การศึกษาอากาศพลศาสตร์ในอุโมงค์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าอุโมงค์ด้วยแบบจำลองสองมิติ

ณัฐธิดา มุสิกะศิริ
พชรพล จุลมณี
พิจักษณ์ ชินวานิชย์เจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
หลักสูตรวิศวกรรมวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Aerodynamic Study of Trains Moving into a Tunnel with Two-Dimensional Modeling

Nattida Musikasiri
Phatcharaphol Chulmanee
Phichak Chinwanitjaroen

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาอากาศพลศาสตร์ในอุโมงค์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าอุโมงค์ด้วยแบบจำลองสองมิติ Aerodynamic Study of Trains Moving into a Tunnel with Two-Dimensional Modeling.

ผู้จัดทำ

1.นางสาวณัฐธิดา	มุสิกะศิริ	61010334
2.นายพชรพล	จุลมณี	61010681
3.นายพิจักษณ์	ชินวานิชย์เจริญ	61010731

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอากาศพลศาสตร์ในอุโมงค์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าอุโมงค์ด้วยแบบจำลองสองมิติ

นางสาวณัฐธิดา มุสิกะศิริ 61010334
นายพชรพล จุลมณี 61010681
นายพิจักษณ์ ชินวานิชย์เจริญ 61010731
ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2564

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์รอบวัตถุที่เคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่จำกัดด้วยการจำลองแบบสองมิติของรถไฟที่เคลื่อนเข้าสู่อุโมงค์เดี่ยวรางคู่ ทั้งกรณีที่รถไฟหนึ่งขบวนและรถไฟสองขบวนสวนทางกัน โดยถูกสร้างและจำลองด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent ตัวรถไฟถูกจำลองให้มีขนาดกว้าง 3 m และยาว 100 m หัวขบวนและท้ายขบวนเป็นรูปสามเหลี่ยมที่ถูกทำให้โค้งมนด้วยรัศมีความโค้ง 0.75 m มีขนาดสิ่งแวดล้อมกว้าง 144 m และยาว 205 m โดยรถไฟต้องอยู่ห่างจากทางเข้าอุโมงค์อย่างน้อย 100 m ก่อนเคลื่อนที่เข้า ความกว้างของอุโมงค์ถูกจำลองให้มีขนาดที่แตกต่างกันไปตามความเร็วของรถไฟ 11.5, 12.2 และ 12.6 m สำหรับอัตราเร็ว 200, 250 และ 350 km/h ตามลำดับ แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้รับการทดสอบเทียบกับการวิจัยอ้างอิง ความดันอากาศตามแนวอุโมงค์ที่ได้จากการศึกษานี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่แสดงในงานวิจัยอ้างอิง การจำลองการไหลและความดันของอากาศภายในอุโมงค์สำหรับกรณีรถไฟที่เคลื่อนที่ขบวนเดียวและรถไฟสองขบวนที่เคลื่อนที่สวนทางกันในอุโมงค์ ถูกจำลองด้วยสามอัตราเร็วคือ 200, 250 และ 350 km/h พฤติกรรมของความดันอากาศพบว่ามีความคล้ายคลึงกันทั้งสองกรณี โดยมีแนวโน้มของคลื่นอัดตัวและคลื่นขยายตัวของอากาศเกิดขึ้นสลับกันในอุโมงค์ ซึ่งความดันอากาศจะกลายเป็นบวกทันทีที่รถไฟเข้าสู่อุโมงค์ ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างสองกรณีคือ กรณีรถไฟสองขบวนสวนทางกันในอุโมงค์พบว่ามีความดันอากาศสูงสุดที่กลางอุโมงค์ และสำหรับทั้งสองกรณี ขนาดของความดันบวกและลบเพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถไฟที่เพิ่มขึ้นด้วยสมการของฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง

คำหลัก: อากาศพลศาสตร์; อุโมงค์; รถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Aerodynamic Study of Trains Moving into a Tunnel with Two-Dimensional Modeling.

Nattida Musikasiri 61010334
Phatcharaphol Chulmanee 61010681
Phichak Chinwanitjaroen 61010731
Asst.Prof.Dr.Unnat Pinsopon Advisor

Year 2021

ABSTRACT

This thesis presents the study of aerodynamics around the object moving into a confined space. Two-dimensional numerical models of trains moving into a tunnel with one track and cross-directional double tracks were created and simulated on Ansys Fluent. The train was modeled to be 3 m wide and 100 m long with triangular-shaped ends rounding for 0.75 m radii. The environment dimensions are 144 m in width and 205 m in length. The train had to locate at least 100 m far from the tunnel entrance before entering. The tunnel width was modeled to vary according to the train speed; 11.5, 12.2 and 12.6 m for the speed of 200, 250 and 350 km/h, respectively. The model used in the study was verified against previous research. The pressure of the air along the track obtained in this study had the same trends as ones shown in the previous research. The flow and pressure of air inside the tunnel for the cases of single train entering and two trains crossing in the tunnel were then simulated at three speeds, 200, 250 and 350 km/h. The air pressure behaviors were found to be similar for both cases of simulations. Similar trends of air compression and air expansion waves occurred alternately in the tunnel, with the air pressure became positive first at the moment the train entering the tunnel. The main difference between two cases was that the air pressure was found to be maximum at the middle of the tunnel for the case of two trains crossing in the tunnel. For both cases, the magnitudes of positive and negative pressures increased with the increase of the train speed with the shapes of quadratic functions.

Keywords: Aerodynamics; Tunnel; Train

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อุนนัต พิณโสภณ ที่ช่วยให้คำแนะนำแก้ไขปัญหาและให้ความรู้มาโดยตลอด

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิศวกรรมเครื่องกล รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข รศ.ดร.วิฑาดา เจษฎารัตน-ชัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการใช้โปรแกรม ANSYS

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ ๆ ในภาควิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้คำปรึกษาและแนะนำข้อมูลต่าง ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้คอมพิวเตอร์ในการศึกษาเชิงตัวเลขและค้นคว้าหาความรู้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดามารดา ที่คอยสนับสนุนทำให้ข้าพเจ้าทำเล่มวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ประโยชน์ต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณ บุคคลทุกคนที่กล่าวมาข้างต้น

นางสาว ณัฐธิดา มุสิกะศิริ
นาย พชรพล จุลมณี
นาย พิจักษณ์ ชินวานิชย์เจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง.....หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญรูป.....VII
บทที่ 1.....1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....2
บทที่ 2.....3
2.1 บทนำ.....3
2.2 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหล (Governing Equation of Fluid Dynamic).....3
2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation).....3
2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation).....4
2.2.3 สมการพลังงาน (Energy Equation).....4
2.3 คุณสมบัติของของไหล.....4
2.4 สมการเฉลี่ยของเรย์โนลนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Average Navier stokes equations).....6
2.5 สมการแรงต้านอากาศ.....7
2.6 อัตราเร็วของรถไฟ (Train Speed).....8
2.7 ช่องระบายอากาศ (Ventilation shaft).....9
2.8 ปรากฏการณ์ลูกสูบ (Piston effect).....9
2.9 อากาศพลศาสตร์และการระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟ (Aerodynamics and ventilation in rail tunnels).....11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง.....หน้า
2.10 เทคนิคในการหาผลการทดลอง (Experimental and computational techniques).... 12
2.10.1 การทดลองในสภาพแวดล้อมจริง (Full-scale measurement)..... 13
2.10.2 การทดลองโดยการสร้างแบบจำลอง (Physical modelling)..... 13
2.10.3 การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ (Numerical simulations)..... 13
2.10.3.1 เทคนิคการไถลของขอบเขต (sliding boundary technique)..... 13
2.10.3.2 เทคนิคการเคลื่อนที่ของกริด (moving mesh technique)..... 14
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 14
2.11.1 ความเสี่ยงของบาดเจ็บเกี่ยวกับหูของผู้โดยสารและคนขับ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วสูง : การจำลองเชิงตัวเลขและการวิจัยเชิงทดลอง (Risk of Ear Complaints of Passengers and Drivers While Trains Are Passing Through Tunnels at High Speed: A Numerical Simulation and Experimental Study)..... 14
2.11.2 อากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ (Aerodynamic of the Trains in Tunnels).. 15
2.11.3 ขนาดของอุโมงค์รถไฟ (Design Basis and Principles)..... 19
บทที่ 3 22
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองการไหลในทรงกระบอก..... 22
3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง..... 23
3.1.2 การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) และการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis)..... 23
3.1.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี..... 25
3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 27
3.2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง..... 28
3.2.2 การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) และการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis)..... 29
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)..... 34
3.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 41
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา..... 44
3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา..... 45
3.3.2 การแบ่งกริดที่ใช้ในการศึกษา (Meshing)..... 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง..... .....หน้า
3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองที่ทำการศึกษา (Model condition) 48
บทที่ 4 51
4.1 พฤติกรรมการไหลของอากาศและความดันภายในอุโมงค์รถไฟขบวนเดียว 51
4.1.1 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m..... 61
4.1.2 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งภายในอุโมงค์ x = 50, 100, 150, 200, 250 m..... 62
4.1.3 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งทางออกอุโมงค์ x = 300 m..... 66
4.2 ขนาดของความดันในอุโมงค์ เมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกัน 67
4.3 ขนาดของความดันในอุโมงค์กับอัตราเร็ว 75
4.3.1 รถไฟขบวนเดียว..... 76
4.3.2 รถไฟสองขบวนสวนทางกัน 79
บทที่ 5 83
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 83
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อสานต่องานวิจัย 84
เอกสารอ้างอิง 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

เรื่อง.....หน้า
รูปที่ 2.1 (a) การทดลองหาประเภทของการไหล (b) ประเภทของการไหลที่ได้จากการทดลอง..... 5
รูปที่ 2.2 กราฟเมื่อเวลาขึ้นอยู่กับของของไหล ณ จุดใดจุดหนึ่ง..... 5
รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลในท่อแบบ Fully developed region..... 6
รูปที่ 2.4 การหมุนเกิดจากความแตกต่างระหว่างแรงต้านอากาศที่เกิดบนพื้นเว้า..... 8
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นแรงดันสองรูปที่เกิดจากรถไฟวิ่งผ่านอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วต่างกัน..... 8
รูปที่ 2.6 การกระจายความดันสูงสุดรอบอุโมงค์ (a) สำหรับรถไฟสายใต้ 235 km/h..... 9
รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นคลื่นความดันบวก (Compression wave) หมายเลข ① คลื่นความดันลบ (Expansion wave) หมายเลข ② และคลื่นความดันสะท้อนกลับ (Reflection wave) ของคลื่นความดันหมายเลข ① และ ② [5]..... 11
รูปที่ 2.8 รูปแบบของความดันที่ถูกวัดและคำนวณโดย termodun ใน Grauholz [7]..... 12
รูปที่ 2.9 แสดงถึงความดันแตกต่างกันแต่ละอัตราเร็วในห้องโดยสาร..... 15
รูปที่ 2.10 แสดงขนาดและรูปร่างของรถไฟของงานวิจัยอากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ [5] ... 16
รูปที่ 2.11 แสดงขนาดและความยาวของอุโมงค์และสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยอากาศพลศาสตร์ 16
รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งของจุดที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ [5]..... 17
รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของจุด P3, P4 และ P7 บนระนาบ yz [5]..... 17
รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความดันที่ตำแหน่ง P3, P4 และ P7 ในเวลาต่าง ๆ [5]..... 18
รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความดันที่ตำแหน่ง P1, P2, P3, P5 และ P6 ในเวลาต่าง ๆ [5] 18
รูปที่ 2.16 ขนาดอุโมงค์รถไฟอัตราเร็วสูง (a) ขนาดของอุโมงค์รถไฟทางคู่ที่อัตราเร็วที่ 200 km/h (b) ขนาดของอุโมงค์รถไฟทางคู่ที่อัตราเร็วที่ 250 km/h..... 20
รูปที่ 3.1 การไหลภายในท่อ..... 22
รูปที่ 3.2 แบบจำลองการไหลภายในท่อ..... 23
รูปที่ 3.3 ตารางแสดงคุณภาพของกริด (ที่มา www.forum.ansys.com)..... 24
รูปที่ 3.4 การสร้างกริดแบบจำลองภาพรวม..... 24
รูปที่ 3.5 การสร้างกริดแบบจำลองในมุมมองภาพตัด..... 24
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pressure) และจำนวนครั้งการทดสอบ (Iteration)26
รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pressure) กับขนาดของกริด (m)..... 27
รูปที่ 3.8 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (m)..... 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง.....หน้า
รูปที่ 3.9 แบบจำลองของรถไฟที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (m) 28
รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองที่ระยะ x=0,50,100,200,300 (m) 29
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองตามแนวแกน Y ที่ตำแหน่ง A=1.5, B=2.0, C=2.5, D=3.0, E=3.5, F=4.0, G=4.5, H=4.815 (หน่วยm) 30
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) ตามตำแหน่งในแนวแกน y 30
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) 31
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) ที่การสร้างกริดแบบเต็มพื้นที่อุโมงค์ และแบบเฉพาะขอบอุโมงค์ 32
รูปที่ 3.15 แสดงการใช้กริดแบบเต็มอุโมงค์ 33
รูปที่ 3.16 แสดงการใช้กริดแบบเฉพาะขอบอุโมงค์ 33
รูปที่ 3.17 แสดงการตั้งค่า ในหัวข้อ General 34
รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่า Viscous Model 35
รูปที่ 3.19 แสดงการตั้งค่า Energy 35
รูปที่ 3.20 แสดงการตั้งค่า ในหัวข้อ Materials 36
รูปที่ 3.21 แสดงการตั้งค่า Boundary condition ของ object 36
รูปที่ 3.22 แสดงการเขียนโค้ดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ 37
รูปที่ 3.23 แสดงการ Compiled UDFs 38
รูปที่ 3.24 แสดงการตั้งค่า Dynamic Mesh 38
รูปที่ 3.25 แสดงการตั้งค่า Remeshing ในส่วนของ Parameters 39
รูปที่ 3.26 แสดงการตั้งค่า Dynamic Mesh Zone 39
รูปที่ 3.27 แสดงการตั้งค่า Solution Initialization 40
รูปที่ 3.28 แสดงการตั้งค่า Run Calculation 40
รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไป 41
รูปที่ 3.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) กับ เวลา (s) 41
รูปที่ 3.31 รูปแบบของความดันที่ถูกวัดและคำนวณโดย termodun ใน Grauholz [7] 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง..... .....หน้า
รูปที่ 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไป..... . 43
รูปที่ 3.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายใน อุโมงค์ ที่อัตราเร็ว 350 km/h และ 250 km/h 44
รูปที่ 3.34 ขนาดแบบจำลองสำหรับรถไฟหนึ่งขบวน (m)..... 45
รูปที่ 3.35 ขนาดแบบจำลองสำหรับรถไฟสองขบวนสวนทางกัน (m)..... 45
รูปที่ 3.36 ขนาดแบบจำลองรถไฟ (m) 45
รูปที่ 3.37 ขนาดแบบจำลองขนาดอุโมงค์..... 46
รูปที่ 3.38 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองที่ระยะ x = 0, 50, 100, 200 และ 300 (m) 46
รูปที่ 3.39 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองตามแนวแกน Y..... 46
รูปที่ 3.40 แสดงภาพรวมของกริดที่ใช้ในการศึกษาแบบรถไฟคันเดียว 47
รูปที่ 3.41 แสดงภาพรวมของกริดที่ใช้ในการศึกษาแบบรถไฟสวนกัน 47
รูปที่ 3.42 แสดงภาพกริดรอบรถไฟ 48
รูปที่ 3. 43 แสดงการเขียนโค้ดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....49
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไป 51
รูปที่ 4.2 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ก่อนรถไฟเข้าอุโมงค์ 53
รูปที่ 4.3 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์..... 55
รูปที่ 4.4 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์..... 56
รูปที่ 4.5 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์..... 57
รูปที่ 4.6 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 4.21 s..... 58
รูปที่ 4.7 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 4.59 s..... 58
รูปที่ 4.8 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 5.20 s..... 59
รูปที่ 4.9 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 6.51 s..... 60
รูปที่ 4.10 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์เมื่อรถไฟออกจากอุโมงค์ 60
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)..... 61
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) ตำแหน่งภายในอุโมงค์ x = 50, 100, 150, 200, 250 m 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง..... .....หน้า
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) ที่ตำแหน่งทางออกอุโมงค์ x = 300 m 66
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไป.....67
รูปที่ 4.15 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ เมื่อรถไฟทั้งสองขบวนเริ่มเข้าอุโมงค์ ... 69
รูปที่ 4.21 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์เมื่อรถไฟออกจากอุโมงค์ 75
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 350 km/h 76
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 250 km/h 76
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 200 km/h 77
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไป 77
รูปที่ 4.26 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)..... 78
รูปที่ 4.27 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความลบสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)..... 78
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)..... 79
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)..... 80
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)..... 80
รูปที่ 4.31 แสดงค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)..... 81
รูปที่ 4.32 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)..... 81
รูปที่ 4.33 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความลบสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)..... 82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

