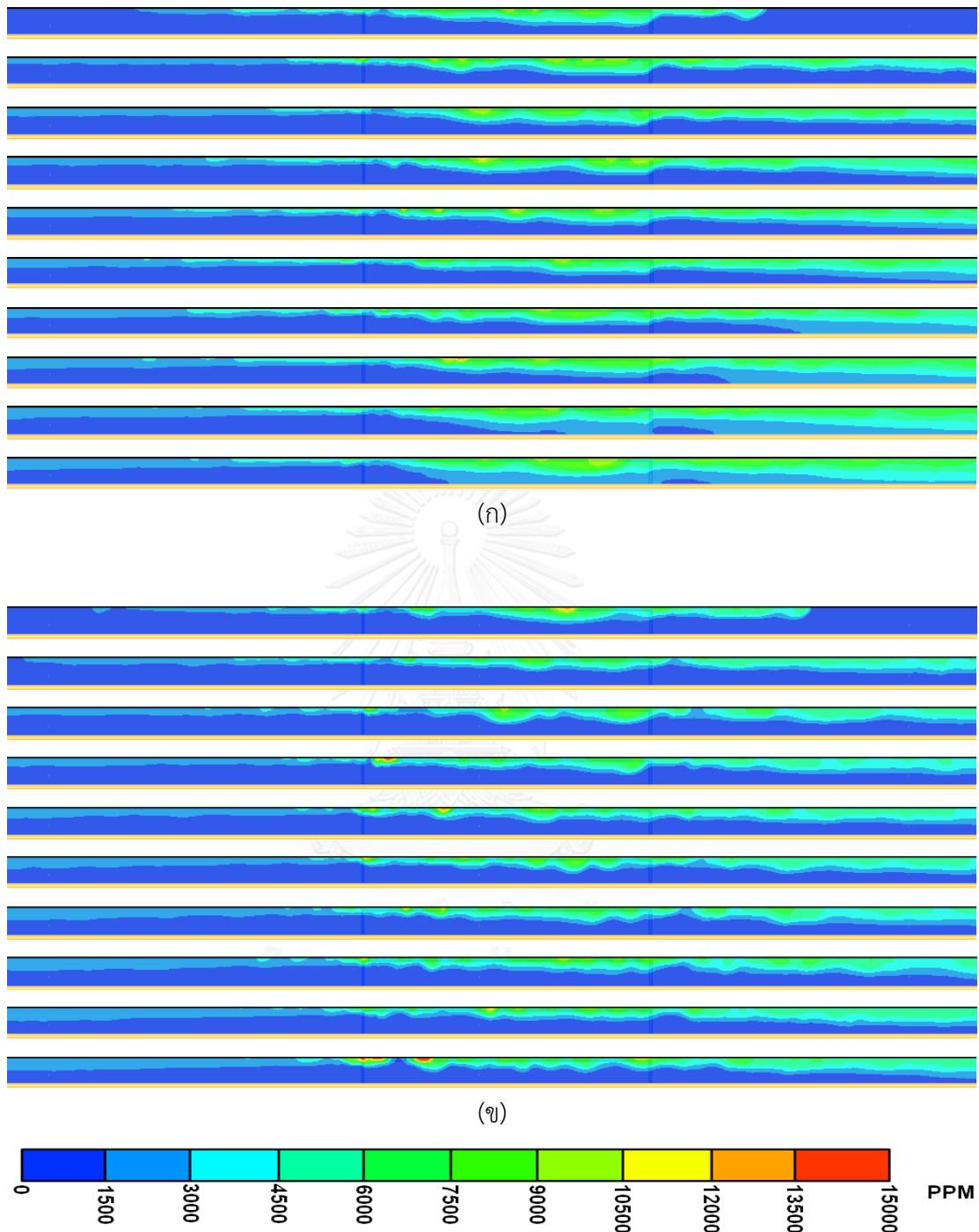
รูปที่ 4.21 ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



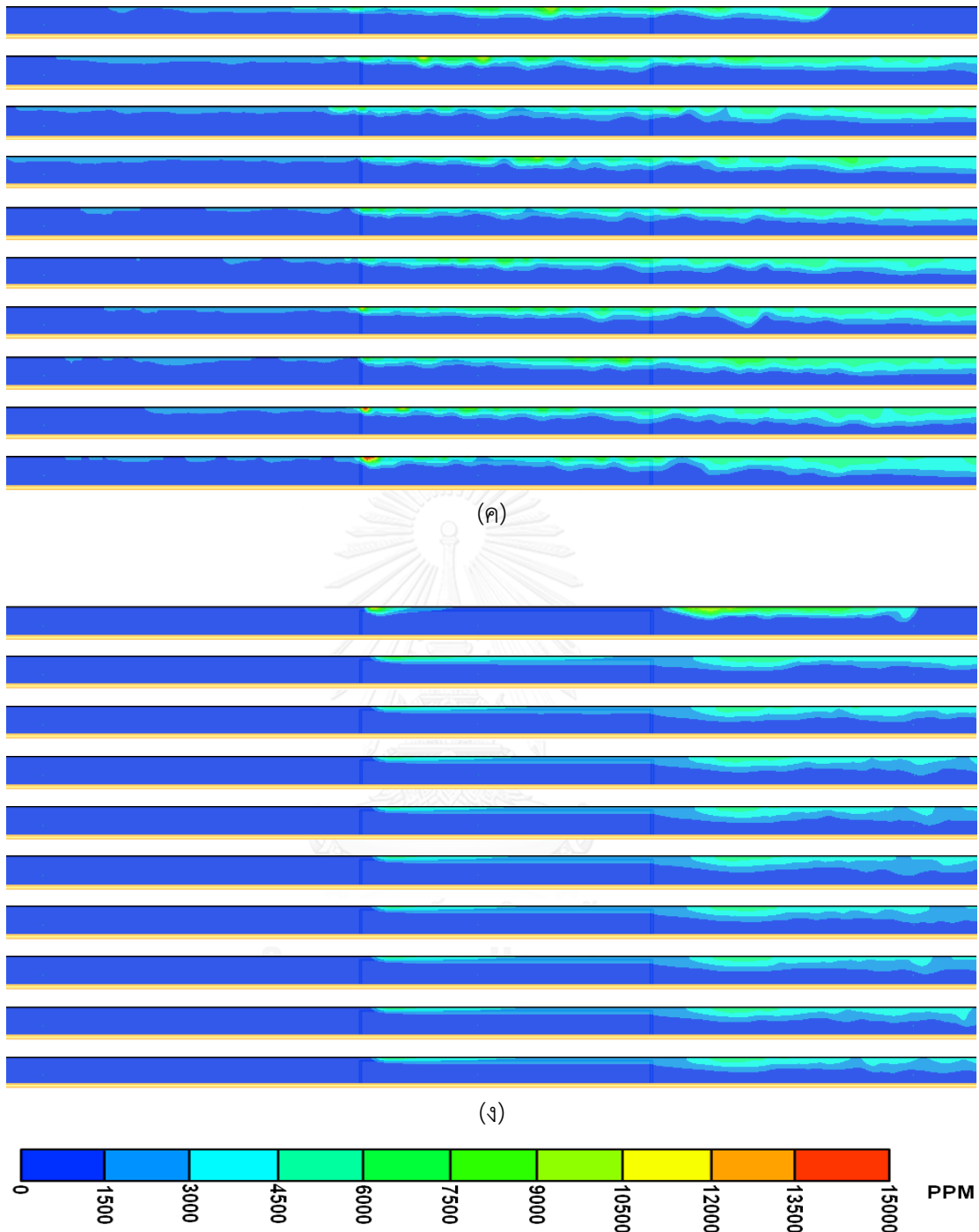
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



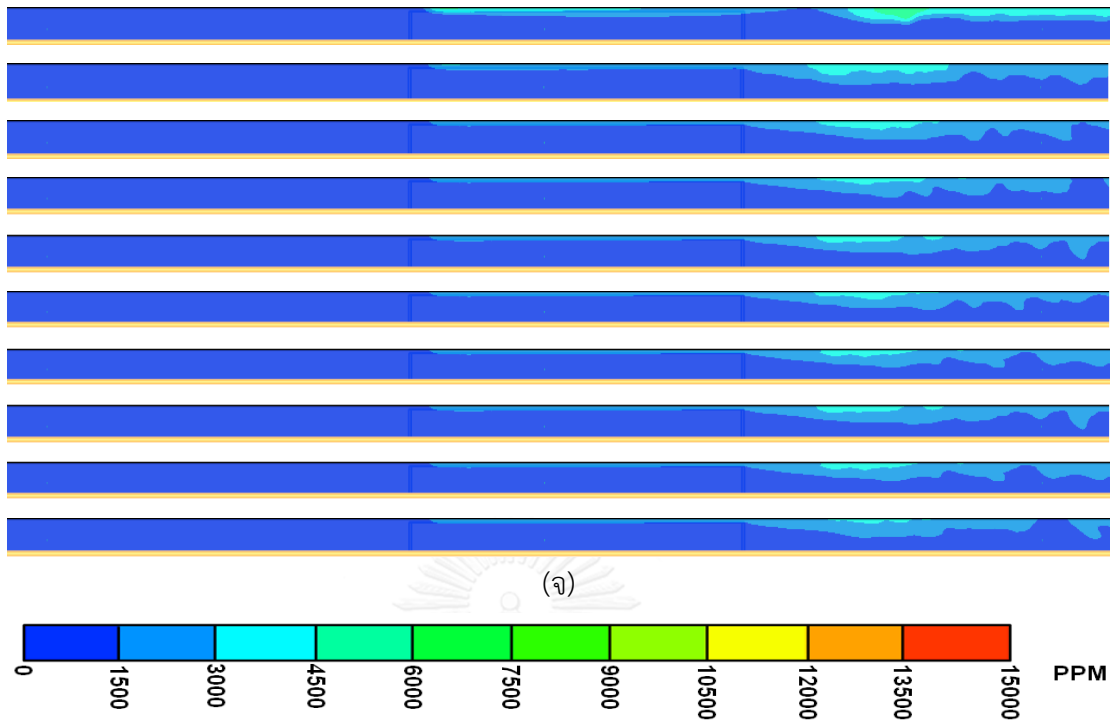
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่กลางขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 2 (ข) กรณีที่ 5 (ค) กรณีที่ 8 (ง) กรณีที่ 11 (จ) กรณีที่ 14



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15



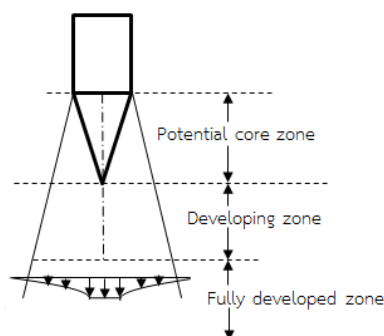
รูปที่ 4.22 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15



รูปที่ 4.22 (ต่อ) ความเข้มข้นของก๊าซ CO ภายในอุโมงค์เมื่อเกิดเพลิงไหม้ที่ท้ายขบวนรถ
 ที่เวลา 60-600 วินาที (ก) กรณีที่ 3 (ข) กรณีที่ 6 (ค) กรณีที่ 9 (ง) กรณีที่ 12 (จ) กรณีที่ 15

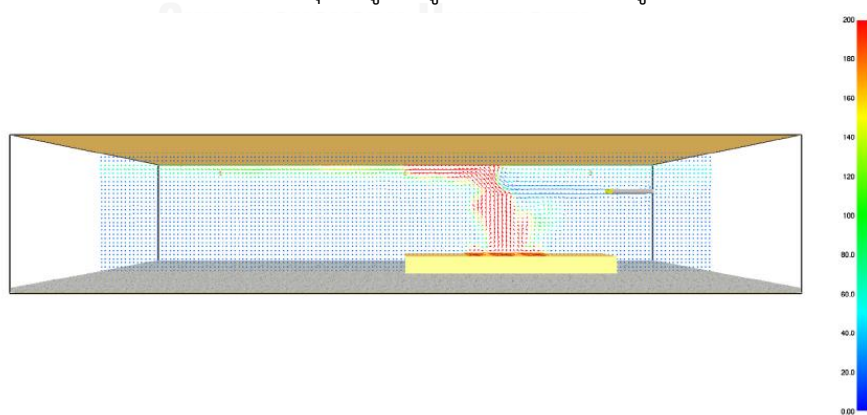
4.2.5 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าของอุโมงค์