เรื่อง.....หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางขนาดกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis) 32
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m 61
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 50 m 62
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 100 m 63
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 150 m 64
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 200 m 64
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 250 m 65
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 300 m 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันการขนส่งในโลกมีมากมายหลายช่องทางทั้งทางถนน ทางราง ทางน้ำ และทางอากาศ แต่ที่น่าสนใจคือต้นทุนในการขนส่งทางรางนั้นน้อยรองลงมาเป็นอันดับที่ 2 จากการขนส่งทางน้ำ [1] โดยในหลาย ๆ ประเทศให้ความสนใจในการขนส่งทางรางเป็นอย่างมาก รวมไปถึงประเทศไทย การรถไฟแห่งประเทศไทย มีการพัฒนาระบบขนส่งทางราง ปรับปรุงระบบอาณัติสัญญาณ และดำเนินงานตามแผนและนโยบายภาครัฐอย่างตลอดเวลา เพื่อยกระดับบริการขนส่งทางรางภายในประเทศ

จากวารสารรถไฟสัมพันธ์ [2] กล่าวว่า “ระบบราง” ได้รับการยอมรับว่าเป็นระบบการขนส่งที่มีกำหนดเวลาการเดินทางได้แน่นอน ตรงเวลา รองรับผู้โดยสารได้ในปริมาณมาก ราคาย่อมเยา และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในหลาย ๆ ประเทศ อาทิจีน ญี่ปุ่น รวมถึงประเทศในแถบยุโรป ต่างสร้างมาตรฐานระบบรางเป็นของตัวเองและลงทุนในด้านทางรถไฟเป็นอย่างมากเนื่องจากเห็นข้อดีในส่วนที่กล่าวมา โดยแผนวิสาหกิจการรถไฟแห่งประเทศไทย มีวิสัยทัศน์คือประเทศไทยจะเป็นผู้ให้บริการระบบรางของรัฐที่ดีที่สุดในอาเซียนในปี 2570 โดยมุ่งเน้นการพัฒนาโครงข่ายรถไฟทางไกลจากทางเดี่ยวเป็นทางคู่เพื่อยกระดับการเดินทางและขนส่งสินค้าไทยให้มีประสิทธิภาพ โดยคาดว่าสัดส่วนการเดินทางระหว่างจังหวัดโดยรถยนต์ส่วนบุคคลจะลดลงภายหลังระบบได้รับการพัฒนา จากร้อยละ59 เป็นร้อยละ40 สัดส่วนปริมาณการขนส่งทางรางเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 1.4 เป็น ร้อยละ 10 ทั้งนี้ประเทศไทยยังได้ดำเนิน โครงการรถไฟอัตราเร็วสูง 4 สาย เพื่ออำนวยความสะดวกด้านการเดินทาง ลดการใช้พลังงาน ลดโลกร้อน ปลอดภัย ลดอุบัติเหตุจากการเดินทาง สนับสนุนเศรษฐกิจการค้าการลงทุนและการท่องเที่ยว กระจายความเจริญไปยังทุกภูมิภาคของประเทศและเชื่อมต่อการขนส่งทางรางกับประเทศเพื่อนบ้าน

เนื่องจากรถไฟไม่สามารถวิ่งในที่ลาดชันได้ อุโมงค์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในระบบขนส่งทางราง โดยความท้าทายในการพัฒนาระบบขนส่งทางรางนั้น อุโมงค์เป็นหนึ่งในความท้าทายสำคัญ การเพิ่มอัตราเร็วของรถไฟก่อให้เกิดปัญหาด้านอากาศพลศาสตร์ในอุโมงค์ สาเหตุมาจากความดันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างฉับพลัน ก่อให้เกิดปัญหาความไม่สบายต่อผู้โดยสารที่อยู่ในขบวนรถไฟขณะกำลังเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์และทำให้แรงต้านอากาศมีค่าสูงขึ้น นำไปสู่การใช้กำลังขับที่มากกว่าเส้นทางปกติ อุโมงค์มีอายุการใช้งานสั้นลง และค่าบำรุงรักษาที่เพิ่มขึ้น [1] ทำให้ต้องมีช่องระบายอากาศหรืออุโมงค์ทางเชื่อมเพื่อลดความดันภายในอุโมงค์ขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านและเพื่อกรณีเหตุฉุกเฉินที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาอากาศพลศาสตร์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่ในแบบจำลองที่ถูกลดความซับซ้อนลง โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โปรแกรมวิเคราะห์เชิงตัวเลข Ansys Fluent ในรูปแบบ 2 มิติ เพื่อศึกษาลักษณะหรือพฤติกรรมของความดันภายในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาอากาศพลศาสตร์ภายในอุโมงค์ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ขบวนเดียวและสองขบวนสวนกันในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความดันภายในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่ กรณีรถไฟขบวนเดียว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความดันภายในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่ กรณีรถไฟสองขบวนวิ่งสวนกันที่เวลาและอัตราเร็วเดียวกัน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วที่ส่งผลต่อความดันในอุโมงค์เดี่ยวรางคู่ ทั้งกรณีรถไฟขบวนเดียวและรถไฟสองขบวนสวนทางกัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent เพื่อทำการจำลองการไหลของความดันในเชิงตัวเลข
2. ลดความซับซ้อนของแบบจำลองลง ให้เป็นแบบจำลอง 2 มิติ ในการศึกษางานวิจัย
3. จำนวนกริดต้องมีปริมาณที่เหมาะสมต่อความแม่นยำที่ยอมรับได้
4. เวลาที่ใช้ในการคำนวณการทดลองอยู่ในช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อความแม่นยำที่ยอมรับได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา
2. ศึกษาเทคนิคในการหาผลการทดลองด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาวิธีการใช้ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องต่อการหาผลการทดลอง
4. ตรวจสอบความแม่นยำของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยเปรียบเทียบค่าจากงานวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือ
5. ทำการออกแบบแบบจำลองที่จะใช้ในการศึกษา
6. วิเคราะห์ผลเชิงตัวเลขจากซอฟต์แวร์ โดยเน้นแสดงผลข้อมูลในรูปแบบของกราฟและภาพคอนทัวร์
7. สรุปผลการศึกษาและให้ข้อเสนอแนะการต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีงานวิจัยและการศึกษามากมายที่เกี่ยวข้องกับ อากาศพลศาสตร์ของรถไฟภายในอุโมงค์ โดยส่วนใหญ่จะมีการศึกษา 3 แบบหลัก ๆ คือ 1.การทดลองในสภาพแวดล้อมจริง 2.การทดลองโดยใช้แบบจำลอง 3.การทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ในวิธีที่กล่าวมายังคงต้องมีการใช้สมการในการรองรับในการคำนวณ เพื่อรองรับผลของการวิจัย ในหลาย ๆ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์ของรถไฟภายในอุโมงค์ ส่วนใหญ่จะพยายามศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น แรงต้านอากาศ กระแสอากาศเบาบาง คลื่นความดันทั้งในอุโมงค์และในรถไฟ เป็นต้น โดยมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น เช่น ความยาวและรูปร่างของรถไฟ ความยาวและรูปร่างของอุโมงค์ เป็นต้น

2.2 สมการควบคุมพื้นฐานสำหรับการไหล (Governing Equation of Fluid Dynamic)

จากงานวิจัย [4] ,[6] จะเห็นว่าโดยปกติแล้วของของไหลจะมีการไหลที่ไม่คงที่หรือไม่คงตัวและจะเปลี่ยนตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยจะสมมติว่าคุณสมบัติต่างๆที่พิจารณาในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยใช้หลักการ Reynolds decomposition คือ 1. แบ่งออกเป็นส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยไม่ขึ้นกับเวลาเช่น $\bar{u}\,\bar{v}$ หรือ $\bar{p}$ กับ2. ส่วนที่แทนผลของ Fluctuation ที่ขึ้นกับเวลาเช่น v’u’หรือ p’จะได้สมการ ดังนี้

2.2.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (2.1)$$

สามารถอธิบายได้ คือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวล ต่อเวลา + อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวล ต่อทิศทางแนวตั้ง = 0

โดยที่ ρ, t, u_i คือ ความหนาแน่น เวลา และองค์ประกอบของอัตราเร็วในทิศทางแนวนอน และจากสมการนี้ ค่า ρ มีค่าไม่คงที่ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าของความดันและอุณหภูมิ

สมการความต่อเนื่องกล่าวว่า อัตราของมวลที่เข้าสู่ระบบทีค่าเท่ากับผลรวมของอัตรามวลที่ออกจากระบบ กับมวลที่สะสมอยู่ภายในระบบ จะเห็นได้ว่าพจน์แรกของสมการความต่อเนื่องหมายถึงอัตรามวลที่ออกจากระบบ และพจน์หลังหมายถึงการสะสมของมวลภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \rho u_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \qquad (2.2)$$

สามารถอธิบายได้ คือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม ต่อเวลา	+	อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม ต่อทิศทางแนวตั้ง	+	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความดัน ต่อทิศทางแนวตั้ง	-	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนบนระนาบ ต่อทิศทางแนวตั้ง	=	0

2.2.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \rho E)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial(u_i p)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\tau_{ij} u_j)}{\partial x_j} = 0 \qquad (2.3)$$

สามารถอธิบายได้ คือ

อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลัง ต่อเวลา	+	อัตราการไหลเข้าออกของพลังงานที่มาพร้อมกันมวล	-	อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนต่อทิศทางแนวนอน	+	อัตราการเปลี่ยนแปลงของงานที่เกิดจากความดัน	+	อัตราการเปลี่ยนแปลงของงานที่เกิดจากความเค้นเฉือน	=	0

โดยที่ τ_{ij} คือ ความเค้นเฉือน (shear stress) และ E คือ พลังงานรวม

2.3 คุณสมบัติของของไหล

จากการศึกษาพบว่า[7] คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลบางประการ เช่น ความดัน ความหนาแน่น อัตราเร็ว จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds' number)

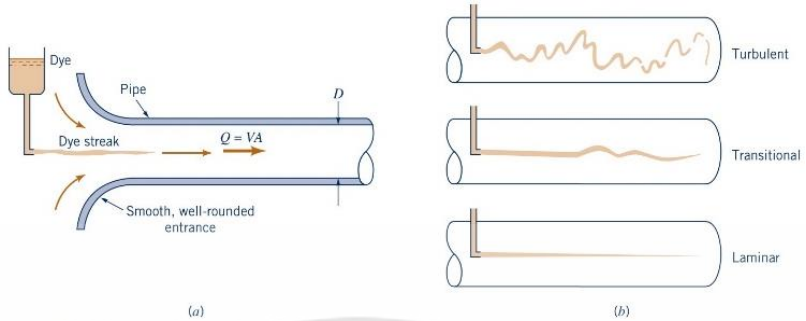
1. ความดัน เนื่องจากความดันมีความสัมพันธ์กับแรงต่อพื้นที่หน้าตัด เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจะทำให้ค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาอัตราเร็วของของไหลจากสมการแบร์นูลลี (Bernoulli's equation)

2. ความหนาแน่น ใช้คำนวณหาค่าความดันของของไหล ณ จุดใด ๆ

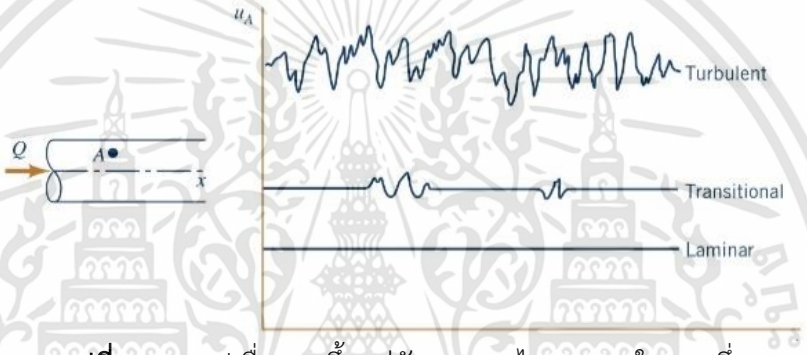
3. อัตราเร็ว เป็นตัวแปรที่กำหนดพฤติกรรมของของไหลว่าเป็นไปในลักษณะใด เช่น เมื่ออัตราเร็วเฉลี่ยของของไหลเป็นไปอย่างช้า ๆ จะเรียกสมการนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ส่วนการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) คือการที่อนุภาคไหลแบบไม่มีความเป็นระเบียบ อัตราเร็วของอนุภาคนั้น ๆ เพิ่มขึ้นต่างกันทั้งขนาดและทิศทาง ส่วนการไหลแบบเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Transitional Flow) จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเร็วจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วนจะมีการปั่นป่วนเป็นแนวเส้นเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 (a) การทดลองหาประเภทของการไหล (b) ประเภทของการไหลที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.2 กราฟเมื่อเวลาขึ้นอยู่กับของของไหล ณ จุดใดจุดหนึ่ง

4. จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds' number) เป็นเลขที่ใช้ชี้บอกปรากฏการณ์ไหลของการไหล โดยจำนวนเลขเรย์โนลด์จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วการไหล ความหนืด เส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดท่อ และ ความหนาแน่นของการไหล

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \qquad (2.4)$$

เมื่อ Re = จำนวนเลขเรย์โนลด์ (ไม่มีหน่วย)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

V = อัตราเร็วของการไหล (m/s)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในท่อ (m³)

μ = ความหนืดของของไหล (N·s /m²)

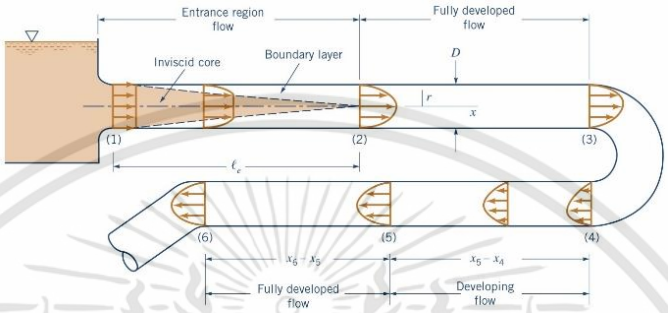
ซึ่งปรากฏการไหลของไหล จะเป็นดังนี้ Re < 2100 เป็น Laminar flow

2100 < Re < 4000 เป็น Transitional flow

Re > 4000 เป็น Turbulent flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อของไหล ไหลเข้าท่อดังรูปที่2.1 จะมีการกระจายตัวของอัตราเร็วค่อนข้างสม่ำเสมอ (uniform profile) จากนั้นผลของความหนืดจะทำให้เกิดชั้นขอบเขต (boundary layers) โดยความหนาของชั้นขอบเขตจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงตำแหน่งซึ่งความหนาของชั้นขอบเขตมีขนาดเต็มหน้าตัดท่อ เรียกระยะทางที่ของไหลไหลเข้าว่าเป็นช่วง Entrance length , Leหลังจากช่วงนี้การไหลจะเปลี่ยนเป็นแบบการไหลแบบพัฒนาเต็มรูป หรือ Fully developed ซึ่งการไหลในช่วงนี้อัตราเร็วจะไม่เป็นเปลี่ยนแปลงกับระยะทางตามแนวการไหล (x)



รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลในท่อแบบ Fully developed region

5. กฎของปัวซอยย์ (Poiseuille's law) มีสมมติฐานของสมการที่เป็นของเหลว ที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) ดังสมการที่ 2.5 ซึ่งมีของไหลไหลผ่านท่อที่มีหน้าตัดวงกลมคงที่ซึ่งยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างมาก และไม่มีความเร่งของของเหลวในท่อ สำหรับอัตราเร็วของของไหลและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีค่าเกินกว่าระดับ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu l} \qquad (2.5)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลของปริมาตร (m^3/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

Δp คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างปลายทั้งสอง (Pa)

μ คือ ความหนืดของของไหล ($N \cdot s/m^2$)

L คือ ความยาวของท่อ (m)

2.4 สมการเฉลี่ยของเรย์โนลนาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Average Navier stokes equations)

ในการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) คุณสมบัติต่าง ๆ ของกระแสอากาศมีการผันผวนตามเวลาและตำแหน่ง และวิธีการทางสถิติสามารถอธิบายการไหลได้ ซึ่งตัวแปรของของไหล เป็นสมการเริ่มต้นที่ใช้พิจารณาถึงสภาวะของของไหลที่เคลื่อนที่ที่เวลาเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = \bar{u} + u' \tag{2.6}$$

$$p = \bar{p} + p' \tag{2.7}$$

$$T = \bar{T} + T' \tag{2.8}$$

เมื่อ u p T คือ อัตราเร็ว ความหนาแน่น และอุณหภูมิตามลำดับ

$$\rho \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \tag{2.9}$$

และ $$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{T u_i}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{v}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \left(\overline{T u_j} - \bar{T} \overline{u_j} \right) \right] \tag{2.10}$$

สำหรับสมการต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ตามลำดับ เทอมสุดท้ายของสมการโมเมนตัม $\rho \overline{u_i' u_j'}$ คือความเครียดของสมการ Reynolds ซึ่งไม่ค่อยเป็นที่รู้จักมากนักจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมา

แบบจำลองที่ใช้ในการประมาณความเครียดของ Reynolds ในงานนี้คือแบบจำลองจากงานวิจัยของ Shear Stress Transport k-w (SST kw) [Wilcox,1994]

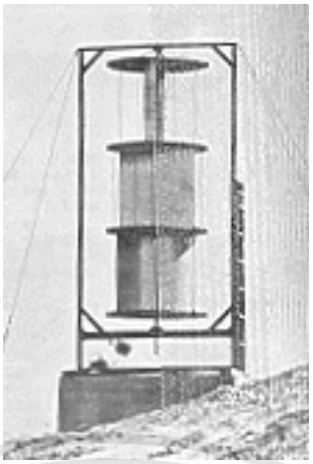
2.5 สมการแรงต้านอากาศ

จากการศึกษา [3] พบว่า แรงต้านอากาศ (Drag force) เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านของไหลต่างๆ เช่น น้ำ หรืออากาศ แรงต้านอากาศจะทำงานในทิศทางที่ตรงข้ามกับอัตราเร็วของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถหาแรงต้านอากาศได้จากสมการ

$$F_D = 0.5 \rho v^2 C_D A \tag{2.11}$$

โดยที่ C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (N/m²) และ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีผลจากรูปร่างของวัตถุ ตัวอย่างเช่น ทรงกลมกลวงผ่าครึ่งของเครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย ถ้าหันด้านเว้าให้ลมค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ 1.42 แต่ถ้าหันด้านโค้งให้ลมค่าจะลดลงเหลือ 0.38 รถยนต์สมัยใหม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศอยู่ระหว่าง 0.27 - 0.45 เครื่องบินหรือใบพัดกังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศน้อยมากประมาณ 0.04 ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากแรงต้านอากาศ เช่น เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย กังหันลมแบบซาโวเนียส (Savonious) โดยแรงลมจะผลักใบพัดของกังหันลมทำให้เกิดแรงต้านอากาศขึ้นกับใบกังหันลมทั้งสองด้านที่แตกต่างกัน ทำให้โรเตอร์ของกังหันลมหมุน ดังรูปที่ 2.4

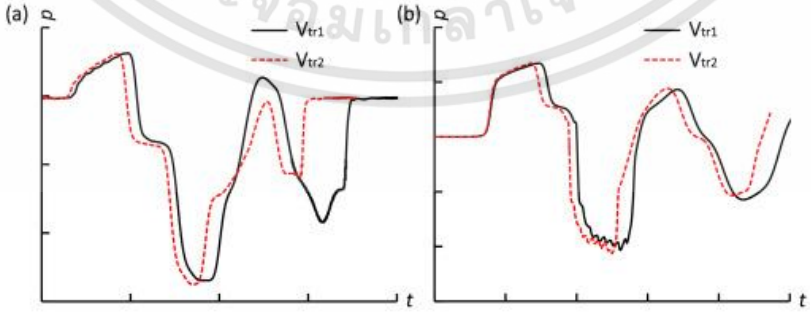
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การหมุนเกิดจากความแตกต่างระหว่างแรงต้านอากาศที่เกิดบนพื้นเว้าและผิวโค้งของโรเตอร์
(ที่มา www.dede.go.th)

2.6 อัตราเร็วของรถไฟ (Train Speed)

จากงานวิจัยพบว่า [6] อัตราเร็วของรถไฟเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะของคลื่นความดันในอุโมงค์และยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้กำหนดลักษณะของคลื่นความดัน ตามรูปที่ 2.5 ที่แสดงคลื่นความดันที่เกิดขึ้นเมื่อรถไฟขบวนเดียวผ่านอุโมงค์ที่อัตราเร็วแตกต่างกัน (a) และรถไฟสองขบวนผ่านอุโมงค์ที่อัตราเร็วที่แตกต่างกัน (b) บ่งบอกได้ว่าเมื่อรถไฟอัตราเร็วสูงผ่านอุโมงค์เดียวกันที่อัตราเร็วที่แตกต่างกัน คลื่นความดันที่วัดได้จากตำแหน่งเดียวกันของรถไฟและอุโมงค์เกือบจะเหมือนกันกับรถไฟรางเดี่ยว และจะเกิดความแตกต่างกันค่อนข้างมากสำหรับรถไฟสองขบวนนี้ นอกจากนี้อัตราเร็วของรถไฟที่ลดลงส่งผลให้เวลาวิ่งของรถไฟในอุโมงค์นานขึ้น และทำให้เกิดคลื่นแรงดันที่มากขึ้นด้วย ในกรณีที่รถไฟรถไฟทางเดียวเมื่อวัดคลื่นความดันจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่ในกรณีที่รถไฟสองขบวนสวนทางกันเมื่อวัดคลื่นความดันจะพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก นอกจากนี้เมื่ออัตราเร็วของรถไฟลดลงส่งผลให้เวลาวิ่งในอุโมงค์นานขึ้น และทำให้เกิดคลื่นแรงดันที่มากขึ้นด้วย



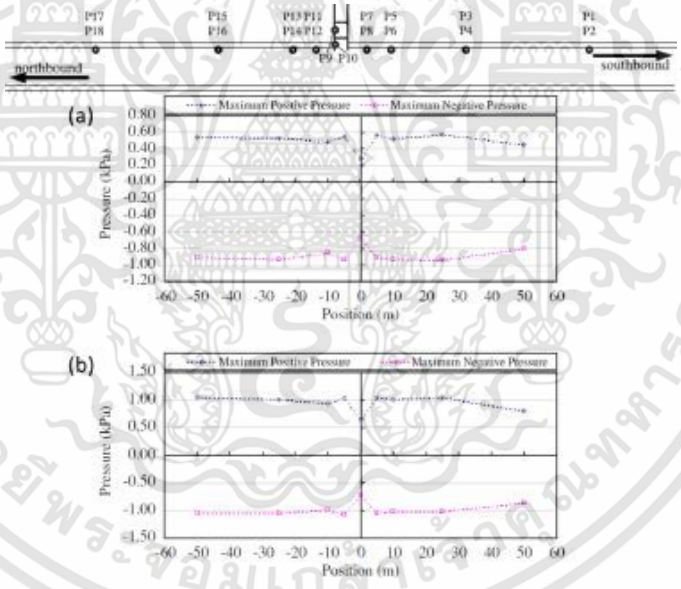
รูปที่ 2.5 รูปคลื่นแรงดันสองรูปที่เกิดจากรถไฟวิ่งผ่านอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วต่างกันและอุโมงค์มีความยาว 1031 m [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่ากราฟความดันที่อัตราเร็ว V_{tr1} และ V_{tr2} มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ V_{tr2} มีแนวโน้มของกราฟนำหน้าเส้นกราฟ V_{tr1} เนื่องจากมีอัตราเร็วที่มากกว่าจึงทำให้ใช้เวลาในการผ่านอุโมงค์น้อยกว่า

2.7 ช่องระบายอากาศ (Ventilation shaft)

เพลาลมเป็นช่องเปิดบนพื้นผิวของอุโมงค์เพื่อใช้ความเข้มของแรงดัน และขนาด จำนวนและตำแหน่งของเพลาลมมีผลกระทบต่อคลื่นแรงดัน เมื่อเพลาลมอยู่ใกล้กับไมโครโฟนมากขึ้น ความเข้มของแรงดันจะลดลงมากขึ้น และการเพิ่มพื้นที่รูรับแสงจะทำให้แรงดันลดลงสูงขึ้น (ประมาณ 50%) จากการศึกษาข้อมูล [6] มีข้อมูลที่แนะนำว่าควรเลือกใช้รูปแบบที่ประกอบด้วยอุโมงค์คู่ที่เชื่อมต่อด้วยท่อระบายแรงดันใกล้กับสถานีและทำงานภายใต้สุญญากาศบางส่วน เพื่อบรรเทาผลกระทบจากคลื่นอากาศพลศาสตร์ของรถไฟอัตราเร็วสูงในอุโมงค์ที่ยาวมาก ดังรูปที่ 2.6 ผลการศึกษาพบว่า ความดันที่เป็นบวกและความดันที่เป็นลบสูงสุดแทบจะคงที่ตามความยาวของอุโมงค์ แต่ความดันที่วัดได้ในช่องฉุกเฉินมีค่าน้อยมาก เพราะช่องฉุกเฉินมีพื้นที่ที่ทำให้อากาศได้ระบายความดัน [6]



รูปที่ 2.6 การกระจายความดันสูงสุดรอบอุโมงค์ (a) สำหรับรถไฟสายใต้ 235 km/h และ (b) สำหรับรถไฟสายเหนือ 303 km/h [6]

2.8 ปรากฏการณ์ลูกสูบ (Piston effect)

เมื่อรถไฟเข้ามายังอุโมงค์ อากาศในอุโมงค์จะถูกบีบอัดด้วยรถไฟ จะมีพื้นที่ความดันลบเกิดขึ้นที่บริเวณหลังรถไฟและตัวรถไฟจะดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในอุโมงค์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ, ปรากฏการณ์ลูกสูบ (Piston effect) การศึกษาผล

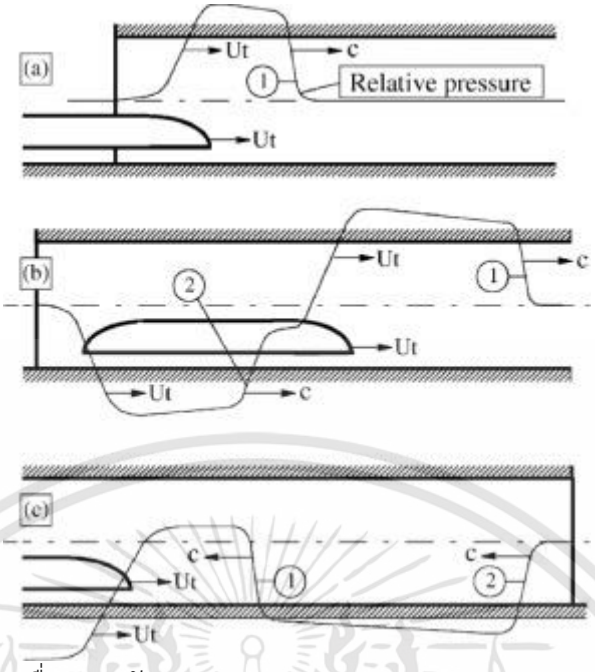
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลูกสูบส่วนใหญ่แล้วจะมุ่งเน้นไปที่ระบบรถไฟใต้ดิน ซึ่งรวมถึงระบบระบายอากาศ, สภาพแวดล้อมทางความร้อน, การไหลเวียนของอากาศ, สภาพแวดล้อมของแพลตฟอร์ม ประตูป้องกัน การไหลของควันในกองไฟ จากการศึกษา [6] พบว่าผลของความยาวรถไฟ อัตราเร็ว ความยาวอุโมงค์เป็นอิทธิพลของการเกิดปรากฏการณ์นี้อย่างชัดเจน ซึ่งการลดความยาวของอุโมงค์จะช่วยลดอัตราในการเกิดปรากฏการณ์นี้ และรากฏการณ์ลูกสูบจะร้ายแรงขึ้น เมื่อความยาวของรถไฟและอัตราเร็วรถไฟมีค่ามากขึ้น โดยทั่วไปแล้วช่องระบายอากาศมีประสิทธิภาพในการควบคุมผลลูกสูบและเมื่อปรับตำแหน่งของช่องระบายอากาศให้เหมาะสมปรากฏการณ์ลูกสูบ (Piston effect) ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน

เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ก่อให้เกิดคลื่นความดัน 2 ชนิดเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วที่ใกล้กับอัตราเร็วเกือบเทียบเท่าอัตราเร็วเสียง และเมื่อเกิดการสะท้อนที่ทางออกของอุโมงค์ส่วนหนึ่งของพลังงานแพร่กระจายออกนอกอุโมงค์ในรูปของคลื่นแรงดัน การแพร่กระจาย และการซ้อนทับของคลื่นความดันบวก และคลื่นความดันลบก่อให้เกิดระบบของคลื่นที่ซับซ้อน และคลื่นความดันเหล่านี้ก่อให้เกิดแรงดันชั่วขณะส่งผลให้เกิดแรงที่ผันผวนบนตัวรถไฟ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างของตัวรถ โดยการแพร่กระจายของคลื่นความดันสู่ตัวรถทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบายทางหู ดังนั้นการศึกษาความดันชั่วขณะในอุโมงค์เพื่อที่จะออกแบบตัวแปรที่สัมพันธ์กับอุโมงค์รถไฟเพื่อสร้างความปลอดภัยในการเดินรถ ความสะดวกสบายของผู้โดยสาร อัตราเร็วที่มากขึ้นของรถไฟ และการออกแบบอุโมงค์ที่ดีขึ้น

จากรูปที่ 2.7 คลื่นความดันถูกสร้างโดยการเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ และการสะท้อนเกิดขึ้นที่ทางออกของอุโมงค์ c และ U_t คืออัตราเร็วเสียง และอัตราเร็วของรถไฟ ตามลำดับ (a) คลื่นความดันบวก (Compression wave) หมายเลข ① ถูกสร้างขึ้นโดยการเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ของรถไฟ และคลื่นความดันนี้แพร่กระจายในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วเกือบเทียบเท่าอัตราเร็วเสียง c (b) คลื่นความดันลบ (Expansion wave) หมายเลข ② เกิดจากการที่ท้ายของรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ และคลื่นความดันนี้แพร่กระจายในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วเกือบเทียบเท่าอัตราเร็วเสียง c (c) คลื่นความดันสะท้อนกลับ (Reflection wave) ของคลื่นความดันหมายเลข ① และ ② ที่สะท้อนมาจากปากทางของอุโมงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นคลื่นความดันบวก (Compression wave) หมายเลข ① คลื่นความดันลบ (Expansion wave) หมายเลข ② และคลื่นความดันสะท้อนกลับ (Reflection wave) ของคลื่นความดันหมายเลข ① และ ② [6]

2.9 อากาศพลศาสตร์และการระบายอากาศในอุโมงค์รถไฟ (Aerodynamics and ventilation in rail tunnels)

เพื่อการขนส่งผู้โดยสารให้ปลอดภัย รวดเร็ว และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีการใช้อุโมงค์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย จึงต้องมีแผนการสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสม และเมื่ออัตราเร็วของรถไฟเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้เกิดผลกระทบของอากาศพลศาสตร์ภายในอุโมงค์

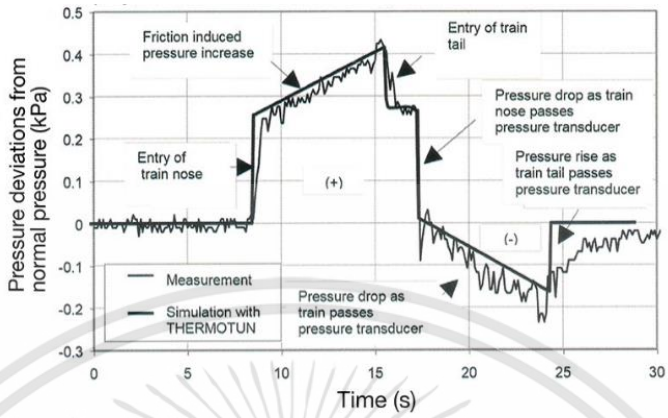
การออกแบบให้ถูกหลักอากาศพลศาสตร์และการระบายอากาศอย่างเหมาะสมเกี่ยวข้องกับวิศวกรรมหลายแขนง เช่น การออกแบบโยธา อุปกรณ์ทางเทคนิค และเทคโนโลยีรถไฟ โครงการอุโมงค์อากาศพลศาสตร์ ภูมิอากาศ และการระบายอากาศมีความสำคัญในโครงการที่มีลักษณะ ดังนี้