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือ ของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดไปสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ ความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณแกนกลางของเจ็ท และความเร็วของเจ็ทจะลดลงอย่างต่อเนื่องในแนวแกนรัศมีของหน้าตัดเจ็ท โครงสร้างของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วนดังนี้ Potential core zone เป็นบริเวณที่เริ่มออกจากหัวฉีด, Developing zone เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วภายในเจ็ท และ Fully developed zone ความเร็วภายในเจ็ทมีค่าความเร็วอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยโมเมนต์ของเจ็ทจะลดลงเมื่อมีระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23



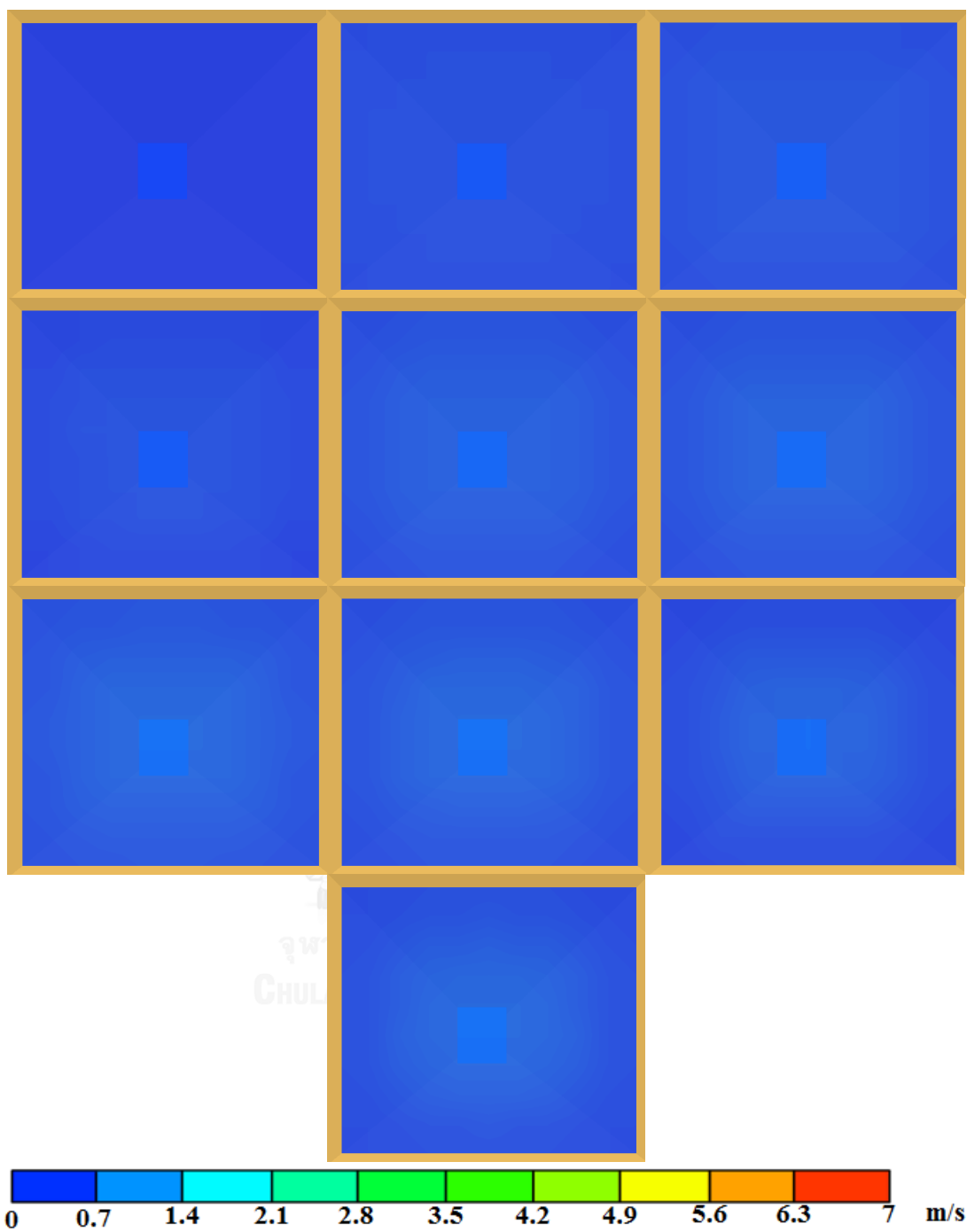
รูปที่ 4.23 โครงสร้างของเจ็ทอิสระ

จากงานวิจัยของ Enright [22] พบว่าการระบายควันแบบการใช้พัดลมเจ็ทโดยมีเงื่อนไขที่ทางเข้าและทางออกถูกเปิดออก ลักษณะการไหลของอากาศพบว่าส่วนใหญ่แล้วอากาศจะพุ่งไปทางด้านหน้าของตัวพัดลมระบายอากาศมากกว่าที่จะไหลไปในที่ช่องทางที่เปิดออก โดยแสดงการไหลของอากาศผ่านการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปแบบเวกเตอร์ในรูปที่ 4.24



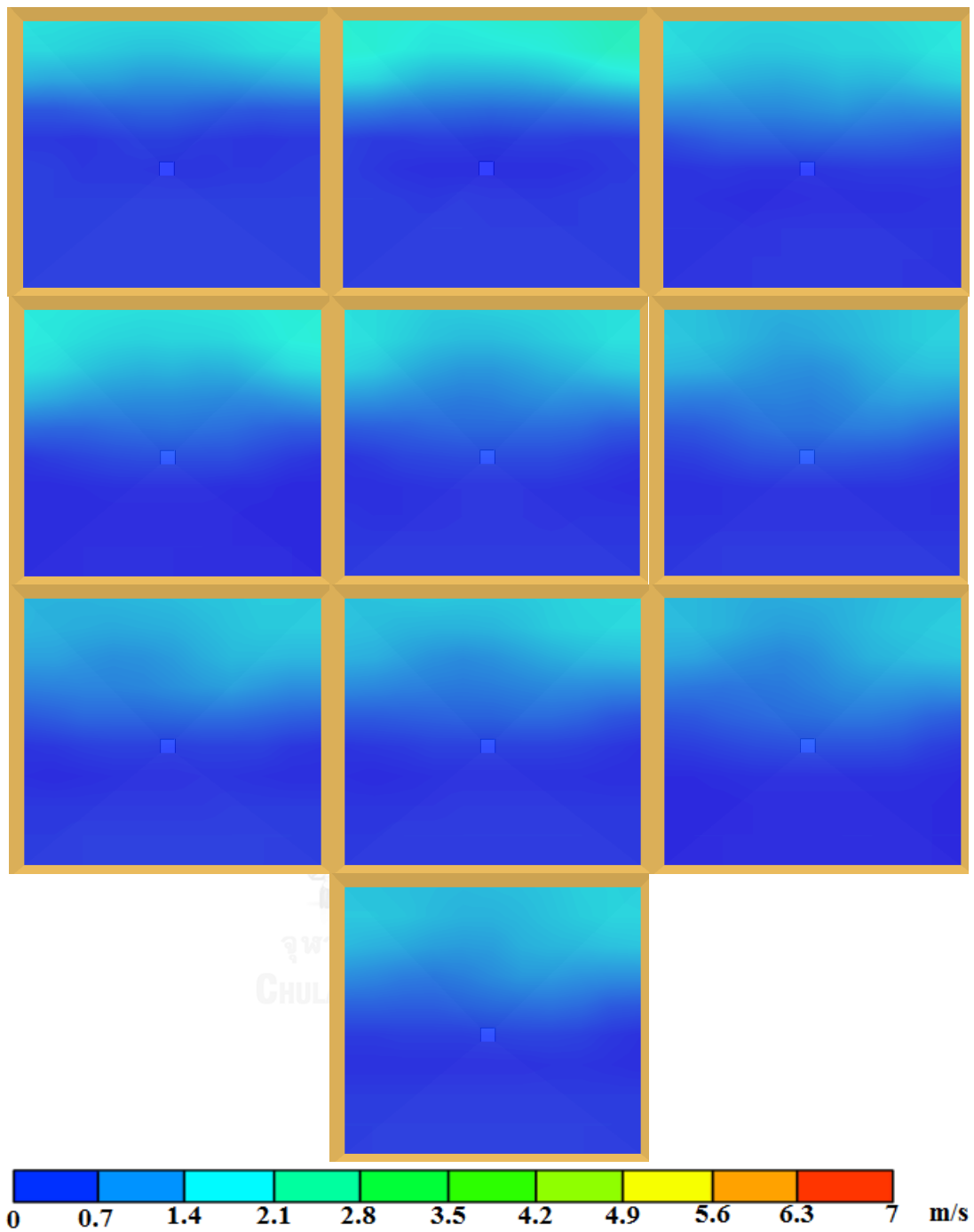
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปแบบเวกเตอร์โดยใช้พัดลมเจ็ท Enright [22]

จากผลการเคลื่อนตัวของควัน การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียส และค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO พบว่าระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 2 ดีกว่าระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 1 เพื่อสนับสนุนผลการสรุปดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลการกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 400 เมตรโดยเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านท้ายของตัวรถไฟ และที่ตำแหน่ง 600 เมตรซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านหน้าของตัวรถไฟผลที่ได้พบว่าที่ผลการกระจายตัวของความเร็วของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่ง 400 เมตรในระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 1 ที่มีการเกิดเพลิงไหม้ที่ตำแหน่งต่างกันมีค่าการกระจายตัวของความเร็วที่มีผลเหมือนกัน โดยมีค่าความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 0.7 เมตรต่อวินาทีดังแสดงในรูปที่ 4.25, 4.27 และ 4.29 ตามลำดับ และที่ตำแหน่ง 600 เมตรพบว่าค่าความเร็วที่สูงอยู่ที่บริเวณเพดานโดยในกรณีที่ 9 มีค่าความเร็วอยู่ที่ 2.1 เมตรต่อวินาทีและมีความเร็วสูงกว่าในกรณีที่ 7 และ 8 ดังแสดงในรูปที่ 4.26, 4.28 และ 4.30 ตามลำดับ ต่อมาในระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 400 เมตร พบว่าค่าความเร็วของอากาศมีค่าสูงอยู่ที่กึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์โดยมีความเร็วอยู่ที่ 3.5 เมตรต่อวินาทีและบริเวณรอบๆมีค่าความเร็วเท่ากับ 1.4 ถึง 2.1 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.31, 4.33 และ 4.35 ตามลำดับซึ่งมีการกระจายตัวของอากาศและค่าความเร็วของอากาศสูงกว่าระบบระบายอากาศชนิดที่ 1 อย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันเมื่อทำการวัดค่าความเร็วภายในอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 600 เมตรพบว่าเมื่ออากาศที่ถูกบังคับให้เคลื่อนที่จากพัดลม TVF-02 ผ่านเข้าพื้นที่ว่างระหว่างอุโมงค์กับตัวรถไฟอีกทั้งยังได้อิทธิพลจากการดูดของพัดลม TVF-04 ส่งผลทำให้ที่ตำแหน่งจุดวัดการกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่ง 600 เมตรมีค่าสูงที่บริเวณด้านล่างของอุโมงค์โดยมีค่าความเร็วสูงสุดที่ประมาณ 5.6 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.32, 4.34 และ 4.36 จึงสรุปได้ว่าในระบบระบายอากาศแบบบังคับชนิดที่ 2 มีประสิทธิภาพดีที่สุด