- อุโมงค์รถไฟอัตราเร็วสูง
- อุโมงค์ยาวมาก
- อุโมงค์สูงชัน
- อุโมงค์ลึกที่มีประสิทธิภาพสูงใต้ดินหรือระบบรถไฟใต้ดิน
- ชั้นดินข้างบนส่งผลให้มีความร้อนสูงจากพื้นดิน
- อุโมงค์ที่สัมผัสกับสภาพอากาศที่รุนแรง (อุณหภูมิภายนอก)

ความดันตกเกิดขึ้นเมื่อหัวรถไฟถึงจุดจุดหนึ่งในอุโมงค์ เมื่อรถไฟผ่านจุดนี้ความดันลดลงต่อไปเรื่อยๆ เนื่องจากแรงเสียดทานตามยาวบนพื้นผิวของรถไฟความดันข้างหลังรถไฟเพิ่มขึ้นอีกเป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบระหว่างการวัดความดันที่จุดหนึ่งในอุโมงค์และผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม THERMOTUN [8] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบของความดันที่ถูกวัดและคำนวณโดย termodun ใน Grauholz [8] อุโมงค์ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (อัตราเร็วของรถไฟ 200 km/h พื้นที่หน้าตัด 70 m²)

จากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของความดันที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์เนื่องจากการเคลื่อนที่ของรถไฟ จะเห็นว่าเมื่อจมูกรถไฟเริ่มเคลื่อนที่เข้ามาในอุโมงค์นั้น ความดันบวกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างฉับพลันเนื่องจากเกิดการอัดตัวอย่างรุนแรงของอากาศด้านหน้าของรถไฟ จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากผลของความเสียดทานอากาศ และเมื่อท้ายรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ ความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วด้วยผลของปรากฏการณ์ลูกสูบซึ่งถูกแสดงในหัวข้อที่ 2.8 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีความดันเป็นลบเมื่อส่วนขบวนเคลื่อนที่ผ่านจุดเก็บผล และสุดท้ายเมื่อท้ายของรถไฟเคลื่อนที่ผ่านจุดเก็บผล ค่าของความดันก็จะเพิ่มขึ้นแล้วกลับมามีค่าเป็นความดันบรรยากาศดังเดิม

2.10 เทคนิคในการหาผลการทดลอง (Experimental and computational techniques)

การทดลองในลักษณะที่เกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์ของวัตถุที่เคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่จำกัดนั้นได้มีงานวิจัยอยู่แล้วส่วนหนึ่ง ซึ่งจะเป็นการวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์เคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ลอดสะพาน หรือการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถไฟเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์รถไฟ ซึ่งสามารถแบ่งเทคนิคในการทำการทดลองได้ออกเป็น 3 แบบ ประกอบด้วย การทดลองในสภาพแวดล้อมจริง การทดลองโดยการสร้างโมเดลจำลอง และการวิเคราะห์ด้วยใช้โปรแกรมคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 การทดลองในสภาพแวดล้อมจริง (Full-scale measurement)

เทคนิคการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงจะมุ่งเน้นเกี่ยวกับเรื่องของความแม่นยำของข้อมูลที่ได้รับ ซึ่งเป็นเทคนิคการทดลองที่เชื่อถือได้ค่อนข้างสูง โดยเทคนิคการทดลองแบบนี้จะมีวิธีการเก็บค่าข้อมูลที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น การฉุดลากทางอากาศพลศาสตร์ของรถไฟ (Aerodynamics drag of train) อัตราเร็วของกระแสอากาศเบาบาง (Slipstream velocities) และความดันในสภาวะที่ไม่คงที่ (Pressure transients) ด้วยการใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลทราโซนิก

งานวิจัยของ Baker et al., (2013a) [9] จะนำเครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลทราโซนิกไปติดตั้งที่อุโมงค์รถไฟจริง โดยจะติดตั้งไว้บนจุดติดตั้งที่ต่างกันหลาย ๆ จุด เพื่อเก็บค่าข้อมูลอัตราเร็วลม ซึ่งจะได้ค่าของอัตราเร็วลมมาในรูปแบบของอัตราเร็วของกระแสอากาศเบาบางเฉลี่ยแบบไร้มิติ

ในทางตรงกันข้ามนอกจากข้อดีของการทดลองในสภาพแวดล้อมจริงจะได้รับค่าข้อมูลที่มีความแม่นยำสูง แต่ข้อเสียของการทดลองแบบนี้คือ มีค่าใช้จ่ายสูงในเรื่องของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการเก็บค่าข้อมูล มีความยากในการเก็บข้อมูล และการทดลองต้องจัดทำอยู่ที่สถานที่จริง

2.10.2 การทดลองโดยการสร้างแบบจำลอง (Physical modelling)

เทคนิคการทดลองโดยการสร้างแบบจำลองจะมุ่งเน้นเกี่ยวกับเรื่องของความสะดวกในการทำการทดลอง และสามารถเพิ่มความหลากหลายของการทดลองได้ แต่ข้อมูลที่ได้รับอาจจะมีความคลาดเคลื่อนจากสภาวะจริงอยู่ส่วนหนึ่งทำให้ต้องมีการกำหนดค่าตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor) ของการทดลองแบบนี้ไว้ค่าหนึ่ง โดยการทดลองจะทำโดยการสร้างแบบจำลองจริงขึ้นมาโดยย่อขนาดด้วยอัตราส่วนค่าหนึ่ง

จากงานวิจัย Pengpeng Xie และคณะ [10] ได้ใช้เทคนิคการทดลองแบบการสร้างแบบจำลอง (Physical modelling) โดยในการทดลองกำหนดให้แบบจำลองถูกย่อขนาดจากสถานที่จริงลงด้วยอัตราส่วน 1:20 โดยให้รถไฟมีอัตราเร็วอยู่ที่ 250 , 300 และ 350 km/h ตามลำดับ

ข้อดีของการทดลองโดยการสร้างแบบจำลองนอกจากจะสามารถใช้ได้จริงแล้ว ยังช่วยประหยัดเรื่องค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองอีกด้วย แต่ก็ยังมีข้อเสียที่ตามมาคือระยะเวลาในการก่อสร้างแบบจำลองนั้นใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก อาจทำให้เกิดความล่าช้าของการทดลองได้

2.10.3 การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ (Numerical simulations)

ซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้คือ Ansys Engineering Simulation Software ซึ่งประกอบด้วย เทคนิคการไถลของขอบเขต (sliding boundary technique) และเทคนิคการเคลื่อนที่ของกริด (moving mesh technique)

2.10.3.1 เทคนิคการไถลของขอบเขต (sliding boundary technique)

เทคนิคการไถลของขอบเขตนั้นมีหลักการโดยจะเป็นการสร้างขอบเขตขึ้นมาในพื้นที่ที่ต้องการจะวิเคราะห์ ซึ่งขอบเขตทั้งหมดนั้นประกอบด้วย ขอบเขตนิ่ง (stationary

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

domain) และขอบเขตเคลื่อนที่ (moving domain) โดยที่ขอบเขตทั้งสองจะโอนถ่ายข้อมูลกันผ่านทาง ขอบไถลร่วม (sliding interface) ซึ่งความแม่นยำของข้อมูลที่ถูกถ่ายโอนไปนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของกริดที่อยู่บนทั้งสองขอบเขต

จากงานวิจัย[5] พบว่าเทคนิคการดำเนินการแบบนี้ช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้จำนวนกริดน้อย และไม่จำเป็นต้องทำให้กริดมีคุณภาพที่ดีมาก แต่พบว่าต้องใช้ความชำนาญสูงในการดำเนินการจึงเหมาะกับงานวิจัยที่เจาะลึกเรื่องการใช้เทคนิคแบบนี้มากกว่า

2.10.3.2 เทคนิคการเคลื่อนที่ของกริด (moving mesh technique)

เทคนิคการเคลื่อนที่ของกริดนั้นมีหลักการด้วยการจำลองวัตถุให้เปรียบเสมือนเป็นผนังเลื่อน (moving wall) และให้กริดเปรียบเสมือนเป็นของไหลภายในพื้นที่ที่กำหนด โดยที่เมื่อผนังเลื่อนเคลื่อนที่ไปในทิศทางหนึ่ง ด้วยอัตราเร็วหนึ่ง จะเกิดการสร้างกริดใหม่ (remeshing) ในทุก ๆ ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงของกริดให้เหมาะสมต่อสถานการณ์ในเวลานั้น

เนื่องจากเหตุผลของการเปรียบของไหลให้เป็นกริดทำให้ความแม่นยำของข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของกริด ส่วนความละเอียดของข้อมูลนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นหรือความละเอียดของกริด ดังนั้นจากองค์ประกอบสองข้อนี้ทำให้เกิดข้อเสียขึ้นนั่นคือ การคำนวณจะใช้ระยะเวลานาน และถ้าหากต้องการจะลดระยะเวลาในการคำนวณก็จะทำให้ความแม่นยำของข้อมูลลดลงตามไปด้วย

เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมกับการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้มากที่สุดเนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์ข้างต้นที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านั้นมีข้อเสียหลายอย่างคือค่าใช้จ่ายในเรื่องของอุปกรณ์ต่าง ๆ และระยะเวลาในการก่อสร้าง วิธีการที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาข้างต้นนั้นก็คือการใช้การวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์คณิตศาสตร์นอกจากจะช่วยลดระยะเวลาในการทดลองแล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อีกด้วย

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 ความเสี่ยงของบาดเจ็บเกี่ยวกับหูของผู้โดยสารและคนขับ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วสูง :การจำลองเชิงตัวเลขและการวิจัยเชิงทดลอง (Risk of Ear Complaints of Passengers and Drivers While Trains Are Passing Through Tunnels at High Speed: A Numerical Simulation and Experimental Study)

งานวิจัยนี้ [10] ศึกษาเกี่ยวกับการหาความดันของรถไฟอัตราเร็วสูงต่อหูของคนรวมถึงผลกระทบของอัตราเร็วในการทำงาน และดัชนีการผนึก (seal index) ซึ่งเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความสามารถในการป้องกันไม่ให้อนุภาคของอากาศรั่วไหลผ่านรู ขอบ ช่อง หรือร่องต่าง ๆ ได้ เพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ความดันของรถไฟที่วิ่งในอุโมงค์แล้วบันทึกข้อมูล โดยในแต่ละช่วงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ logistic regression analysis method ซึ่งการทดสอบด้วยแบบจำลอง finite element ที่หูชั้นกลางของมนุษย์ถูกใช้เพื่อจำลองเพื่อศึกษา ผลวิจัย [10] พบว่าอัตราเร็วที่ 250 km/h ถึง 350 km/h ในอุโมงค์ จะทำให้การไม่สบายหูเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ขณะที่เพิ่มค่าดัชนีการผนึกจาก 4 s ไปยัง 12 s จะช่วยลดอาการเริ่มต้นของการหูอื้อ การสูญเสียการได้ยินมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ระยะเวลาของความสบายในการได้ยิน จากหัวรถไฟไปยังท้ายขบวนรถไฟ แนะนำให้เพิ่มดัชนีการผนึก เพื่อช่วยปรับปรุงความรู้สึกทางเสียงของผู้โดยสาร และคนขับโดยพิจารณาจากอัตราเร็วของรถไฟอัตราเร็วสูง ซึ่งดัชนีการผนึกสามารถได้จากสมการดังนี้

$$\omega = \frac{P_{out} - P_{in}}{dP_{in}/dt} \tag{2.12}$$

โดยที่ ω คือ ดัชนีการผนึกแบบพลวัต (s)

P_{out} คือ ความดันภายในอุโมงค์ (Pa)

P_{in} คือ ความดันภายในห้องโดยสาร (Pa)

$\frac{dP_{in}}{dt}$ คือ ความดันภายในห้องโดยสารที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Pa/s)

Table 4. The pressure differences in different cabins (Unit: Pa).

Measurement Point	Operation Speed								
	250 km/h			300 km/h			350 km/h		
	Seal Index								
	S-4	S-8	S-12	S-4	S-8	S-12	S-4	S-8	S-12
MP-1	572	318	220	662	375	261	837	453	314
MP-2	779	473	339	955	569	404	1168	684	481
MP-3	856	531	383	1092	667	480	1290	777	555
MP-4	894	561	406	1201	742	536	1396	868	626
MP-5	888	556	404	1201	745	538	1401	875	634

รูปที่ 2.9 แสดงถึงความดันแตกต่างกันแต่ละอัตราเร็วในห้องโดยสาร

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงความแตกต่างของความดันเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับทิศทางของการเคลื่อนที่ของรถไฟ อัตราเร็ว และดัชนีการผนึก จะพบว่า ณ ตำแหน่งที่ MP-1 ที่ดัชนีการผนึก S-4 อัตราเร็วที่กำหนด 250, 300 และ 350 km/h ค่าความดันจะแปรผันตามอัตราเร็ว เมื่ออัตราเร็วเพิ่มมากขึ้น ความดันก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะเดียวกันที่อัตราเร็วเท่ากัน และจุดวัดความดันเดียวกัน เมื่อดัชนีการผนึกมีค่ามากขึ้น ความดันภายในห้องโดยสารยิ่งมีค่าน้อยลง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้ามาในห้องโดยสาร

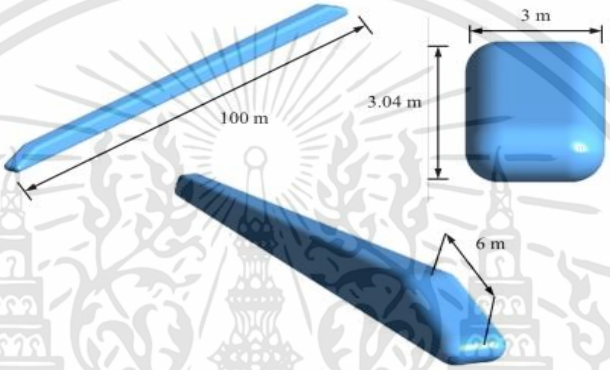
2.11.2 อากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ (Aerodynamic of the Trains in Tunnels)

เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาอากาศพลศาสตร์ [6] ที่มีรถไฟอัตราเร็วสูงที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 250 km/h เข้าไปภายในอุโมงค์ โดยที่จะเน้นในเรื่องการวิเคราะห์ความดันที่เกิดจากการ

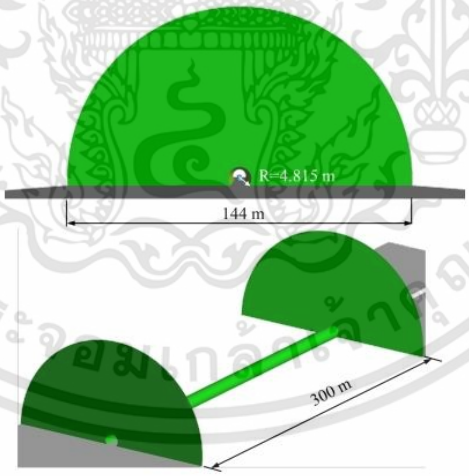
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงของรถไฟ ทำให้เกิดความปั่นป่วนของของไหลภายใน และมีความดันที่เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

เทคนิคของการทดลองที่งานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้คือ Ansys Engineering Simulation Software (Fluent) ซึ่งเทคนิคในการใช้ซอฟต์แวร์ที่งานวิจัยนี้เลือกใช้เป็นเทคนิคการไถลของขอบเขต ซึ่งจะถูกพูดถึงในหัวข้อ 2.10.3.1 โดยที่เลือกใช้ขนาดและรูปร่างของรถไฟอัตราเร็วสูงแบบทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.10 และเลือกใช้ขนาดและความยาวของอุโมงค์ และในรูปที่ 2.11 แสดงขนาดของสิ่งแวดล้อมก่อนที่รถไฟอัตราเร็วสูงจะเคลื่อนที่เข้าไปในอุโมงค์



รูปที่ 2.10 แสดงขนาดและรูปร่างของรถไฟของงานวิจัยอากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ [5]



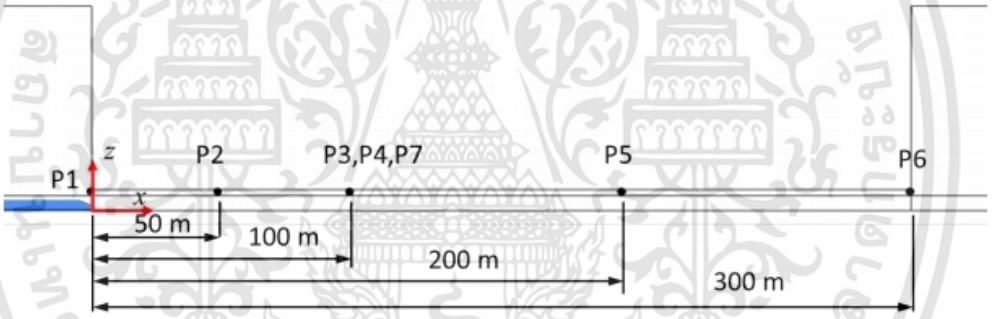
รูปที่ 2.11 แสดงขนาดและความยาวของอุโมงค์และสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยอากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ [6]

เงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions) ของการจำลองมีความดันเป็นศูนย์ และอัตราเร็วเป็นศูนย์ในทั้งสองขอบเขต เงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมในทุกกรณีกำหนดให้มีอุณหภูมิ 15°c และความดันอากาศเป็น 101 Pa อัตราเร็วทางเข้าของรถไฟ (V_t) กำหนดให้เป็น 70 m/s

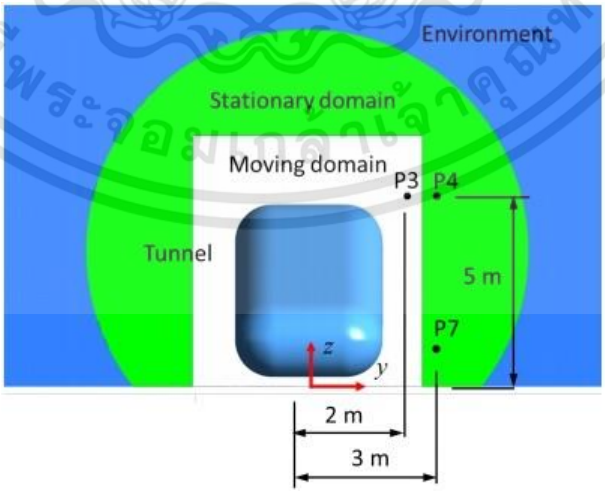
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตอนเริ่มต้นของการจำลอง จมูกรถไฟถูกกำหนดตำแหน่ง 100 m จากจุดเริ่มต้นของสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพื้นที่เพียงพอที่จะเกิดการไหลของของไหลแบบปั่นป่วนก่อนที่ขบวนรถไฟจะถึงช่วงของอุโมงค์โดยไม่มีเงื่อนไขของ Slip boundary ที่ถูกใช้บนพื้นผิวของรถไฟ ช่วงของอุโมงค์ และพื้นดินของขอบเขตย่อยแบบนิ่ง ผนังของขอบเขตย่อยแบบเคลื่อนที่ถูกใช้บนพื้นของขอบเขตย่อยแบบเคลื่อนที่ และเงื่อนไขของขอบเขตแบบถ่ายเทความร้อนถูกใช้ที่ด้านบน ด้านข้าง และด้านท้ายของสิ่งแวดล้อม และผนังของอุโมงค์ทั้งหมดนั้นถูกกำหนดให้เป็นผนังแบบ adiabatic

โดยที่ตอนสุดท้ายของการจำลองหลังจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเสร็จแล้วนั้น ในการคำนวณจะต้องกำหนดระยะเวลาในแต่ละช่วงที่ใช้ในการคำนวณซึ่งเรียกว่า time step size ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ time step size เป็น 0.0015 s และกำหนดตำแหน่งตามแนวแกน x ที่จะวิเคราะห์ความดันทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.12 และที่จุด P3, P4 และ P7 ในรูปที่ 2.13 เป็นตำแหน่งตามแนวแกน y เพื่อใช้ในการพิสูจน์ความเท่ากันของความดันในแต่ละจุดบนพื้นที่หน้าตัดบนระนาบ yz ซึ่งได้ค่าความดันที่กระจายอยู่อย่างเท่ากันดังรูปที่ 2.14 แสดงว่าความดันบนระนาบ yz เดียวกันจะมีความดันเท่ากันที่ทุกตำแหน่งตามแนวแกน x

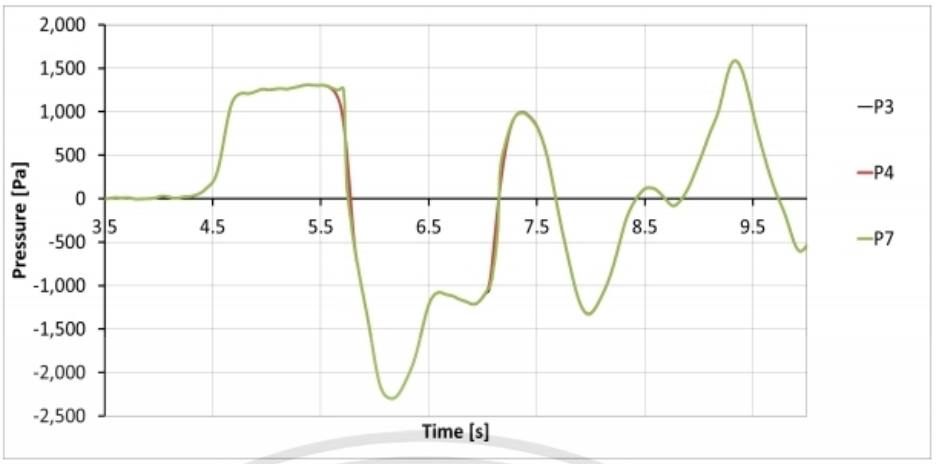


รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งของจุดที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ [6]



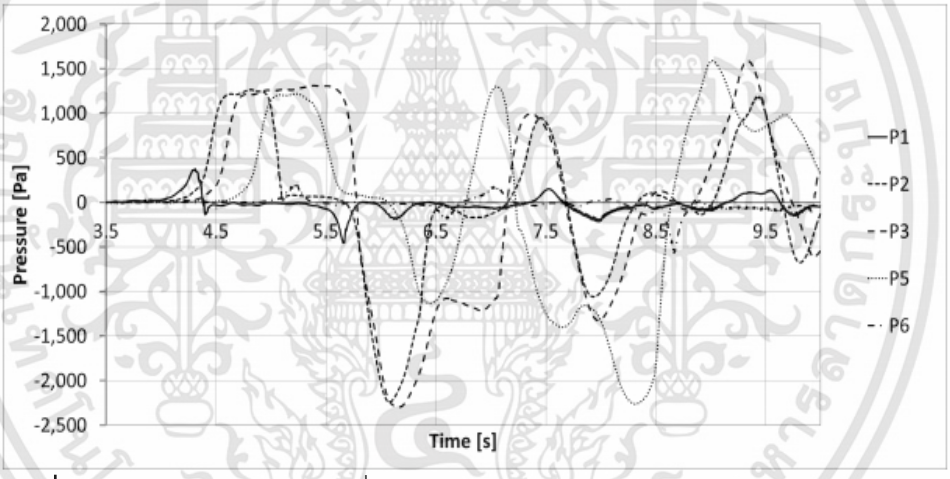
รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของจุด P3, P4 และ P7 บนระนาบ yz [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงกราฟความดันที่ตำแหน่ง P3, P4 และ P7 ในเวลาต่าง ๆ [6]

จากการจำลองและวิเคราะห์ผลทำให้ได้กราฟความดันที่ตำแหน่ง P1, P2, P3, P5 และ P6 ในเวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความดันที่ตำแหน่ง P1, P2, P3, P5 และ P6 ในเวลาต่าง ๆ [6]

จากกราฟดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน ณ ตำแหน่ง P1, P2, P3, P5 และ P6 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความดันที่คล้ายคลึงกัน เพียงแต่ต่างกันที่ขนาดของความดัน นั่นคือความแตกต่างของขนาดความดันภายในอุโมงค์เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของตำแหน่งของรถไฟ เช่น การเข้ามาของจมูกและท้ายรถไฟ ยกตัวอย่างที่ตำแหน่ง P2 ที่เป็นตำแหน่งที่เกิดความดันสูงสุดและต่ำสุด ก่อนที่จมูกรถไฟจะเคลื่อนที่ถึงตำแหน่ง P2 เกิดการเพิ่มขึ้นของความดัน เมื่อจมูกรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ที่วินาทีที่ 4.2 ทำให้เกิดการลดลงของความดัน เนื่องจากอัตราเร็วของของไหลจากที่เคยเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับรถไฟเมื่อท้ายขบวนเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่วิเคราะห์จะทำให้อัตราเร็วของของไหลเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเกิดเป็นความดันลบ ตามมาด้วยการลดลงของความดันเล็กน้อยที่วินาทีที่ 4.9 เนื่องจากท้ายขบวนรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ จากนั้นเมื่อท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่ง P2 ที่วินาทีที่ 5.7 ทำให้เกิดการลดลงของความดันอย่างฉับพลัน เช่นเดียวกับวินาทีที่ 4.2 จากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้นและลดลงลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศเมื่อท้ายขบวนเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์

2.11.3 ขนาดของอุโมงค์รถไฟ (Design Basis and Principles)

จากงานวิจัย [11] ได้อธิบายว่าอุโมงค์รถไฟอัตราเร็วสูง เป็นอุโมงค์ใต้ดินที่สร้างขึ้นเพื่อรถไฟอัตราเร็วสูงจะไม่พบอุปสรรคทางธรรมชาติ เช่น ภูเขา หุบเขา แม่น้ำ ทะเลสาบ เมือง สถานประกอบอุตสาหกรรมและเหมืองแร่ เป็นต้น โดยอุโมงค์รถไฟเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพและช่วยลดการจราจรบนท้องถนนให้สัญจรได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

รูปร่างภายในของอุโมงค์รถไฟควรเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ในปัจจุบันประเภทโครงสร้างระบบขนส่งทางราง วิธีการบำรุงรักษา ข้อกำหนดในการอพยพและการกู้ภัย จะพิจารณาตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของรถไฟ ความจุของตัวรถ และความสะดวกสบายของผู้โดยสาร

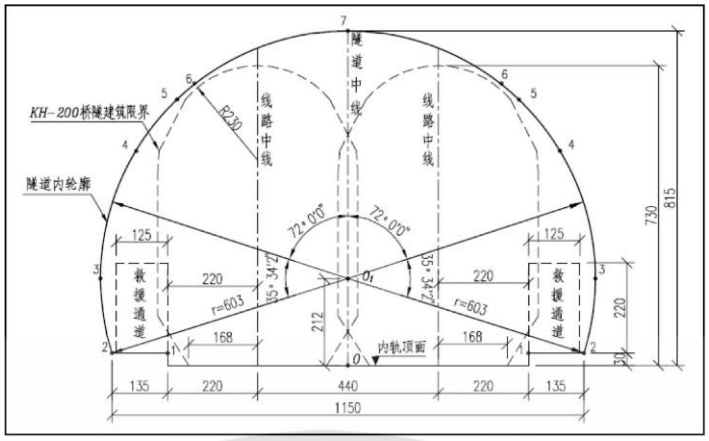
องค์กรที่ทำการออกแบบการก่อสร้างอุโมงค์จะต้องมีการวางแผนความคืบหน้า และระยะเวลาการก่อสร้างอย่างเหมาะสมตามข้อกำหนดของการก่อสร้าง คือ การระบายอากาศ การระบายน้ำรวมไปถึงการควบคุมความเสี่ยงในการก่อสร้างและอื่น ๆ

ในการปฏิบัติการการก่อสร้างรถไฟอัตราเร็วสูงมีความกดดันสูง ไม่ว่าจะเป็นทั้งภายในและภายนอกของรถไฟ เนื่องจากความกดดันภายในรถไฟมีผลกระทบอย่างมากต่อสุขภาพและความสะดวกสบายของผู้โดยสารโดยเฉพาะเมื่อรถไฟสองขบวนทางกันในอุโมงค์ คลื่นแรงดันที่เกิดขึ้นจะซ้อนทับกันและเกิดความผันผวน จากการวิจัย[11] แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเร็วอยู่ที่ 300-350 km/h พื้นที่ว่างที่ต้องการของอุโมงค์คือ 70 m^2 สำหรับรถไฟทางเดี่ยว และ 100 m^2 สำหรับรถไฟทางคู่ เมื่ออัตราเร็วอยู่ที่ 25 m^2พื้นที่ว่างที่ต้องการของอุโมงค์คือ 58 m^2 สำหรับรถไฟทางเดี่ยว และ 90 m^2 สำหรับรถไฟทางคู่ เมื่ออัตราเร็วอยู่ที่ 200 km/h พื้นที่ว่างที่ต้องการของอุโมงค์คือ 52 m^2. สำหรับรถไฟทางเดี่ยวและ 81.4 m^2 สำหรับรถไฟทางคู่

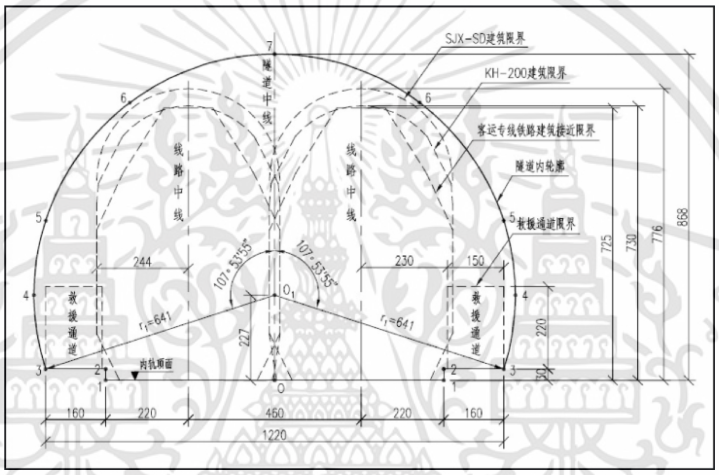
การปฏิบัติงานในอุโมงค์นั้นจะอนุญาติให้อยู่ได้แค่ในเขตความปลอดภัยเท่านั้น โดยเขตความปลอดภัยจะรวมถึงพื้นที่สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกในการก่อสร้างที่วางอยู่ข้างขอบอุโมงค์ ซึ่งมีไว้สำหรับพนักงานรถไฟและเจ้าหน้าที่ซ่อมแซมบำรุงรักษา เมื่ออัตราเร็วในการขับขี่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 200 km/h พนักงานรถไฟและเจ้าหน้าที่ซ่อมแซมบำรุงรักษาจะสามารถอยู่ในอุโมงค์ได้ แต่เมื่อขับด้วยอัตราเร็วมากกว่า 200 km/h จะไม่ได้รับอนุญาตให้อยู่ในอุโมงค์

การกำหนดค่าของพื้นที่ปลอดภัยต้องเป็นไปดังนี้ พื้นที่ปลอดภัยควรอยู่ห่างจากเส้นกึ่งกลางของเส้นทาง 3 m สำหรับอุโมงค์รถไฟทางเดี่ยวพื้นที่ปลอดภัยควรอยู่ด้านข้างที่มีทางออกฉุกเฉิน สำหรับอุโมงค์รถไฟทางคู่พื้นที่ปลอดภัยควรอยู่ด้านติดกันและช่องคู่ สำหรับอุโมงค์ที่มีเส้นทางรถไฟมากกว่าสองทางควรมีพื้นที่ปลอดภัยอยู่ทั้งสองด้านมีความสูงมากกว่า 2.2 m และความกว้างไม่ควรน้อยกว่า 0.8 m

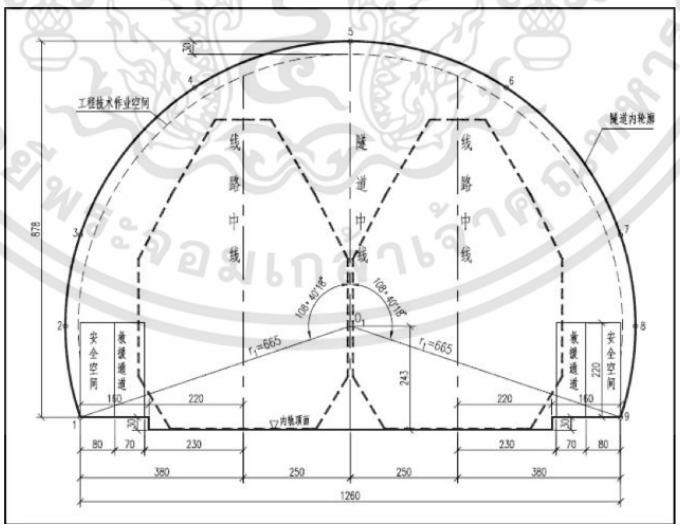
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.16 ขนาดอุโมงค์รถไฟอัตราเร็วสูง (a) ขนาดของอุโมงค์รถไฟทางคู่ที่อัตราเร็วที่ 200 km/h (b) ขนาดของอุโมงค์รถไฟทางคู่ที่อัตราเร็วที่ 250 km/h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c) ขนาดของอุโมงค์รถไฟทางคู่ที่อัตราเร็วที่ 350 km/h