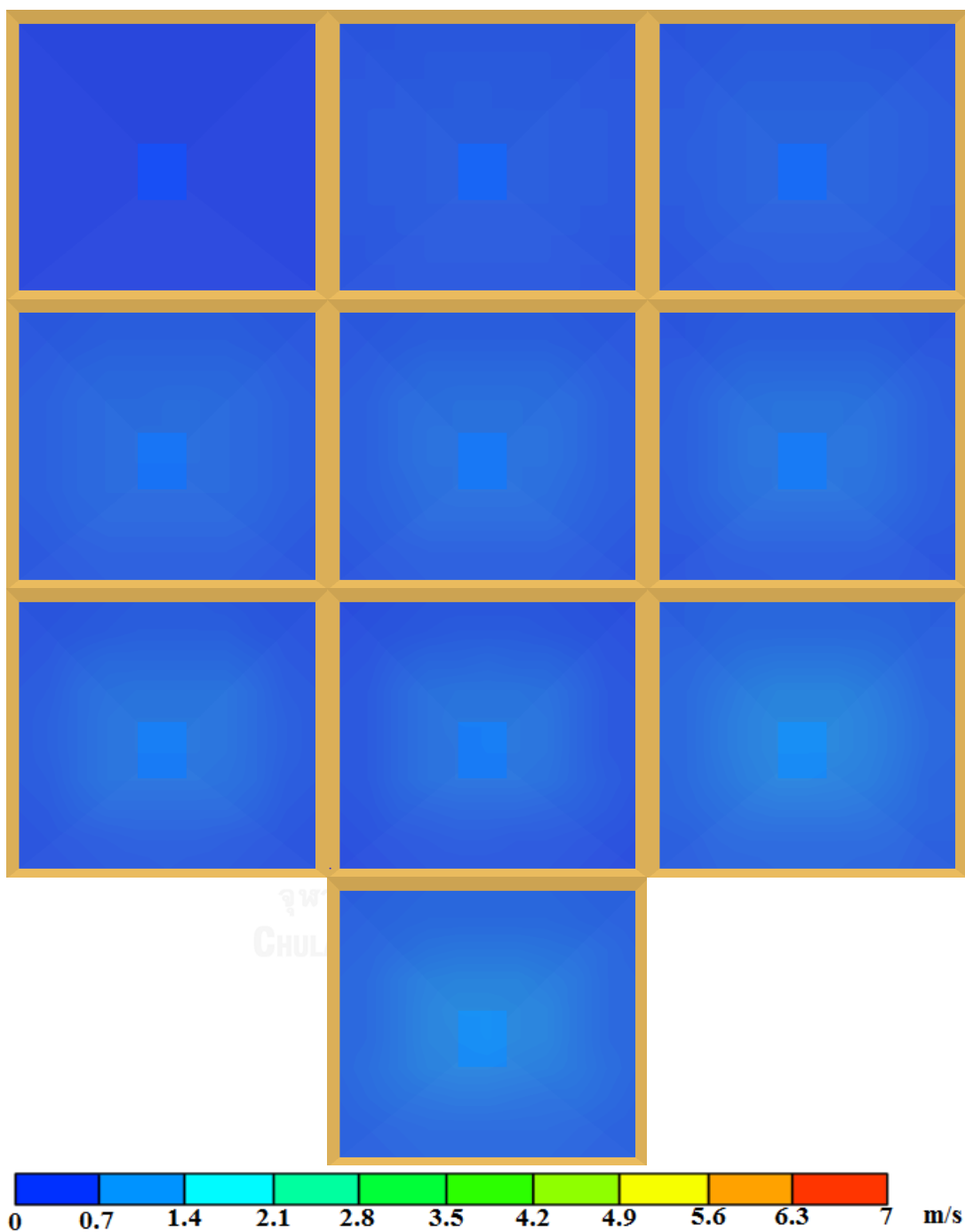


รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีนี้ที่ 7

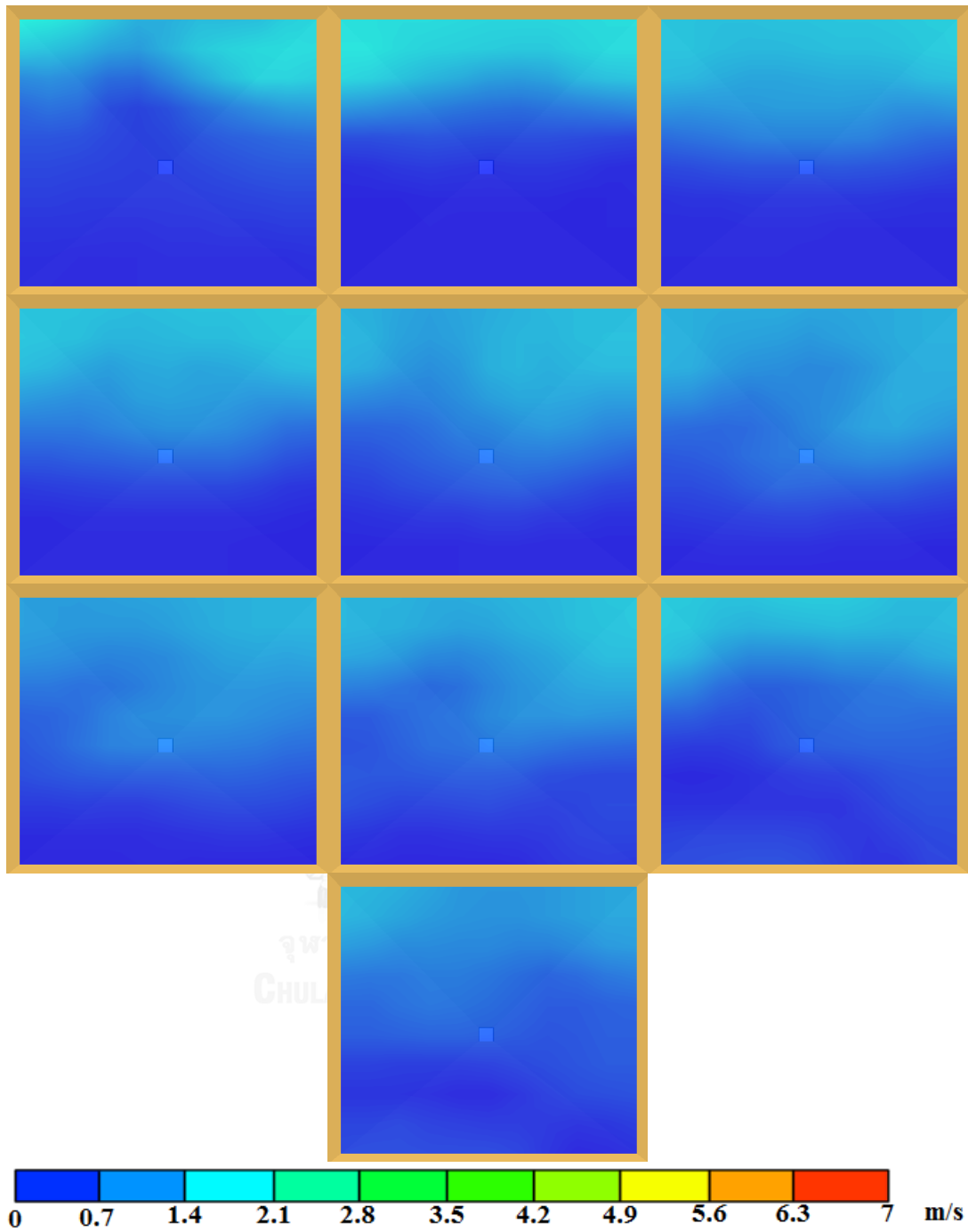
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



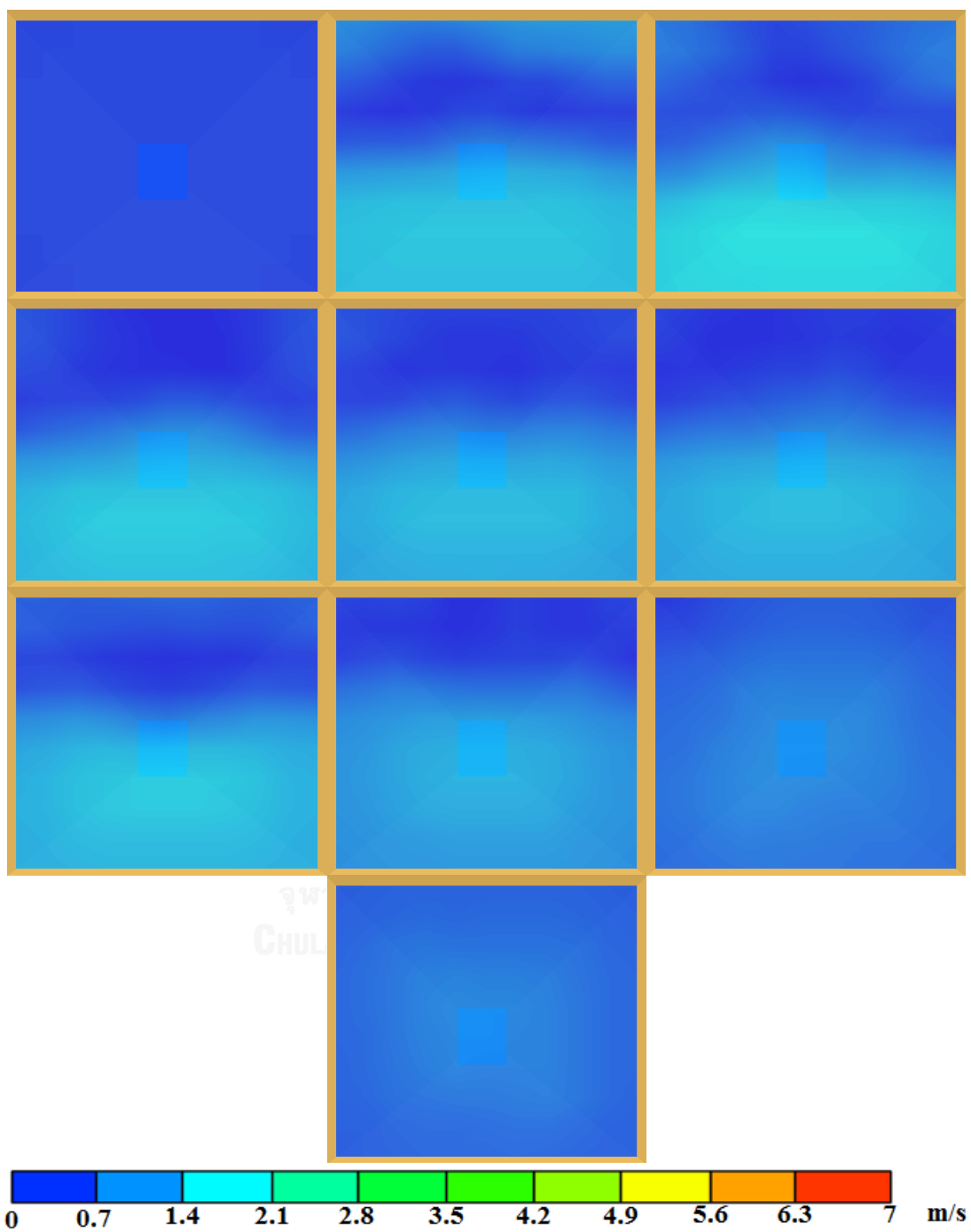
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 7
(ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