จากรูปที่ 2.16 งานวิจัย [11] เป็นขนาดของอุโมงค์ที่มีการศึกษาถึงความปลอดภัยในการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟอัตราเร็วสูงใน 3 อัตราเร็ว คือ 350, 250 และ 200 km/h มีขนาดความกว้างของอุโมงค์ คือ 12.60, 12.20 และ 11.50 m ตามลำดับ โดยค่าความกว้างของอุโมงค์ที่กล่าวมาจะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองในบทที่ 3

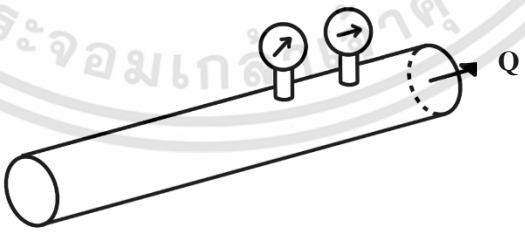
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยซอฟต์แวร์ Ansys Fluent ซึ่งมีเป้าหมายในการสร้างแบบจำลองสองมิติเพื่อลดความซับซ้อนลงให้เหมาะสมกับคอมพิวเตอร์หรือฮาร์ดแวร์ที่ใช้ โดยนำงานวิจัยหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ มาอ้างอิง การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองที่จะทำการเก็บผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีความน่าเชื่อถือ โดยงานวิจัยที่เลือกมาตรวจสอบจะต้องมีการศึกษาเหมือนหรือไปในทิศทางเดียวกันกับวัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย เริ่มจากการทำแบบจำลองที่รู้คำตอบ เพื่อตรวจสอบการสร้างกริด ตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบว่าลู่เข้าเหมาะสมหรือไม่ หลังจากนั้นจึงพัฒนาแบบจำลองให้ซับซ้อนขึ้นไปจนถึงแบบจำลองสุดท้ายของงานวิจัยที่จะทำการหาผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองการไหลในทรงกระบอก

เพื่อเป็นการศึกษาพฤติกรรมความดันที่คล้ายกับความดันในอุโมงค์ และการใช้งานโปรแกรมขั้นต้น เช่น การสร้างโมเดล การสร้างกริด การตรวจสอบคุณภาพกริด การตั้งค่าเงื่อนไขต่างๆในโปรแกรม Fluent รวมไปถึงการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบที่ได้จากการทดสอบ งานวิจัยนี้จึงทำสร้างแบบจำลองการไหลผ่านท่อทรงกระบอกในแนวนอนดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อทำการหาความดันตกคร่อม (pressure drop) ที่เกิดขึ้นภายในท่อตามแนวความยาวของท่อ โดยอ้างอิงทฤษฎีสมการการไหลแบบพัฒนาเต็มรูป (Fully developed flow) หาความดันตกคร่อมที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.3 และนำค่าจากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับการคำนวณจากทฤษฎี

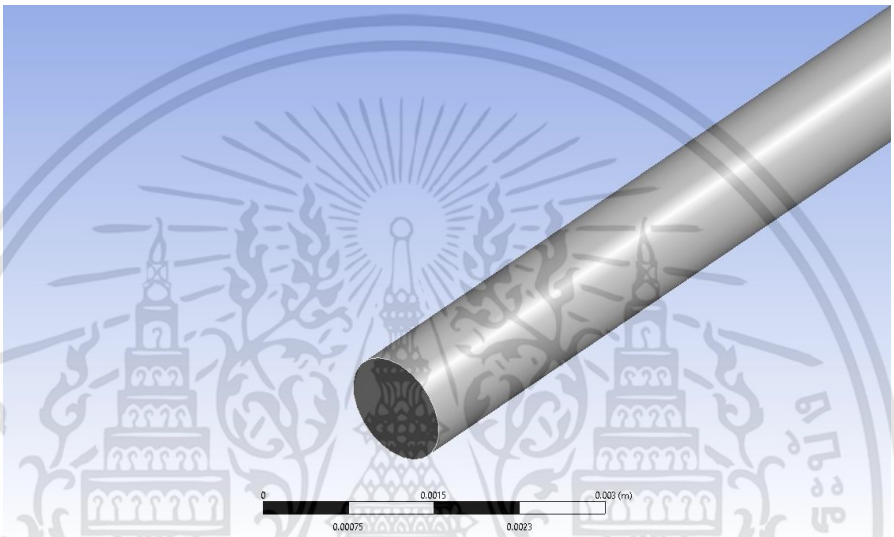


รูปที่ 3.1 การไหลภายในท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ คือ แบบจำลองการไหลผ่านท่อทรงกระบอกในแนวนอนเพื่อทำการหา ความดันตกคร่อม ณ ตำแหน่งความยาวท่อที่ 7 และ 8 m โดยท่อทรงกระบอกมีขนาดความกว้างหน้าตัด 0.001 m ความยาว 10 m เนื่องจากต้องการตรวจสอบผลของความดันที่ลดลงตามความยาวท่อ ทำให้ความยาวของแบบจำลองท่อก่อนถึงจุดเก็บผลทดสอบแรกต้องมีความยาวเพียงพอต่อการให้ของไหลมีพฤติกรรมเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มรูปแบบก่อนถึงจุดเก็บผลทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการไหลภายในท่อ

3.1.2 การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) และการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis)

การแบ่งขนาดกริดจำเป็นต้องใช้ขนาดกริดที่เหมาะสมกับแบบจำลอง เนื่องจากขนาดกริดสมีผลต่อความแม่นยำของคำตอบ และระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ โดยในแบบจำลองที่ทำการศึกษานี้เป็นแบบจำลองการไหลผ่านท่อทรงกระบอก ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความซับซ้อนค่อนข้างน้อย เพื่อเป็นการศึกษาการแบ่งขนาดกริดที่เหมาะสม ในแบบจำลองการไหลผ่านทรงกระบอกนี้ จะแบ่งขนาดกริดออกเป็น 3 ขนาด คือ 0.001, 0.005 และ 0.010 m เพื่อทดสอบผลของขนาดกริดที่มีต่อความแม่นยำของแบบจำลอง และคุณภาพของกริดโดยอ้างอิงจาก Ansys User's Guide [10] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

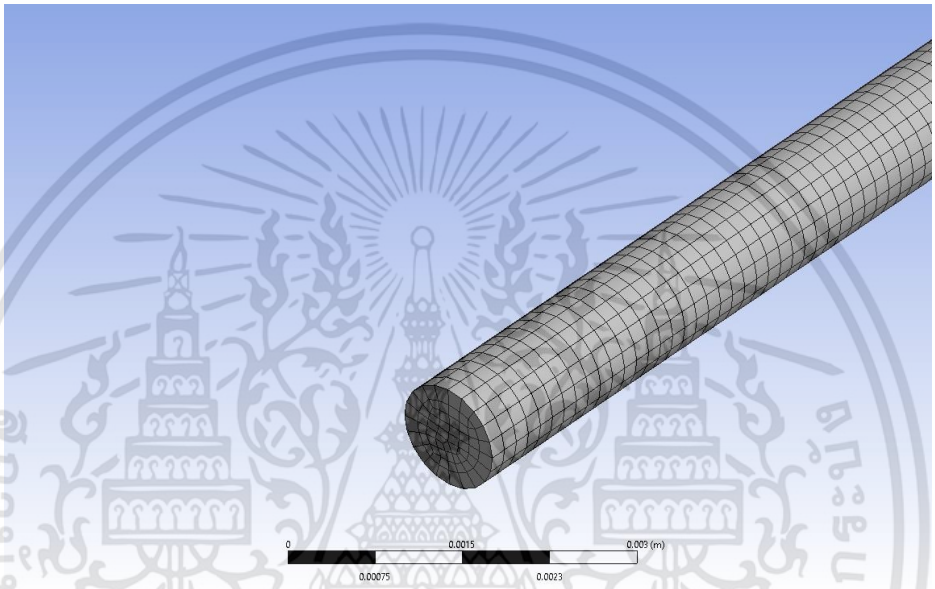
Skewness mesh metrics spectrum:

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

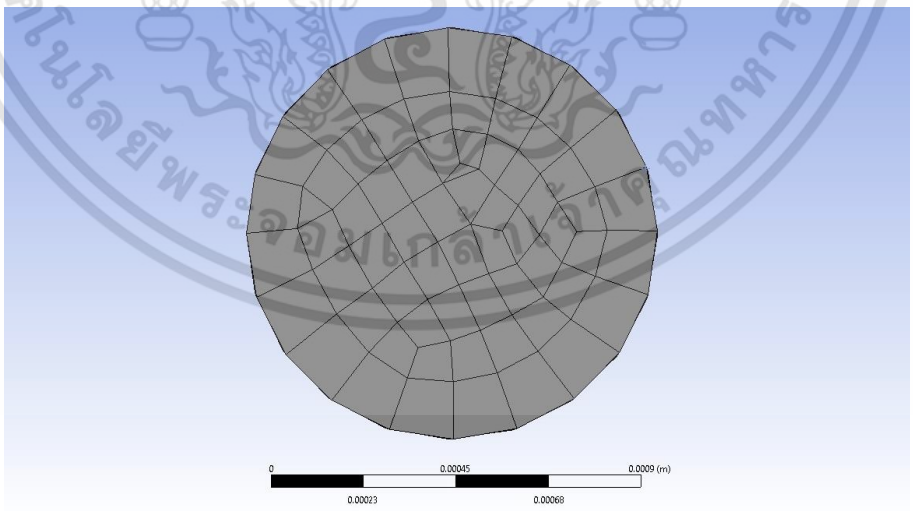
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

รูปที่ 3.3 ตารางแสดงคุณภาพของกริด (ที่มา www.forum.ansys.com)



รูปที่ 3.4 การสร้างกริดแบบจำลองภาพรวม



รูปที่ 3.5 การสร้างกริดแบบจำลองในมุมมองภาพตัด

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 แบบจำลองทรงกระบอกมีกริดขนาด 0.001 m การขึ้นกริดใน โปรแกรม Ansys Workbench พบว่าคุณภาพของกริดทั้ง 3 ขนาดที่เราได้ทำการจำลองมีค่าคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใกล้เคียงกันมาก โดยค่า Skewness ที่แสดงถึงความสมมาตรของกริดเฉลี่ยเป็น 0.183 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเยี่ยมทั้ง 3 ขนาด และในส่วนของค่า Orthogonal Quality บ่งบอกคุณภาพมุมฉากของกริดในแบบจำลองนี้มีค่าเฉลี่ยเป็น 0.957 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากทั้ง 3 ขนาดเช่นกัน

3.1.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะทำการตั้งเงื่อนไขให้เหมือนกันทั้งกรณีการหาคำตอบจากการวเคราะห์เชิงตัวเลขและการหาคำตอบจากการคำนวณทางทฤษฎีคือ เป็นการไหลแบบ Laminar flow เพื่อที่จะไม่คิดการสูญเสียพลังงานจากการความขรุขระของท่อเนื่องจากมีค่าแรงเสียทานน้อยมากๆ โดยจะสูญเสียความดันหรือพลังงานจากความหนืดของของไหลแทน สามารถคำนวณค่าความดันตกค่อมจากทฤษฎีได้ดังนี้

เงื่อนไขการสร้างแบบจำลองและการคำนวณคือ น้ำมีอุณหภูมิ $20^{\circ}\mathrm{C}$ ไหลในท่อแนวนอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.001 m ตั้ง pressure gage วัดความดันไว้สองจุดห่างกัน 1 m มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

<u>วิธีการคำนวณทางทฤษฎี</u>

จากสมการที่ 2.4 จะได้สมการคือ $\mathrm{Re} = \frac{\rho \mathrm{VD}}{\mu}$

จากตาราง properties ของน้ำที่อุณหภูมิ $20^{\circ}\mathrm{C}$ จะได้ค่า $\mu = 1 \times 10^{-6}$

และเนื่องจากเป็นการไหลแบบราบเรียบจึงใช้ค่า Reynolds Number (Re) เป็น 2100 จากนั้นแทน F ค่าในสมการ จะได้

$$2100 = \frac{1000 \times \mathrm{V} \times 0.001}{1 \times 10^{-6}}$$

$$\mathrm{v} = 2.10 \text{ m/s}$$

เพื่อหาความดันที่ตกคร่อมที่ความยาวท่อแทนค่า l = 1 m ในสมการที่ 2.5

$$\mathrm{Q} = \frac{\pi \mathrm{D}^4 \Delta \mathrm{p}}{128 \mu \mathrm{l}}$$

$$\frac{\pi \mathrm{D}^2 \mathrm{v}}{4} = \frac{\pi \mathrm{D}^4 \Delta \mathrm{p}}{128 \mu \mathrm{l}}$$

$$\Delta \mathrm{p} = \frac{32 \mu \mathrm{l} \mathrm{v}^2}{\mathrm{D}^2}$$

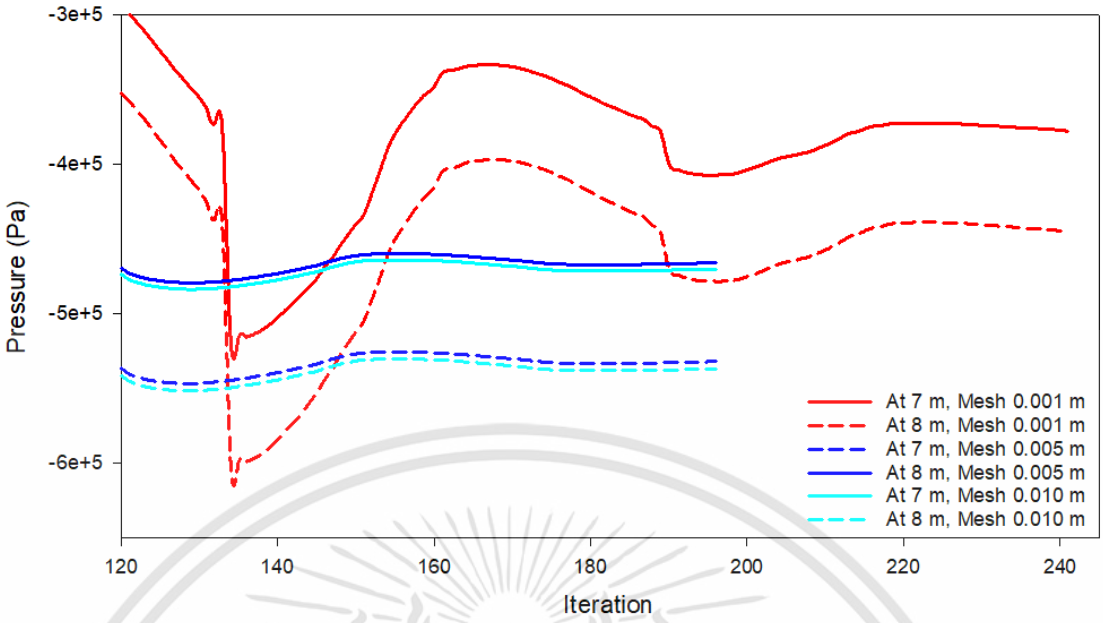
แทนค่า จะได้

$$\Delta \mathrm{p} = \frac{32(1 \times 10^{-6}) \times 1 \times 2.10^2}{0.001^2}$$

$$\Delta \mathrm{p} = 67{,}200 \text{ Pa}$$

จากการคำนวณทางทฤษฎีข้างต้น จะได้ค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) เป็น 67,200 Pa ที่ความยาวท่อ 1 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