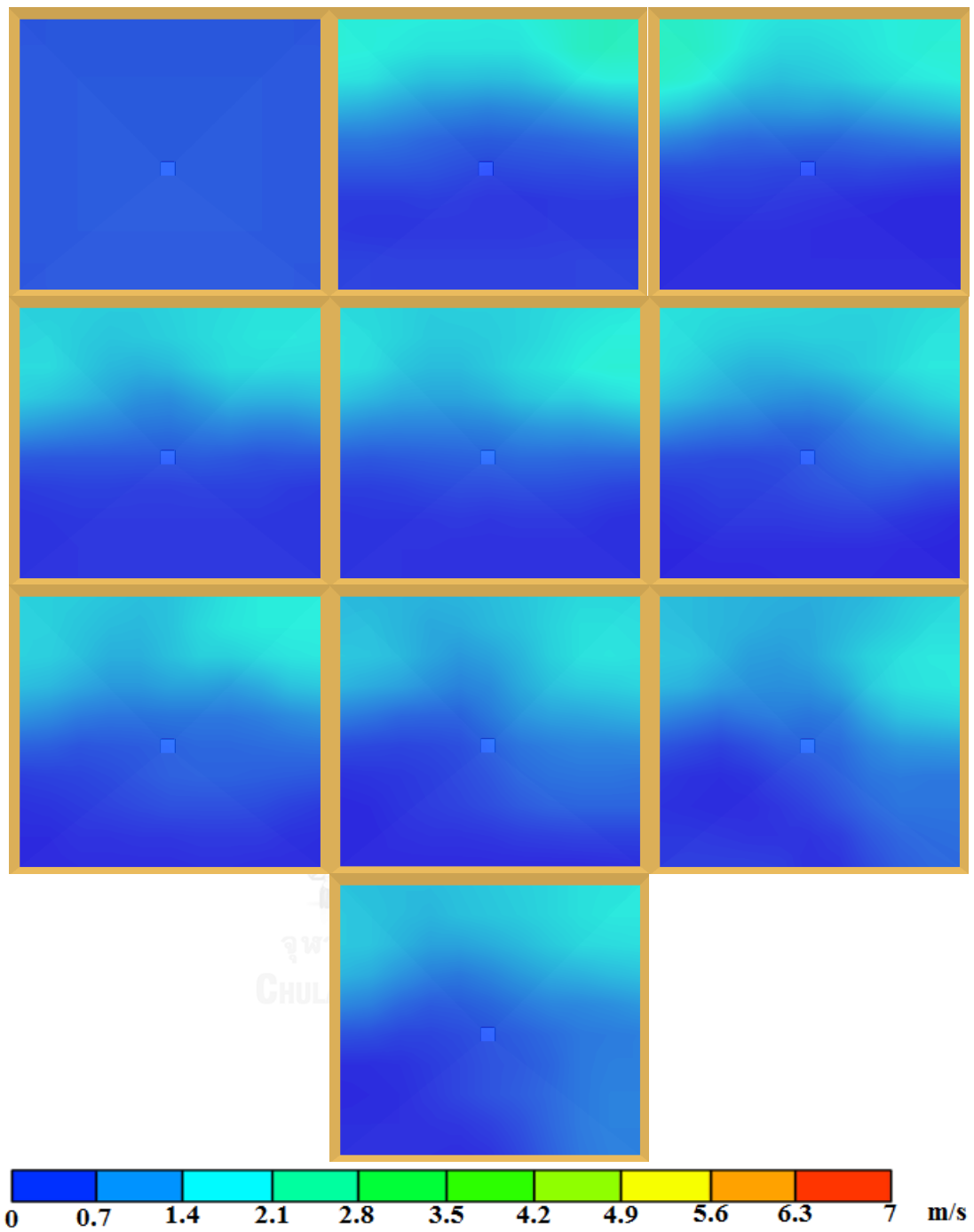
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 8
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



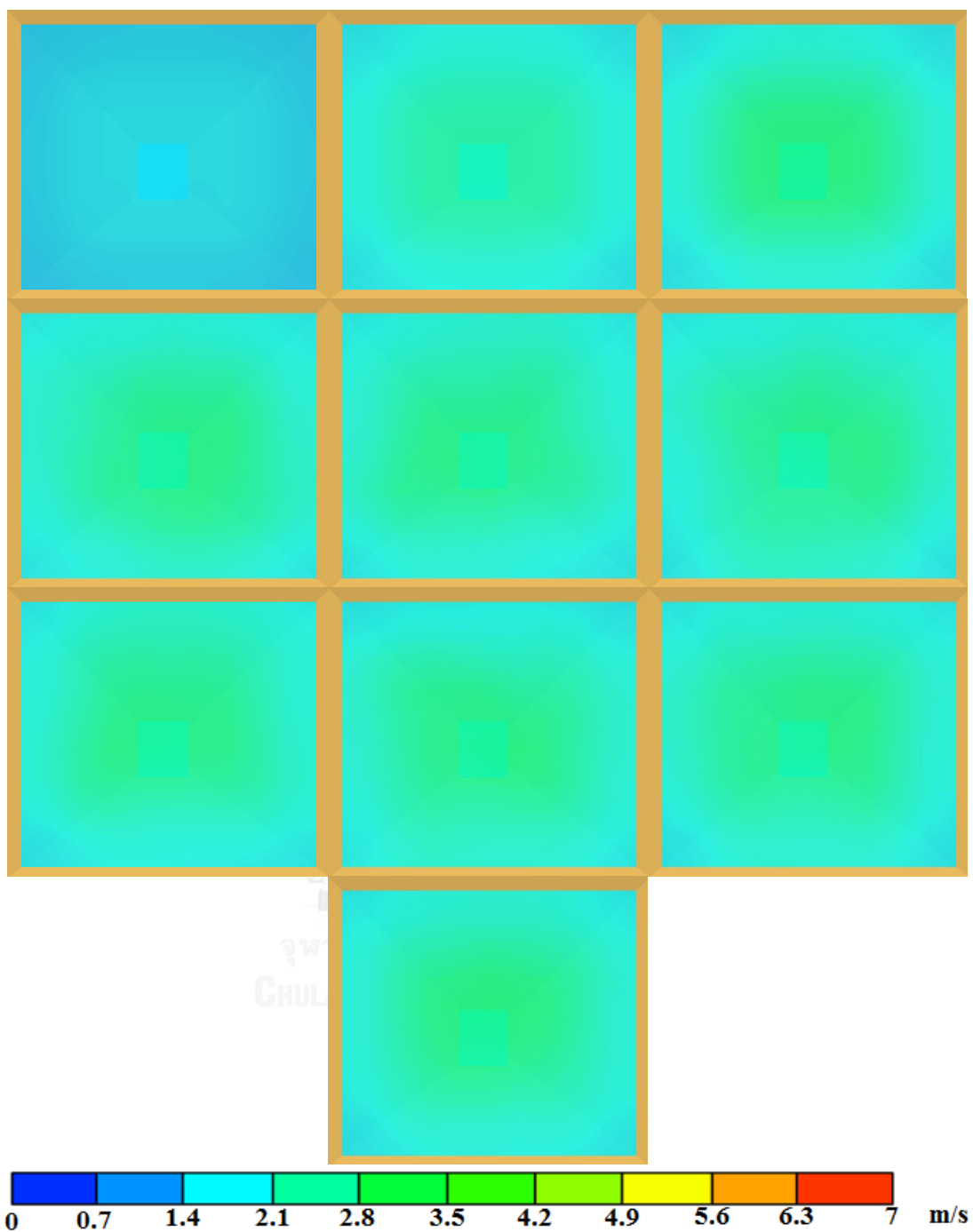
รูปที่ 4.28 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีนี้ที่ 8
(ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 9
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที

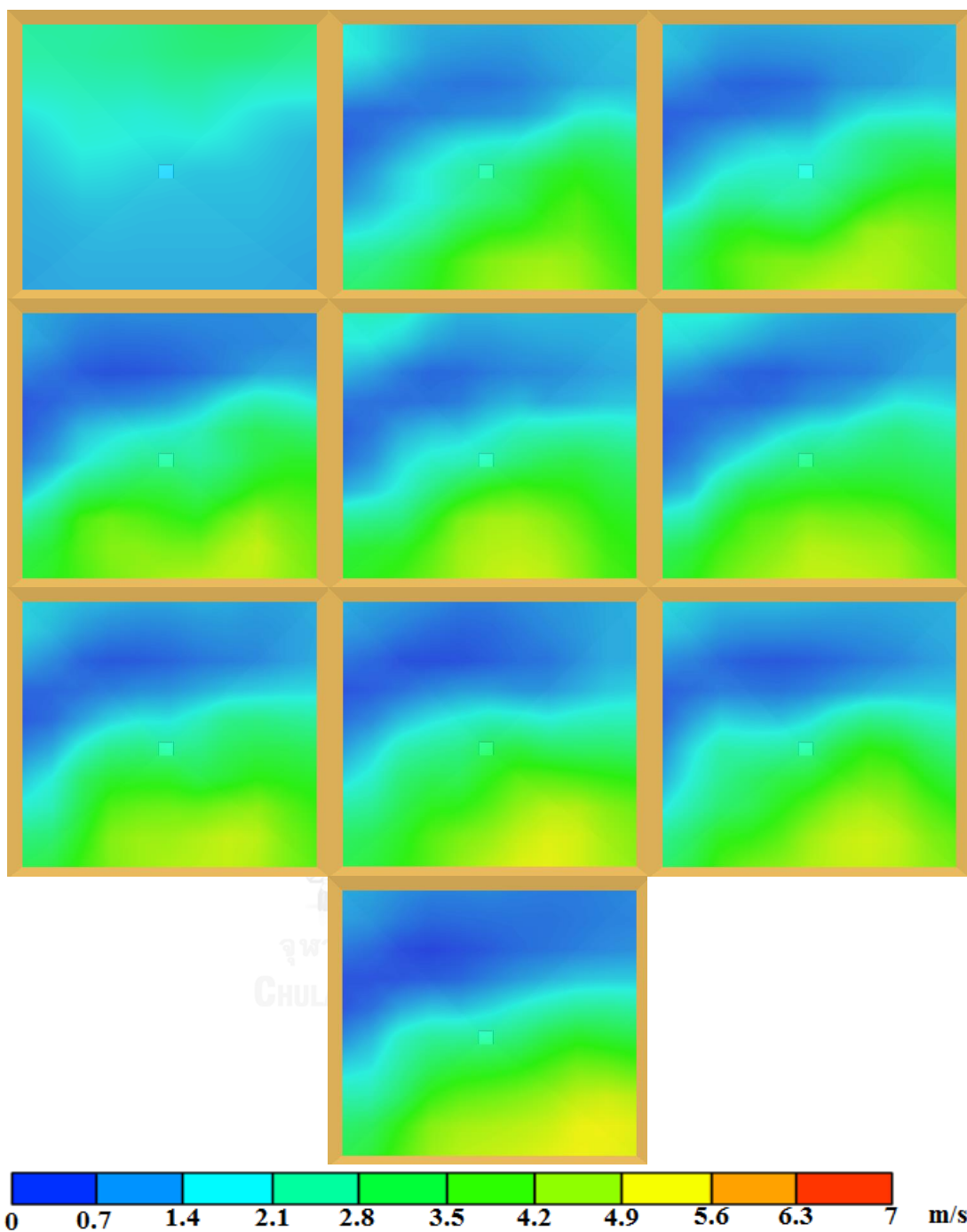


รูปที่ 4.30 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 9
(ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที

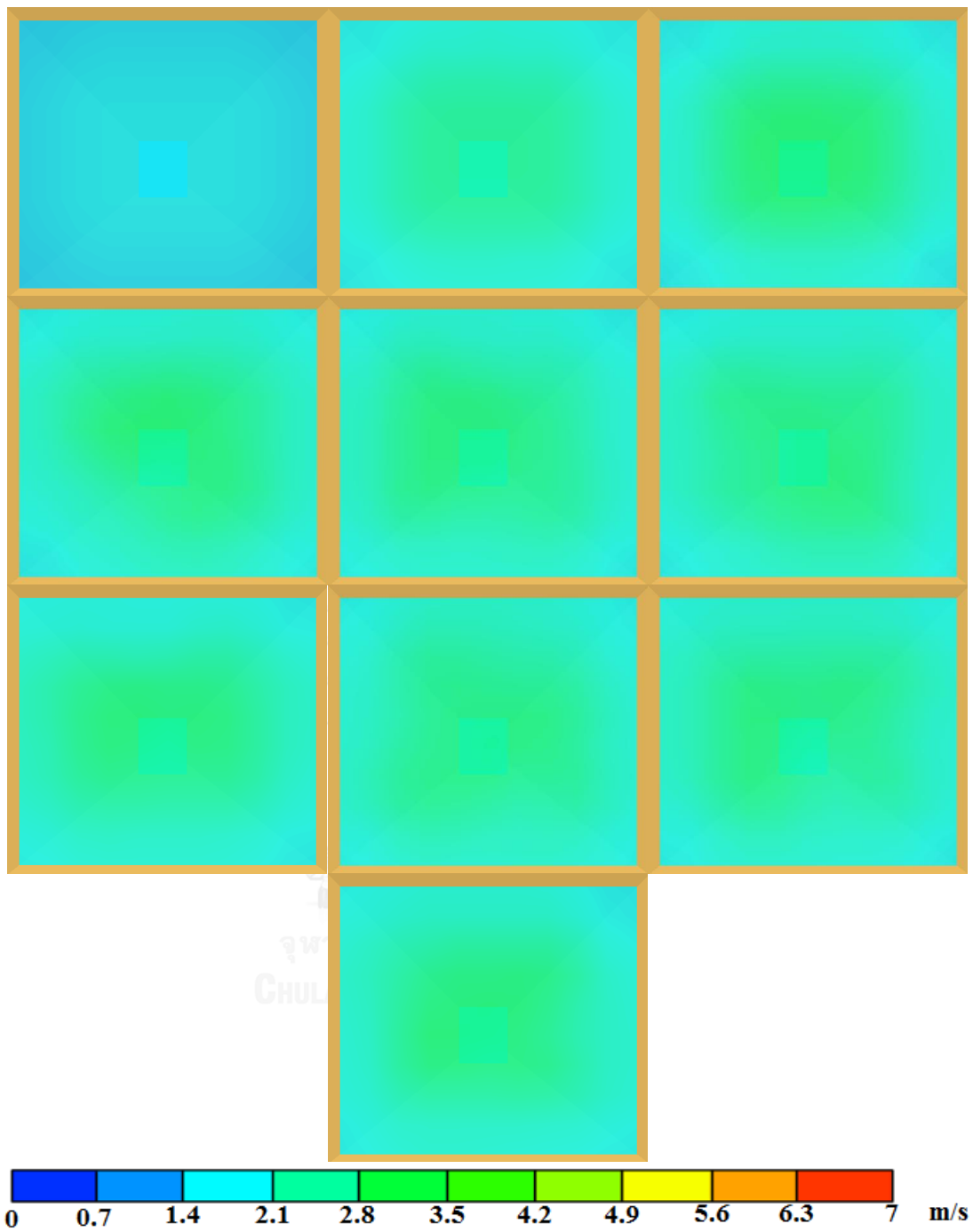


รูปที่ 4.31 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 13

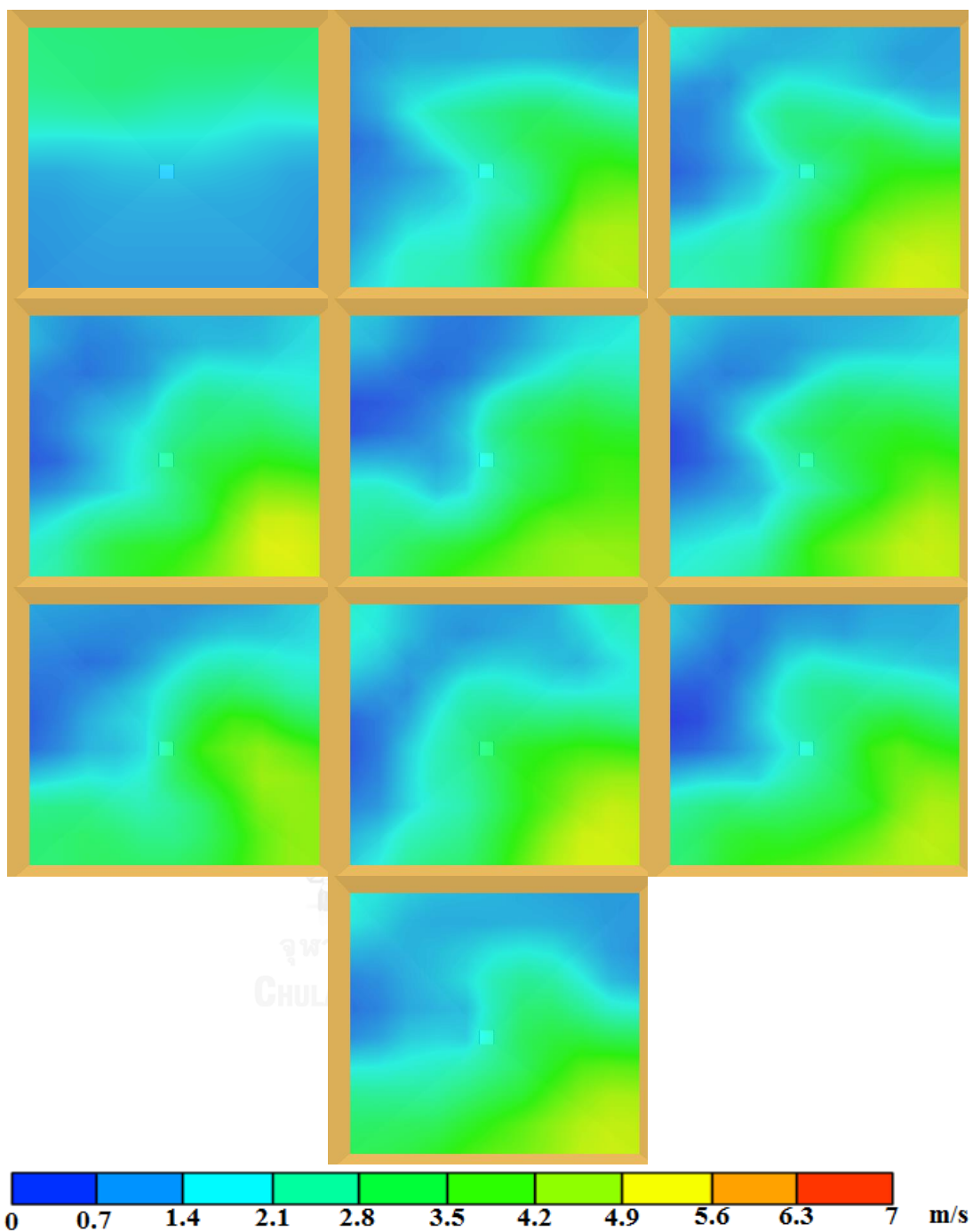
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



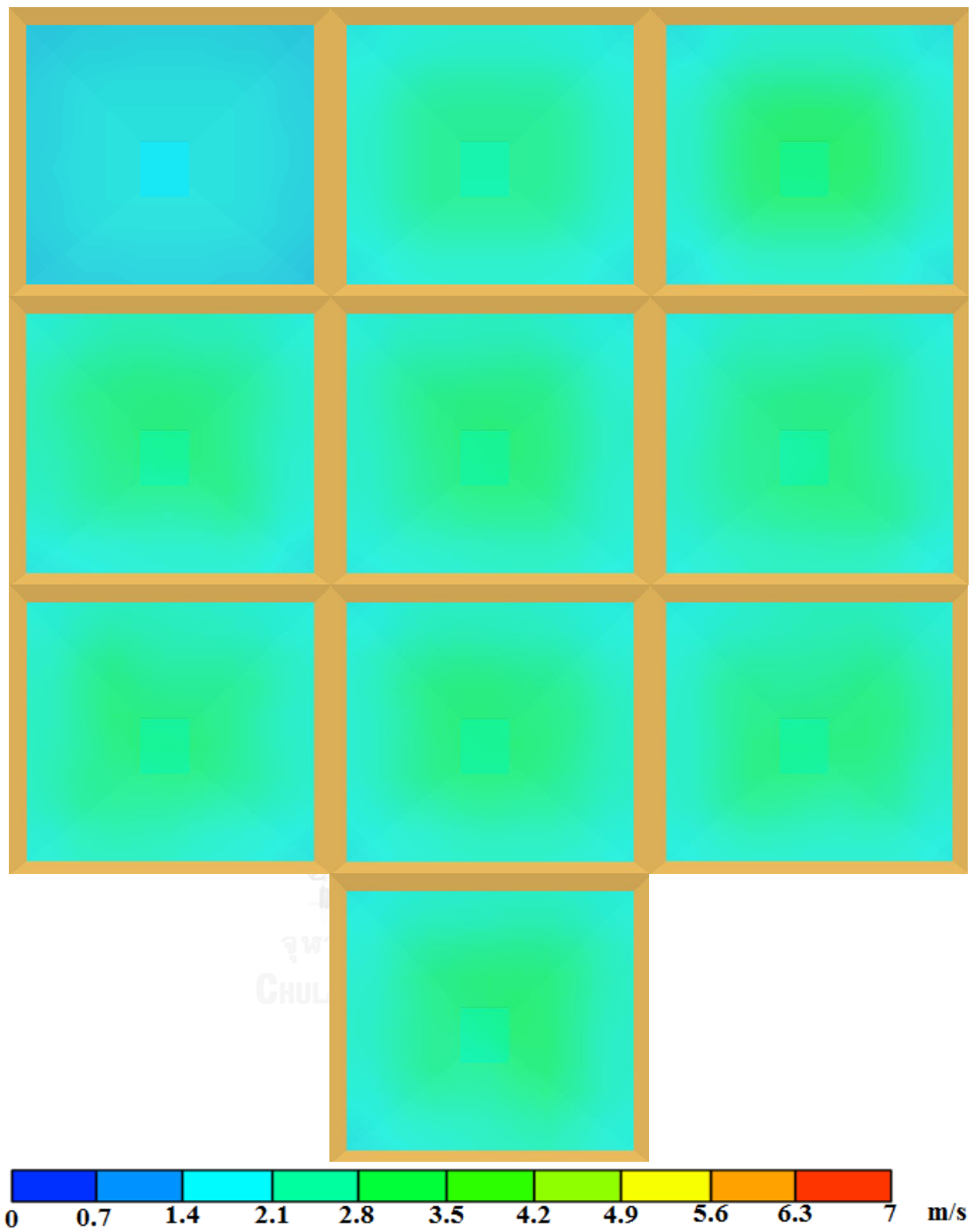
รูปที่ 4.32 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 13
(ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



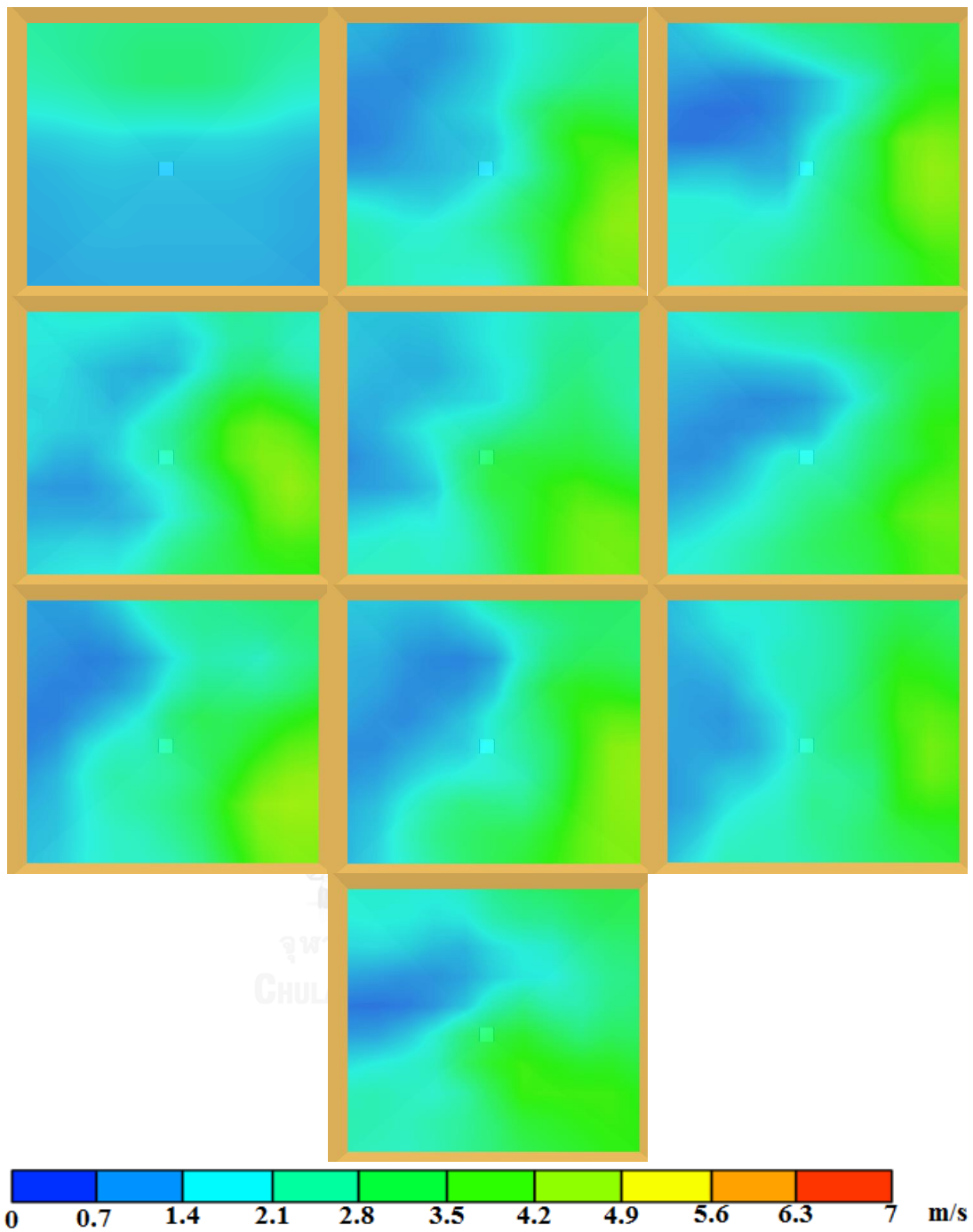
รูปที่ 4.33 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 14
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