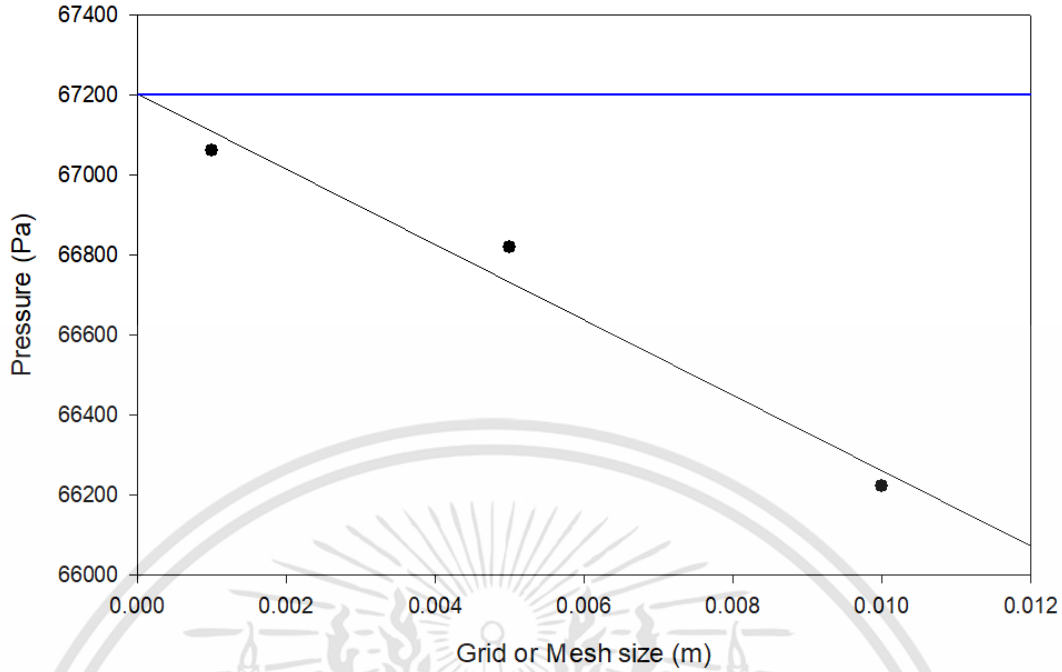


รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และจำนวนครั้งการทดสอบ (Iteration) ในการไหลผ่านท่อที่เก็บผลการทดลองที่ระยะ 7 m และ 8 m ที่ขนาดกริด 0.001, 0.005 และ 0.010 m

จากการเก็บผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขดังรูปที่ 3.6 โปรแกรม Fluent จะแจ้งสถานะว่า Solution converge ซึ่งหมายความว่าค่าของความดันนั้นคำตอบมีการลู่เข้าเหมาะสม และค่าความดันที่จำนวนครั้งการทดสอบสุดท้ายนั้น คือค่าที่สามารถนำไปใช้ได้

ค่าความดันของแบบจำลองกริดขนาด 0.01 m ได้ค่าความดันที่ตำแหน่งท่อ 7 และ 8 m เป็น -466,665 และ -532,878 Pa ตามลำดับ ค่าความดันของแบบจำลองกริดขนาด 0.005 m ได้ค่าความดันที่ตำแหน่งท่อ 7 และ 8 m เป็น -470,854 และ -537,674 Pa ตามลำดับ และรูปที่ 3.6 ค่าความดันของแบบจำลองกริดขนาด 0.001 m ได้ค่าความดันที่ตำแหน่งท่อ 7 และ 8 m เป็น -371,317 และ -438,378 Pa ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) กับขนาดของกริด (m)

จากรูปที่ 3.7 ผลต่างของความดันที่ระยะห่าง 1 m ที่ขนาดกริด 0.01, 0.005, และ 0.001 เป็น 66,223, 66,819 และ 67,060 Pa ตามลำดับ พบว่าเมื่อขนาดของกริดลดลงหรือมีความละเอียดมากขึ้น ค่าของผลต่างความดันที่ตำแหน่งท่อ 7 และ 8 m มีค่าเข้าใกล้กับการคำนวณทางทฤษฎีมากขึ้น และให้ผลคลาดเคลื่อนจากการคำนวณทางทฤษฎีที่แบบจำลองขนาดกริดกริด 0.010, 0.005 และ 0.001 เป็น 1.48, 0.571 และ 0.208 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่าของกริดละเอียดขึ้นผลของความคลาดเคลื่อนก็จะน้อยลงเช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เพราะความแม่นยำในคำตอบที่มากขึ้นเวลาการทดสอบก็จะมากขึ้นเช่นกัน

จากการจำลองการไหลผ่านทรงกระบอกทำให้ผู้จัดทำงานวิจัยได้เข้าใจถึงการสร้างแบบจำลอง การสร้างกริดให้เหมาะสม การตรวจสอบคุณภาพของกริดที่สร้าง การใช้งานโปรแกรม Fluent การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition) ให้ตรงกับเงื่อนไขที่ต้องการ รวมไปถึงการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ ทั้งหมดนี้จะช่วยให้ผู้ทำวิจัยได้นำมาปรับใช้กับแบบจำลองที่ทำการตรวจสอบความถูกต้อง

3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

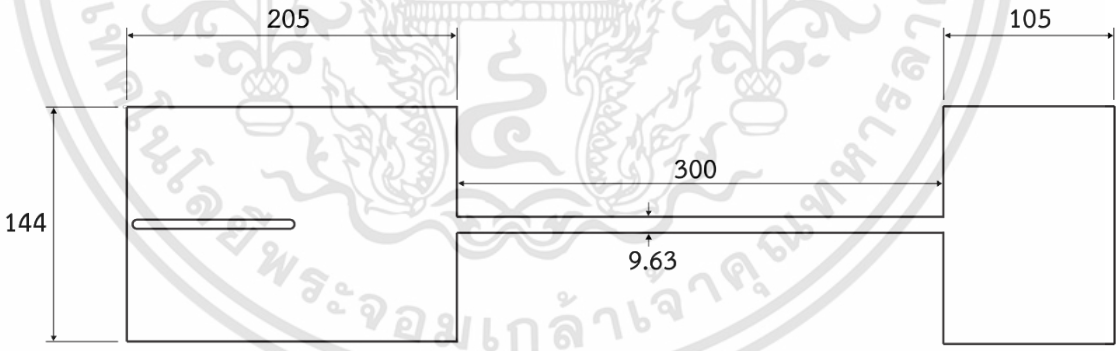
งานวิจัยที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ ผลงานวิจัย [6] โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลเฉลย จำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้นและคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics : CFD) ด้วย Ansys CFX ในการสร้างแบบจำลองเป็นแบบสามมิติ แต่ในการการตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เนื่องจากปัญหาขีดจำกัดทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

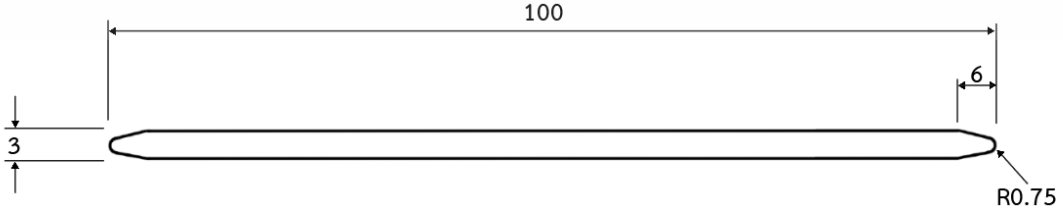
อุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรือฮาร์ดแวร์การสร้างแบบจำลอง จึงลดความซับซ้อนของแบบจำลองลงเป็นแบบจำลองสองมิติ และเก็บผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม Ansys Fluent

3.2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบผล ใช้งานวิจัย [6] มาปรับสร้างแบบจำลองให้เป็นแบบจำลองสองมิติ โดยอ้างอิงขนาดรถไฟและอุโมงค์ให้ใกล้เคียงกันดังหัวข้อที่ 2.11.2 อากาศพลศาสตร์ของรถไฟในอุโมงค์ (Aerodynamic of the Trains in Tunnels) ดังรูปที่ 2.10 และ 2.111 โดยการสร้างแบบจำลองสองมิติจากมุมมองด้านบน มีขนาดของอุโมงค์กว้าง 9.63 m ยาว 300 m รถไฟมีความกว้าง 3 m ยาว 100 m หัวและท้ายของขบวนรถไฟมีลักษณะรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมลบความคมของมุมด้วยรัศมีโค้ง 0.750 m ดังรูปที่ 3.9 จากงานวิจัย [6] รูปที่ 2.11 ขนาดของสิ่งแวดล้อมจะมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 144 m เมื่อปรับเป็นแบบจำลองสองมิติจะได้ขนาดของสิ่งแวดล้อม กว้าง 144 m โดยต้องเว้นระยะห่างจากหัวรถไฟ 100 m ก่อนเข้าอุโมงค์ และเว้นระยะห่างจากท้ายรถไฟอย่างน้อย 5 m จะได้ขนาดของสิ่งแวดล้อม ยาว 205 m และเมื่อท้ายขบวนรถไฟเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์แล้วต้องมีระยะห่างจากบริเวณอุโมงค์อย่างน้อย 5 m ทำให้สิ่งแวดล้อมบริเวณก่อนทางเข้าอุโมงค์เป็น กว้าง 144 m ยาว 205 m และขนาดของสิ่งแวดล้อมปลายอุโมงค์มีขนาดกว้าง 144 m ยาว 105 m ดังรูปที่ 3.8 ตามงานวิจัย [6] ที่นำมาอ้างอิงการตรวจสอบ โดยกำหนดจุดเก็บผลการทดลองเป็นตามแนวความยาวอุโมงค์ดังรูปที่ 3.10

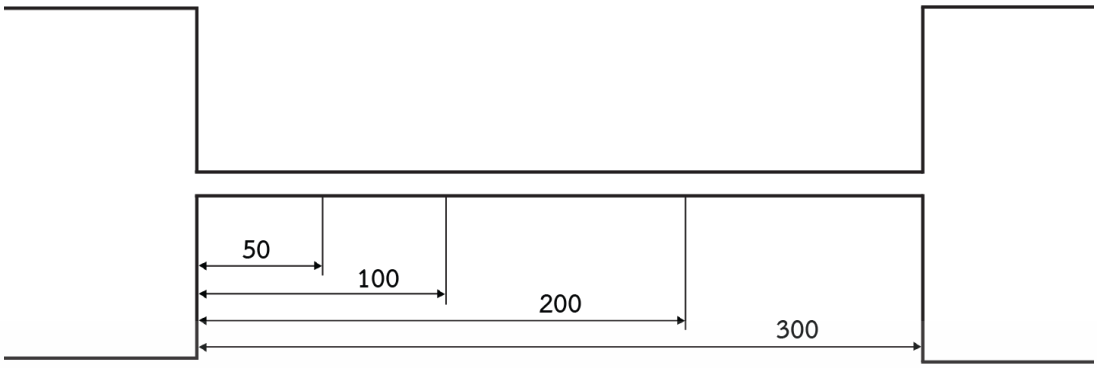


รูปที่ 3.8 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (ขนาดมีหน่วยเป็น m)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของรถไฟที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง (ขนาดมีหน่วยเป็น m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองที่ระยะ x=0,50,100,200 และ 300 m

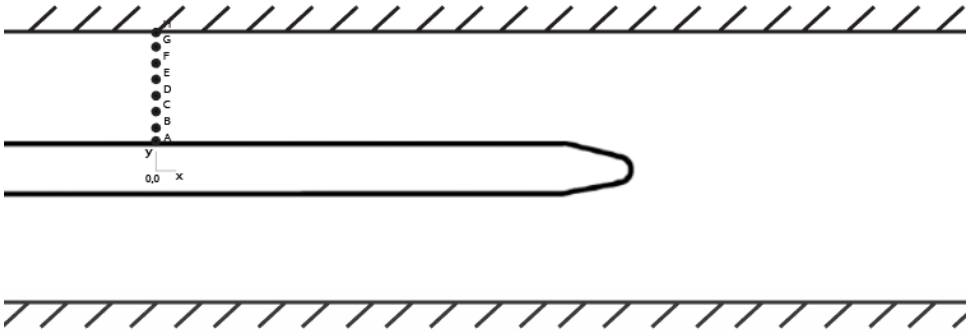
3.2.2 การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) และการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis)

การแบ่งจำนวนกริดมีผลต่อความแม่นยำและระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง จึงต้องทำการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมในการทดสอบ แต่เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบจำลองในรูปแบบสองมิติจึงไม่สามารถเทียบจำนวนกริดที่เหมาะสมกับสามมิติได้ จึงได้ทำการหากริดที่เหมาะสมในรูปแบบของแบบจำลองสองมิติ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่ากริดที่เหมาะสมกับผลลัพธ์และระเวลาที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งสามารถตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้

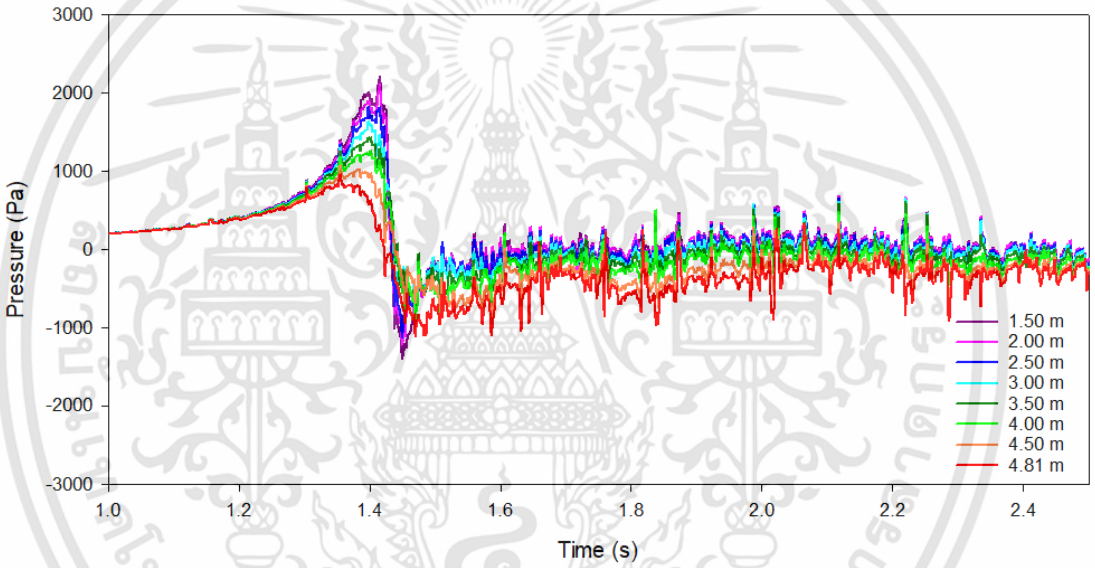
จากงานวิจัย [6] พบว่าในแบบจำลองสามมิติที่หน้าตัดเดียวกันการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโดเมนนิ่งและโดเมนที่เคลื่อนที่จะมีค่าที่เหมาะสมและคล้ายคลึงกัน ได้ข้อสรุปว่า ความดันของพื้นที่หน้าตัดเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการลดความซับซ้อนจากงานวิจัย [5] โดยเป็นการจำลองในรูปแบบสองมิติ จึงต้องทำการทดสอบหาตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเก็บค่าและตรวจสอบว่าเป็นไปตามงานวิจัยข้างต้นหรือไม่ ทั้งนี้การทดสอบจำเป็นต้องใช้การสร้างกริดที่เท่ากันตลอดทั้งพื้นที่อุโมงค์

จะพบว่าเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปในอุโมงค์ จะเหลือพื้นที่ด้านข้างรถไฟ 3.315 m ทำการทดสอบโดยแบ่งระยะจากระหว่างรถไฟไปจนถึงขอบของอุโมงค์ โดยกำหนดให้จุดกึ่งกลางของรถไฟเป็นตำแหน่งที่ 0,0 และเริ่มเก็บผลที่ตำแหน่ง 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 4.815 m วัดจากกึ่งกลางของรถไฟในแนวขวางของอุโมงค์ โดยแทนเป็นสัญญาลักษณ์ A ถึง H ตามที่แสดงดังรูปที่ 3.11 สาเหตุที่เก็บผลการทดลองเฉพาะด้านซ้ายของการเคลื่อนที่ของรถไฟอย่างเดียว เนื่องจากแบบจำลองลองมีความสมมาตรกันทั้งซ้ายและขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองตามแนวแกน Y ที่ตำแหน่ง A=1.5, B=2.0, C=2.5, D=3.0, E=3.5, F=4.0, G=4.5, H=4.815 m