รูปที่ 4.34 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณี 14
(ตำแหน่งที่ 600 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



รูปที่ 4.35 การกระจายตัวของความเร็วในพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ในกรณีที่ 15
(ตำแหน่งที่ 400 เมตร) ที่เวลา 60-600 วินาที



4.3 การคำนวณเวลาในการอพยพ

Fahy [23] การอพยพของกลุ่มคนประกอบไปด้วย ความหนาแน่นของกลุ่มคน ความเร็ว และ อัตราการไหลของกลุ่มคน ถ้าความหนาแน่นของกลุ่มคนมีค่าน้อยกว่า 0.54 คนต่อตารางเมตรในเส้นทางฉุกเฉินแต่ละคนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่ถ้าความหนาแน่นของกลุ่มคนมีค่ามากกว่า 3.8 คนต่อตารางเมตรจะทำให้เกิดสภาวะหยุดนิ่งหรือการเคลื่อนตัวได้ช้ามากเนื่องจากค่าความหนาแน่นของกลุ่มคนที่สูงส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันหนาแน่นและเกิดการเบียดเสียดกันของกลุ่มคน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความหนาแน่นได้ในรูปของสมการเชิงเส้นดังนี้

$$S = k - akD \quad (4.1)$$

โดยที่ S คือ ความเร็วตลอดการเคลื่อนที่ (เมตรต่อวินาที), D คือ ความหนาแน่นของกลุ่มคน (คนต่อตารางเมตร), k คือ ค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ ค่า a เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.266

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าของเวลาในการอพยพ

ประเภททางออก		k	ตัวแปลงค่า	F_{SM}
				คนต่อหน่วยของเวลา(วินาที)ต่อหน่วยของความกว้างสุทธิ(เมตร)
ช่องทางเดิน		1.4		1.32
บันไดหนีไฟ				
ลูกตั้ง (มิลลิเมตร)	ลูกนอน (มิลลิเมตร)			
190	254	1.00	1.66	0.95
178	279	1.08	1.85	1.01
165	305	1.16	2.08	1.09
165	330	1.23	2.22	1.16

อัตราการไหลของกลุ่มคน (F_S) เป็นเคลื่อนที่หรือการอพยพกลุ่มคนผ่านจุดหนึ่งๆ ในเส้นทางฉุกเฉินต่อหน่วยเวลาต่อหน่วยความกว้างทางที่ใช้ได้จริง (W_E) สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$F_S = SD \quad (4.2)$$

การคำนวณการไหลของกลุ่มคน (F_C) เป็นการนำผลการไหลของกลุ่มคนที่กำลังผ่านจุดๆ หนึ่งในเส้นทางออกสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$F_C = F_S W_E \quad (4.3)$$

เวลาที่ใช้ในการผ่านทาง (T_p) คือ เวลาสำหรับกลุ่มคนที่ใช้ในการผ่านเส้นทางออกและเกิดความปลอดภัย สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$T_p = \frac{P}{F_C} \quad (4.4)$$

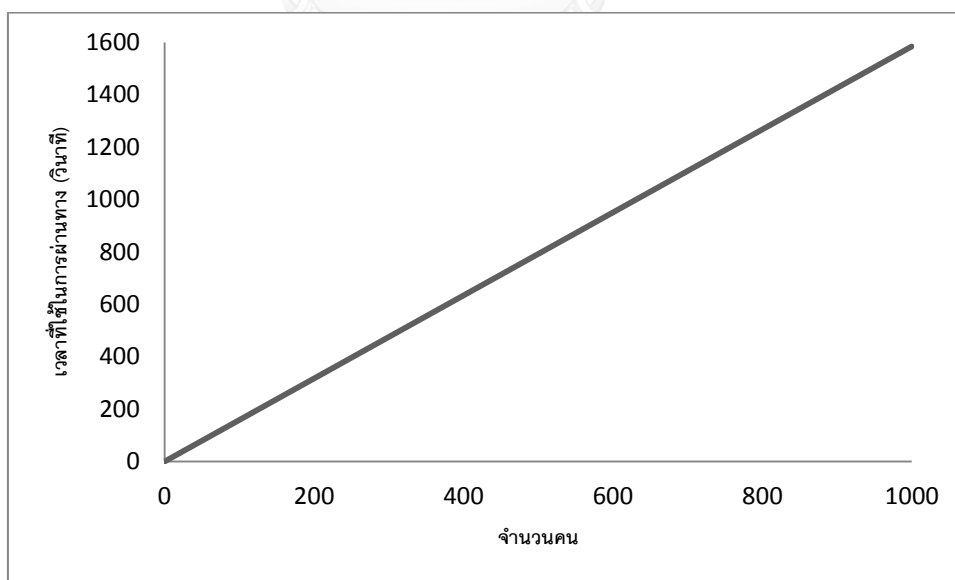
โดยที่ P คือ จำนวนคน

จากข้อมูลที่ได้จาก บริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพมหานคร จำกัด มหาชน พบว่าทางเดินฉุกเฉิน (W_E) มีค่าเท่ากับ 1.2 เมตร จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า F_{SM} มีค่าคงที่เท่ากับ 1.32 คนต่อวินาทีต่อเมตร

จากสมการที่ 4.3 ; $F_C = F_S W_E = 1.32 \times 1.2 = 1.584$ คนต่อวินาที

จากสมการที่ 4.4 ; $T_p = \frac{P}{F_C} = \frac{P}{1.584}$ (4.5)

ทำการสมมติค่าจำนวนคน เพื่อต้องการที่ทราบค่าของเวลาที่ทำให้จำนวนคนที่สมมติผ่านไป ได้หมด โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคนกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทาง

ผลที่ได้พบว่า จำนวนคนที่สามารถผ่านประตูต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 1.584 คนต่อวินาที และจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคนที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทางมีแนวโน้มสูงขึ้นและเป็นเส้นตรงเนื่องจากจำนวนคนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทาง

จากงานวิจัยของ Zhang et al. [24] ได้ทำการสรุปค่าความเร็วที่ใช้ในการหนีแยกตามช่วงอายุเช่น คนชรา ผู้ใหญ่ (ชาย/หญิง) และเด็ก เป็นต้น โดยแสดงในตารางที่ 4.4 ทางผู้วิจัยได้กล่าวว่าอย่างไรก็ตามไม่สามารถพิจารณาความแตกต่างกันของความเร็วในการหนีจึงจำเป็นต้องใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วในการหนีอยู่ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาทีซึ่งอยู่ภายในช่วงที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.4 ความเร็วที่ใช้ในการหนีแยกตามช่วงอายุ

ช่วงอายุ	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
คนชรา	0.75±0.10
ผู้ใหญ่ (ชาย)	1.30±0.10
ผู้ใหญ่ (หญิง)	1.10±0.10
เด็ก	0.90±0.10

เมื่อทำการแทนค่าความเร็วเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาทีลงในสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$$S = k - akD$$

$$1 = 1.4 - (1.4 \times 0.266 \times D)$$

$$D = 1.07 \text{ คนต่อตารางเมตร}$$

ดังนั้นเมื่อค่าความเร็วในการอพยพอยู่ที่ 1 เมตรต่อวินาที จำเป็นต้องทำให้ความหนาแน่นของคนให้อยู่ที่ค่าเท่ากับ 1.07 คนต่อตารางเมตรถึงจะมีความปลอดภัยในการอพยพ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการเคลื่อนตัวของควันไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิ และค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO โดยการจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการจำลองสถานการณ์การเกิดเพลิงไหม้ภายในอุโมงค์รถไฟใต้ดินโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยลดต้นทุนในการจำลองสถานการณ์จริง และได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาโดยผลที่ได้พบว่ามีผลสอดคล้องอย่างมีนัยสำคัญจึงทำให้เกิดความมั่นใจในการทำการศึกษาต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าระบบระบายอากาศแบบบังคับในระบบระบายอากาศชนิดที่ 2 เป็นระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพในการระบายควันดีที่สุดในทุกตำแหน่งของการเกิดเพลิงไหม้ทั้ง 3 ตำแหน่ง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการหยุดการไหลย้อนกลับของควันน้อยที่สุด ทำให้ในเส้นทางในการอพยพมีความปลอดภัยนั่นคือ ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ และค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO มีค่าอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย การนำข้อมูลไปใช้จำเป็นต้องมีลักษณะของปัญหาหรือข้อจำกัดที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

จำนวนคนที่สามารถผ่านประตูต่อวินาทีมีค่าเท่ากับ 1.584 คนต่อวินาที และจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคนที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทางมีแนวโน้มสูงขึ้นและเป็นเส้นตรงเนื่องจากจำนวนคนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการผ่านทาง และเมื่อค่าความเร็วในการอพยพอยู่ที่ 1 เมตรต่อวินาทีจำเป็นต้องทำให้ความหนาแน่นของคนให้อยู่ที่ค่าเท่ากับ 1.07 คนต่อตารางเมตรถึงจะมีความปลอดภัยในการอพยพ

5.2 ข้อจำกัดในการนำข้อมูลไปใช้

ผลที่ได้เป็นการจำลองเฉพาะ โดยปัญหาที่ศึกษามีการใช้หน้าตัดของอุโมงค์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และเส้นทางการเดินทางในทางตรง โดยที่อุโมงค์ฝั่งซ้าย และขวาต้องถูกเปิดออก

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ในการจำลองแบบเชิงตัวเลขแต่ละกรณีจำเป็นต้องใช้เวลานานเนื่องจากโดเมนมีขนาดใหญ่ ดังนั้นทางผู้วิจัยแนะนำว่าถ้าต้องศึกษาโดเมนที่มีขนาดใหญ่ ควรพิจารณาในการเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการคำนวณเพื่อช่วยในการลดระยะเวลาในการคำนวณได้

2. จำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อมีค่าอัตราการปล่อยความร้อนที่เพิ่มขึ้น

3. จำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการกระจายตัวของก๊าซชนิดอื่นๆ (HCN, O₂ และ CO₂)

4. จำลองแบบเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์การพังทลายของอุโมงค์เมื่อได้รับความร้อนจากเพลิงไหม้



รายการอ้างอิง

- [1] S. D. Duncan and W. Wilson, "Summit tunnel - post fire remedial works.," *Proc. Tunnelling '88*, pp. 87-95, 1998.
- [2] Federal Railroad Administration, "Report To Congress: Baltimore's Railroad Network, Challenges and Alternatives.," pp. 2-18, 2005-11.
- [3] I. J. Duckworth, "Fires in vehicular tunnels," *2th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*, 2008.
- [4] C. J. Kirkland, "2002 ITA Open Session: Fire and Life Safety, The fire in the Channel Tunnel," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 17, pp. 129-132, 2002.
- [5] G. Rayner, D. Millward, and A. Simpson, "Channel Tunnel closed after freight train fire," 2008.
- [6] Y. H. Bae, S. H. Lee, J. H. Choi, C. J. Yoon, and W. H. Hong, "The Predicted form of Clusters Using Inter-person Distance and Angle: Evidence from a Mock-up Set at the Daegu Subway Station," *Transportation Research Procedia*, vol. 2, pp. 159-167, 2014.
- [7] P. H. Thomas, "The movement of smoke in horizontal passages against an air flow," *Fire Research Note*, vol. 723, 1968.
- [8] Y. Oka and G. T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires," *Fire Safety Journal*, vol. 25, pp. 305-322, 1995.
- [9] H. Kurioka, Y. Oka, H. Satoh, and O. Sugawa, "Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels," *Fire Safety Journal*, vol. 38, pp. 319-340, 2003.
- [10] L. H. Hu, R. Huo, W. Peng, W. K. Chow, and R. X. Yang, "On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, pp. 650-655, 2006.
- [11] L. H. Hu, W. Peng, and R. Huo, "Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel," *J Hazard Mater*, vol. 150, pp. 68-75, Jan 15 2008.

- [12] L. H. Hu, R. Huo, and W. K. Chow, "Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, pp. 1468-1483, 2008.
- [13] S. R. Lee, "An Experimental Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires," *Journal of Fire Sciences*, vol. 23, pp. 119-138, 2005.
- [14] S. R. Lee and H. S. Ryou, "A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio," *Building and Environment*, vol. 41, pp. 719-725, 2006.
- [15] R. Harish and K. Venkatasubbaiah, "Effects of buoyancy induced roof ventilation systems for smoke removal in tunnel fires," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 42, pp. 195-205, 2014.
- [16] M. C. Weng, L. X. Yu, F. Liu, and P. V. Nielsen, "Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 42, pp. 96-104, 2014.
- [17] Y. F. Li, J. Bian, and J. M. Li, "Research on Smoke Flow in a Tunnel Fire of Subway System," *Procedia Engineering*, vol. 71, pp. 390-396, 2014.
- [18] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Fire Dynamics Simulation and Smoke View Ver.6," 2014.
- [19] J. Smagorinsky, "General circulation experiments with primitive equations," *The basic experiment*, vol. 91, pp. 99-164, 1963.
- [20] Y. Huang, T. H. Hong, and C. M. Kim, "A numerical simulation of train-induced unsteady airflow in a tunnel of Seoul subway," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, pp. 785-792, 2012.
- [21] G. V. Hadjisophocleous and N. Benichou, "Fire Safety Design Guidelines for Federal Building," *NRC-CNRC Institute for Research in Construction*, 1997.
- [22] P. A. Enright, "Impact of jet fan ventilation systems on sprinkler activation," *Case Studies in Fire Safety*, vol. 1, pp. 1-7, 2014.

- [23] R. F. Fahy, "Calculation Methods for Egress Prediction," *NFPA Ready Reference Human Behavior in Fire Emergencies*, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 37-59, 2003.
- [24] B. Zhang, Z. S. Xu, Q. W. Zhao, and Y. Y. Liu, "A Study on Theoretical Calculation Method of Subway Safety Evacuation," *Procedia Engineering*, vol. 71, pp. 579-604, 2014.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณ

การเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณในกรณีที่ 1 (ระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ)

&HEAD CHID='Subway', TITLE='MRT CASE 1' / เป็นการตั้งชื่อไฟล์ในการคำนวณ

&MESH IJK=1875,10,10, XB=0,1013,0,5.7,0,5.7 / เป็นการกำหนดจำนวนและขนาดโดเมน

&OBST XB=0,1013,0,5.7,0,0.85 / เป็นการเพิ่มทางเดินหนีไฟเข้าไปในโดเมน

&OBST XB=473,540,1.2,5.7,0.85,4.85, COLOR='CADET BLUE' / เป็นการเพิ่มรถไฟเข้าไปในโดเมน

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' / อุโมงค์ทางฝั่งซ้ายเปิด

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' / อุโมงค์ทางฝั่งขวาเปิด

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=246.9 / เป็นการกำหนดขนาดของเพลิงไหม้ (5MW)

&VENT XB=535.5,540,1.2,5.7,4.85,4.85, SURF_ID='BURNER',COLOR='ORANGE RED' / เป็นการกำหนดฐานที่ตั้งของเพลิงไหม้

&REAC FUEL = 'POLYURETHANE'

FYI = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'

SOOT_YIELD = 0.10

CO_YIELD = 0.3

N = 1.0

C = 6.3

H = 7.1

O = 2.1 / เป็นการกำหนดวัสดุในการจุดติดไฟในการเผาไหม้

&DEVC XYZ=0,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,2.35 m',/

&DEVC XYZ=0,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,5.7 m',/

&DEVC XYZ=100,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,2.35 m',/

&DEVC XYZ=100,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,5.7 m',/

&DEVC XYZ=200,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,2.35 m',/

&DEVC XYZ=200,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,5.7 m',/

&DEVC XYZ=300,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,2.35 m',/

&DEVC XYZ=300,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,5.7 m',/

&DEVC XYZ=400,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,2.35 m',/

&DEVC XYZ=400,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=500,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=500,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=600,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=600,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=700,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=700,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=800,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=800,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=900,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=900,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,5.7 m',/
 &DEVC XYZ=1000,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,2.35 m',/
 &DEVC XYZ=1000,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,5.7 m',/
 เป็นการกำหนดจุดการวัดอุณหภูมิ ณ ที่ตำแหน่งต่างๆ
 &SLCF PBY=0.55, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./ เป็นการกำหนดรูปแบบการ
 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ
 &SLCF PBY=0.55, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE./ เป็นการกำหนดรูปแบบการแสดงความ
 ความเร็ว
 &SLCF PBY=0.55, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE'/ เป็น
 การกำหนดรูปแบบการแสดงผลการกระจายตัวก๊าซคาร์บอนออกไซด์
 &TIME T_END=600. / เป็นการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณและแสดงผล
 &TAIL / เป็นการปิดท้ายของคำสั่ง

การเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณในกรณีนี้ที่ 4 (ระบบระบายอากาศแบบบังคับ โดยใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 1)

&HEAD CHID='Subway', TITLE='MRT CASE 4' /

&MESH IJK=1875,10,10, XB=0,1013,0,5.7,0,5.7 /

&OBST XB=0,1013,0,5.7,0,0.85 /

&OBST XB=473,540, 1.2,5.7,0.85,4.85 COLOR='CADET BLUE' /

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=246.9 /

&VENT XB=535.5,540,1.2,5.7,4.85,4.85, SURF_ID='BURNER',COLOR='ORANGE RED' /

&REAC FUEL = 'POLYURETHANE'

FYI = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'

SOOT_YIELD = 0.10

CO_YIELD = 0.3

N = 1.0

C = 6.3

H = 7.1

O = 2.1 /

&SURF ID='SUPPLY', VOLUME_FLOW=-55,COLOR='BLUE'/ เป็นการกำหนดอัตราการไหลของพัดลม TVF-02 ติดกับสถานี M2

&VENT XB= 10,14.5,0.65,5.15,5.7,5.7, SURF_ID='SUPPLY' / เป็นการกำหนดช่องของพัดลม TVF-02 ติดกับสถานี M2

&SURF ID='EXHAUST', VOLUME_FLOW=55,COLOR='RED'/ เป็นการกำหนดอัตราการไหลของพัดลม TVF-04 ติดกับสถานี M1

&VENT XB=995.6,1000,0.6,5,5.7,5.7 SURF_ID='EXHAUST' / เป็นการกำหนดช่องของพัดลม TVF-04 ติดกับสถานี M1

&DEVC XYZ=0,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,2.35 m' /

&DEVC XYZ=0,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,5.7 m' /

&DEVC XYZ=100,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,2.35 m' /

&DEVC XYZ=100,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,5.7 m' /

&DEVC XYZ=200,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,2.35 m' /

```
&DEVC XYZ=200,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=300,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=300,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=400,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=400,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=500,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=500,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=600,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=600,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=700,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=700,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=800,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=800,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=900,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=900,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,5.7 m',/  
&DEVC XYZ=1000,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,2.35 m',/  
&DEVC XYZ=1000,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,5.7 m',/  
&SLCF PBX=0.55, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./  
&SLCF PBY=0.55, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE./  
&SLCF PBZ=0.55, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE'/  
&TIME T_END=600. /  
&TAIL /
```

การเขียนคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณในกรณีนี้ 10 (ระบบระบายอากาศแบบบังคับ โดยใช้ระบบระบายอากาศชนิดที่ 2)

&HEAD CHID='Subway', TITLE='MRT CASE 10' /

&MESH IJK=1875,10,10, XB=0,1013,0,5.7,0,5.7 /

&OBST XB=0,1013,0,5.7,0,0.85 /

&OBST XB=473,540,1.2,5.7,0.85,4.85, COLOR='CADET BLUE' /

&OBST XB=10,14.5,0.65,5.15,5.15,5.7 / เป็นการสร้างปล่องพัดลม TVF-02 ติดกับสถานี M2

&OBST XB=995.6,1000,0.6,5,5.15,5.7 / เป็นการสร้างปล่องพัดลม TVF-04 ติดกับสถานี M1

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=246.9 /

&VENT XB=535.5,540,1.2,5.7,4.85,4.85, SURF_ID='BURNER',COLOR='ORANGE RED' /

&REAC FUEL = 'POLYURETHANE'

FYI = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'

SOOT_YIELD = 0.10

CO_YIELD = 0.3

N = 1.0

C = 6.3

H = 7.1

O = 2.1 /

&SURF ID='SUPPLY', VOLUME_FLOW=-55,COLOR='BLUE'/

&VENT XB= 14.5,14.5,0.65,5.15,5.15,5.7, SURF_ID='SUPPLY' /

&SURF ID='EXHAUST', VOLUME_FLOW=55,COLOR='RED'/

&VENT XB=995.6,995.6,0.6,5,5.15,5.7, SURF_ID='EXHAUST' /

&DEVC XYZ=0,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,2.35 m',/

&DEVC XYZ=0,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 0,5.7 m',/

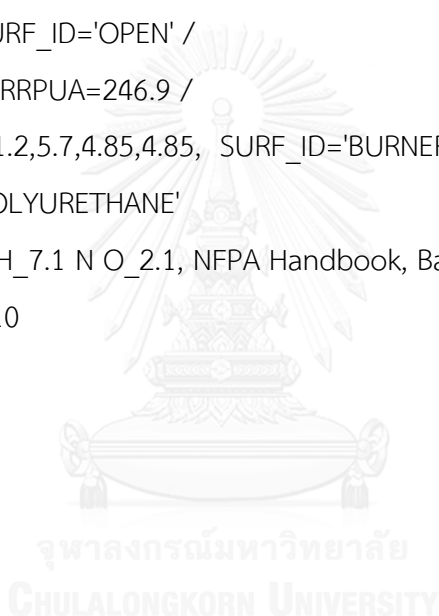
&DEVC XYZ=100,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,2.35 m',/

&DEVC XYZ=100,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 100,5.7 m',/

&DEVC XYZ=200,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,2.35 m',/

&DEVC XYZ=200,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 200,5.7 m',/

&DEVC XYZ=300,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,2.35 m',/

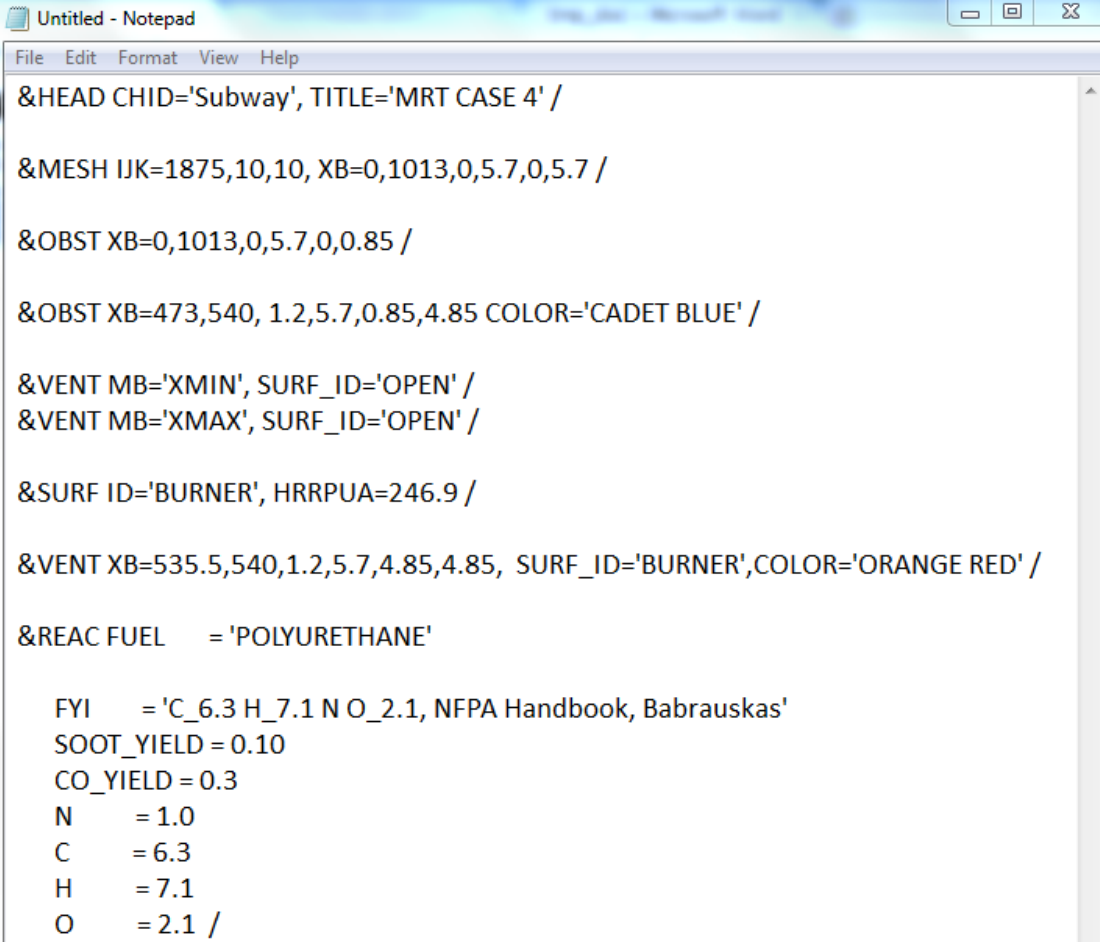


&DEVC XYZ=300,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 300,5.7 m',/
&DEVC XYZ=400,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,2.35 m',/
&DEVC XYZ=400,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 400,5.7 m',/
&DEVC XYZ=500,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,2.35 m',/
&DEVC XYZ=500,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 500,5.7 m',/
&DEVC XYZ=600,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,2.35 m',/
&DEVC XYZ=600,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 600,5.7 m',/
&DEVC XYZ=700,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,2.35 m',/
&DEVC XYZ=700,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 700,5.7 m',/
&DEVC XYZ=800,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,2.35 m',/
&DEVC XYZ=800,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 800,5.7 m',/
&DEVC XYZ=900,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,2.35 m',/
&DEVC XYZ=900,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 900,5.7 m',/
&DEVC XYZ=1000,0.55,2.35, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,2.35 m',/
&DEVC XYZ=1000,0.55,5.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Temp at 1000,5.7 m',/
&SLCF PBY=0.55, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=0.55, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY=0.55, QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE'/
&TIME T_END=600. /
&TAIL /

ภาคผนวก ข

การแสดงผลการทำงานการแสดงผลของโปรแกรม Fire dynamic simulation และ Smoke view

1. สร้างไฟล์ Notepad ที่มีนามสกุลเป็น .FDS โดยทำการเขียนคำสั่งดังที่ได้ยกตัวอย่างไว้ในภาคผนวก ก โดยแสดงในรูปที่ ข.1



```

Untitled - Notepad
File Edit Format View Help
&HEAD CHID='Subway', TITLE='MRT CASE 4' /

&MESH IJK=1875,10,10, XB=0,1013,0,5.7,0,5.7 /

&OBST XB=0,1013,0,5.7,0,0.85 /

&OBST XB=473,540, 1.2,5.7,0.85,4.85 COLOR='CADET BLUE' /

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=246.9 /

&VENT XB=535.5,540,1.2,5.7,4.85,4.85, SURF_ID='BURNER',COLOR='ORANGE RED' /

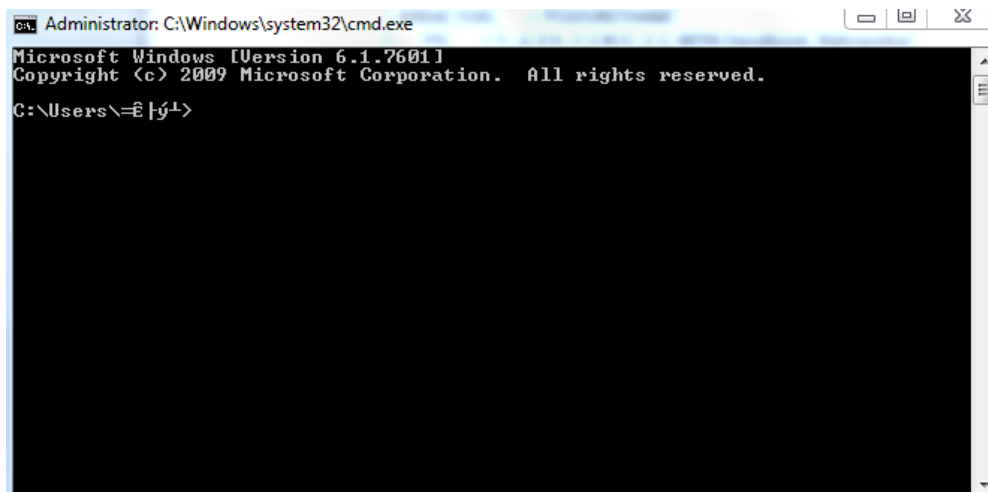
&REAC FUEL = 'POLYURETHANE'

FYI = 'C_6.3 H_7.1 N O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'
SOOT_YIELD = 0.10
CO_YIELD = 0.3
N = 1.0
C = 6.3
H = 7.1
O = 2.1 /

```

รูปที่ ข.1 หน้าต่างแสดงการป้อนคำสั่งลงใน Notepad

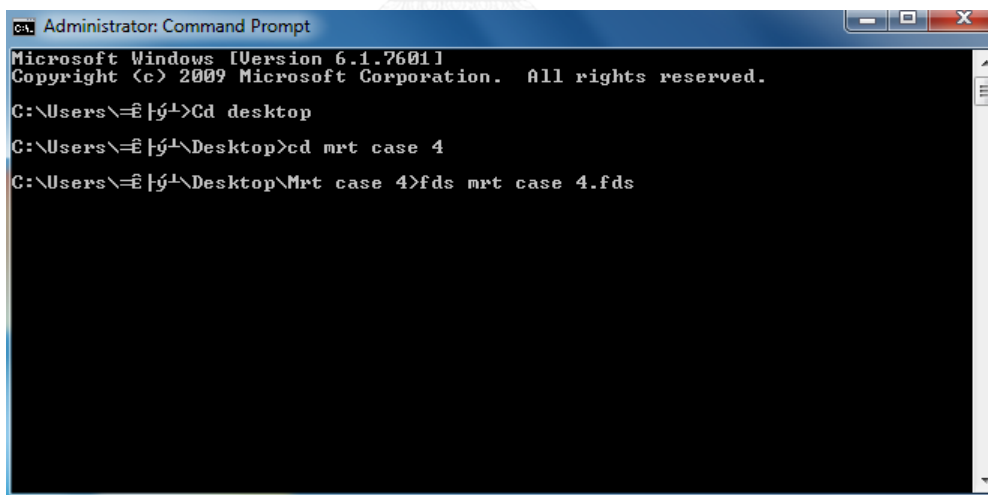
2. วิธีการรันโปรแกรมทำได้โดยการเปิดหน้าต่าง Command Prompt โดยไปที่คำสั่ง Start > Run > Cmd ดังแสดงในรูปที่ ข.2



```
Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\=เ้|ย>
```

รูปที่ ข.2 หน้าต่าง Command Prompt

3. จากนั้นพิมพ์หาตำแหน่งของไฟล์ที่เราตั้งอยู่ ในที่นี้ตำแหน่งไฟล์จะอยู่ที่หน้า Desktop ในชื่อ Folder “Mrt case 4” รอจนกว่าโปรแกรมจะคำนวณเสร็จ แสดงแสดงในรูปที่ ข.3



```
Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\=เ้|ย>Cd desktop
C:\Users\=เ้|ย\Desktop>cd mrt case 4
C:\Users\=เ้|ย\Desktop\Mrt case 4>fds mrt case 4.fds
```

รูปที่ ข.3 หน้าต่าง Command Prompt

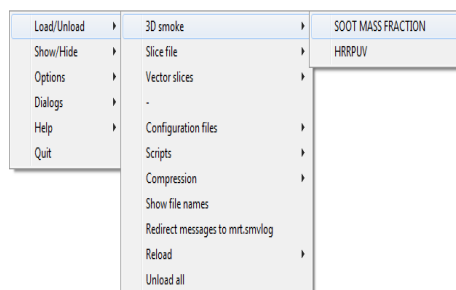
4. เมื่อโปรแกรมคำนวณเสร็จ ในส่วนนี้จะแสดงการทำงานของโปรแกรม Smoke view ที่ใช้ในการแสดงการคำนวณ ใน Folder สามารถเปิดผ่าน File ที่มีนามสกุล .SMV จะแสดงได้ดังรูปที่ ข.4

Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014

รูปที่ ข.4 หน้าต่างโปรแกรม Smoke view

5. การแสดงการเคลื่อนตัวของควัน โดยคลิกเมาส์ขวานั้นเลือก Load/Unload > 3D smoke > SOOT MASS FRACTION ดังแสดงในรูปที่ ข.5

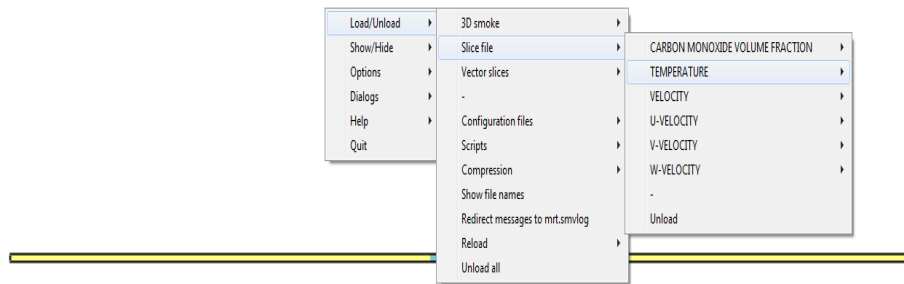
Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014



รูปที่ ข.5 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงการเคลื่อนตัวของควัน

6. การแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยคลิกเมาส์ขวาจากนั้นเลือก Load/Unload > Slice file > TEMPERATURE ดังแสดงในรูปที่ ข.6

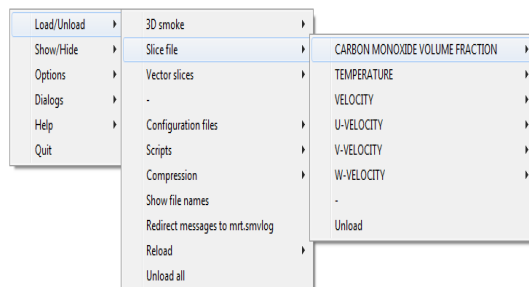
Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014



รูปที่ ข.6 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิ

7. การแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO โดยคลิกเมาส์ขวาจากนั้นเลือก Load/Unload > Slice file > CARBON MONOXIDE VOLUME FRACTION ดังแสดงในรูปที่ ข.7

Smokeview 6.1.12 - Oct 1 2014



รูปที่ ข.7 หน้าต่างแสดงตัวเลือกในการแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตตินันท์ บุญเปี่ยม เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร เมื่อ ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใน ปีการศึกษา 2556