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) ตามตำแหน่งในแนวแกน y

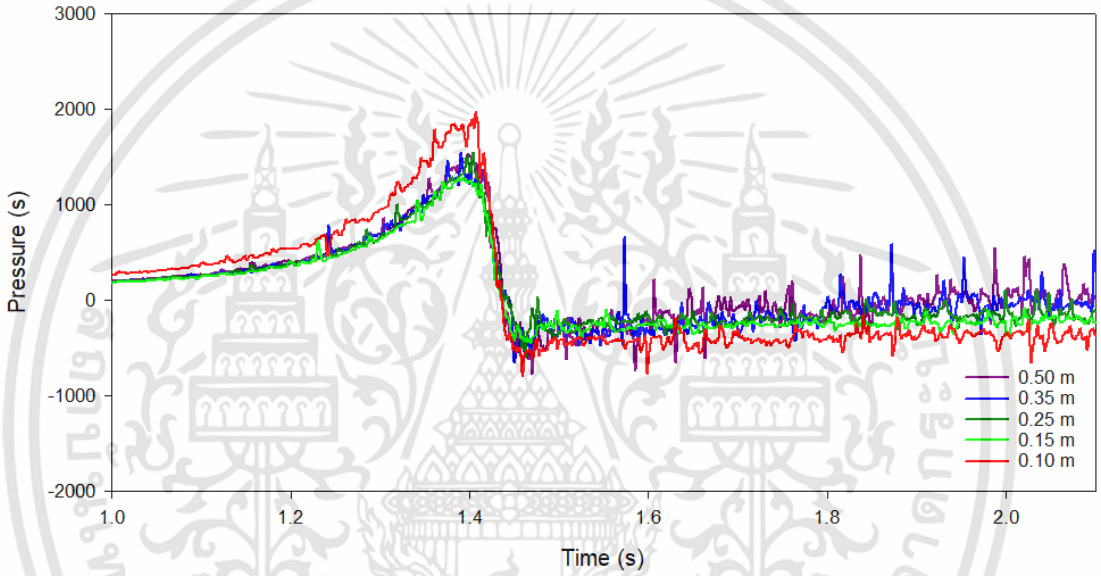
ผลการเก็บการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในตำแหน่งที่ x=0 m ที่ขนาดกริดเท่ากันทุกตำแหน่ง โดยไม่ได้คำนึงถึงขนาดกริดที่เหมาะสมกับแบบจำลอง จากรูปที่ 3.12 พบว่าค่าของข้อมูลระหว่างโดเมนนิ่งและโดเมนที่เคลื่อนที่ออกมาคล้ายคลึงกัน แต่ค่าของความดันจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป โดยที่บริเวณ A=1.5 m จะเกิดค่าความดันสูงสุดมากที่สุด และบริเวณ H=4.815 m จะเกิดค่าความดันสูงสุดน้อยที่สุด โดยจะค่อยๆลดหลั่นลงมาตามลำดับ การทดสอบความถูกต้องในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตำแหน่งเก็บผลการทดลองที่ y=3.15 m เนื่องจากเป็นบริเวณเฉลี่ยของความดันตั้งแต่ตำแหน่ง A ถึง H

ในแบบจำลองของงานวิจัย [6] ได้แนะนำว่ากริดที่บริเวณโดยรอบรถไฟและบริเวณหัวท้ายของรถไฟจะมีขนาดที่ละเอียดและบริเวณอื่นๆจะมีขนาดหยาบกว่า เนื่องจากรถไฟต้องมีการเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วที่สูง จึงทำให้ต้องมีการสร้างจำนวนกริดที่ละเอียดเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงให้แม่นยำยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาจำนวนกริดที่เหมาะสมต่อแบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง กำหนดขนาดกริดเป็น 2 ขนาด คือ 1.ขนาดกริดหยาบ 2.ขนาดกริดละเอียด การสร้างกริดอีก 2 วิธี คือ 1.การสร้างกริดแบบเต็มอุโมงค์ 2.การสร้างกริดแบบเฉพาะขอบอุโมงค์ โดยกำหนดขนาดของกริดที่หยาบอยู่ที่ 5 m และค่อย ๆ ลดค่าขนาดของกริดละเอียด ตั้งแต่ 0.50, 0.35, 0.25, 0.15, 0.10 m ตามลำดับ ทั้งนี้ไม่ได้วิเคราะห์ถึงขนาดของกริดหยาบเนื่องจากไม่อยู่ในบริเวณจุดเก็บค่าผลการทดลอง ทั้งนี้ขนาดของกริดหยาบบริเวณรถไฟที่จะเคลื่อนที่และบริเวณอุโมงค์จะมีขนาดของกริดเท่ากัน เพื่อให้จุดที่มีการเก็บค่าการทดลองมีการคำนวณต่อเนื่องกัน

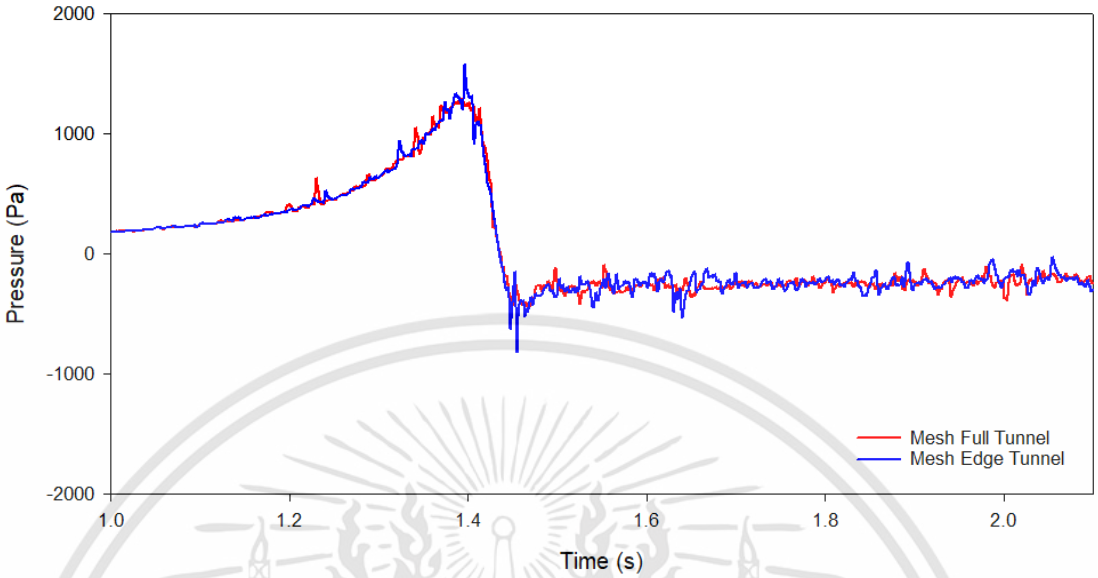


รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) ที่ขนาดกริด 0.50, 0.35, 0.25, 0.15 และ 0.10 m

จากการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis) ตามเงื่อนไขที่ตั้งขึ้น จากรูปที่ 3.13 พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันในทุกขนาดกริดที่ตรวจสอบ เมื่อนำค่าความดันในช่วงเวลา 1.5 ถึง 2.1 s คำนวณความแปรปรวนของชุดข้อมูล เพื่อให้ทราบว่าข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวอย่างไร ยิ่งความแปรปรวนเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่าแต่ละจุดข้อมูลนั้นอยู่ใกล้ชิดกันเป็นกลุ่มก้อนมากกว่า โดยได้ค่าความแปรปรวนที่จำนวนกริดละเอียด 0.50, 0.35, 0.25, 0.15 และ 0.10 m เป็น 173.9, 158.1, 67.6, 45.1, และ 68.9 Pa พบว่าค่าความดันที่กริดละเอียดขนาด 0.15 m มีค่าความแปรปรวนของความดันน้อยที่สุด แต่เมื่อเทียบกับจำนวนกริดละเอียดที่น้อยลงเป็น 0.10 m พบว่าจำนวนกริดที่น้อยลงทำให้ค่าความดันแปรปรวนมากว่าค่ากริดที่ 0.15 m จำนวน กริดทั้งหมดที่กริดละเอียด 0.10 m เป็น 633,909 กริด และจำนวนกริดทั้งหมดที่กริดละเอียด 0.15 m เป็น 290,325 กริด ดังที่แสดงในตารางที่ 1 โดยทั้งหมดนี้เป็นเทคนิคการสร้างกริดด้วยวิธีการใช้กริดแบบเต็มอุโมงค์ดังรูปที่ 3.15 จากจำนวนกริดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้นส่งผลต่อเวลาที่เพิ่มขึ้นในการจำลองและทำให้ค่าความดันยังคงแปรปรวน งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กริดละเอียดที่ 0.15 m เนื่องจากสามารถลดจำนวนกริดลงมาได้ประมาณถึง 2 เท่า



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) ที่การสร้างกริดแบบเต็มพื้นที่อุโมงค์ และแบบเฉพาะขอบอุโมงค์

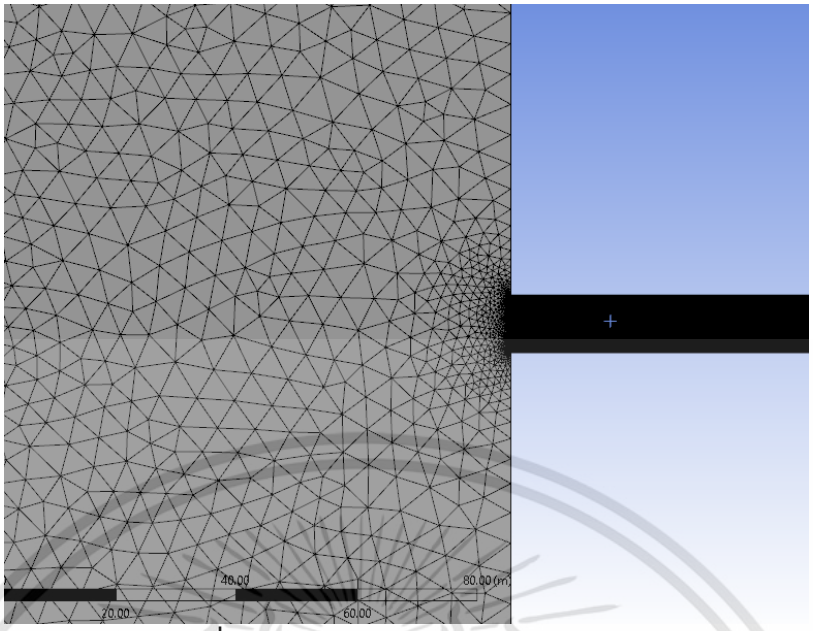
จากการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis) ได้จำนวนกริดละเอียดที่ 0.15 m ได้ทำการสร้างกริดอีก 2 วิธี โดยการสร้างกริดแบบเต็มพื้นที่อุโมงค์ดังรูปที่ 3.15 ได้จำนวนกริด 290,325 กริด และการสร้างกริดแบบเฉพาะขอบอุโมงค์ดังรูปที่ 3.16 พบว่าจำนวนกริดลดลงเหลือ 69,780 กริด หรือลดลง 75.96 % ดังที่แสดงในตารางที่ 1 โดยที่ค่าของความดันคาดเคลื่อน 2.19 %

ตารางที่ 3.1 ตารางขนาดกริดที่ใช้ในการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis)

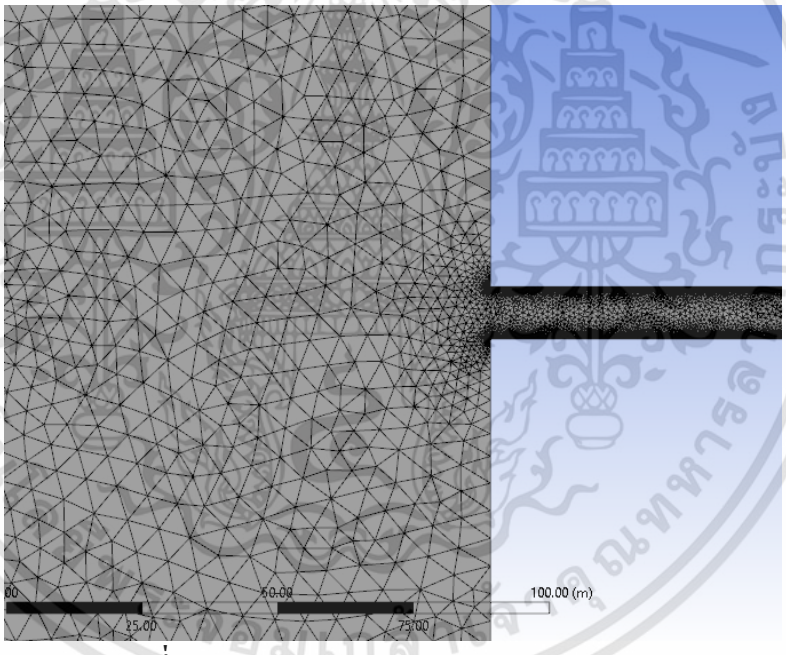
ขนาดกริดละเอียด (m)	0.5	0.35	0.25	0.15	0.1
สร้างกริดแบบเต็มอุโมงค์	31,568	59,627	105,132	290,325	633,909
สร้างกริดแบบเฉพาะขอบอุโมงค์	-	-	-	69,780	-

การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) และการวิเคราะห์กริด (Mesh analysis) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้จำนวนกริดหยาบที่ 5 m กริดละเอียด 0.15 m และเทคนิคการสร้างกริดแบบเฉพาะขอบดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณผลการทดลองอยู่ที่ประมาณ 14 ชั่วโมง ทั้งนี้เวลาขึ้นอยู่กับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรือฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงการใช้กริดแบบเต็มอุโมงค์



รูปที่ 3.16 แสดงการใช้กริดแบบเฉพาะขอบอุโมงค์

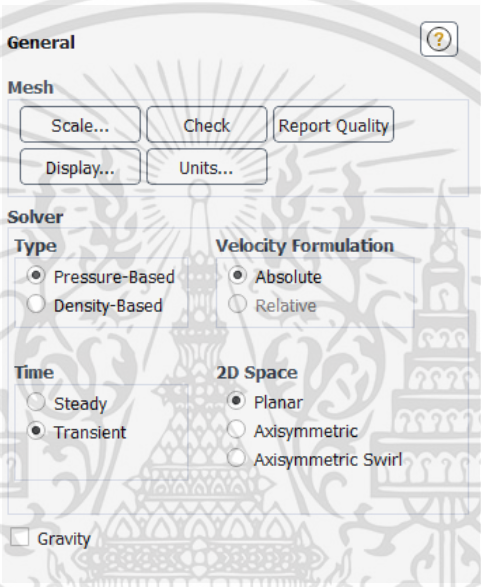
รูปที่ 3.16 ขนาดกริดหยาบและกริดละเอียดเป็น 5.00 และ 0.150 m ตามลำดับ จำนวนกริด 69,780 กริด เมื่อตรวจสอบคุณภาพของกริด พบว่าคุณภาพของกริดที่เราได้ทำการจำลองมีค่า Skewness ที่แสดงถึงความสมมาตรของกริดเป็น 0.0845 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเยี่ยม และในส่วนของค่า Orthogonal Quality บ่งบอกคุณภาพมุมฉากของกริด ในแบบจำลองนี้มีค่าเป็น 0.948 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition)

ในการกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองนี้ได้อ้างอิงจากงานวิจัย[6] เท่าที่มีระบุไว้ในงานวิจัย แต่เนื่องจากเทคนิคในการหาค่าแบบจำลองที่ต่างกัน จึงทำให้มีบางเงื่อนไขในการตั้งค่าที่เพิ่มเติมเข้ามาหรือแตกต่างกันออกไป โดยการกำหนดเงื่อนไขส่วนใหญ่จะอยู่ในการตั้งค่าต่างๆก่อนการคำนวณผลการทดลองภายในโปรแกรม Ansys Fluent ดังนี้

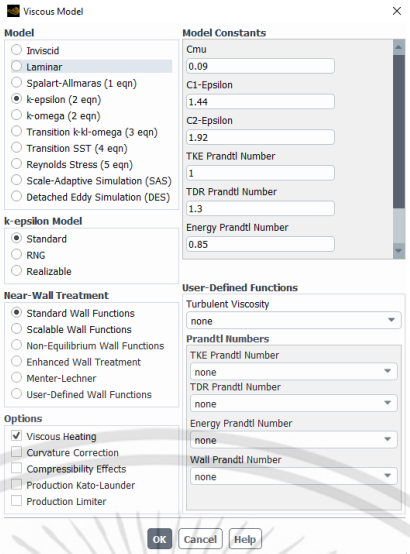
การกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองในหัวข้อ General เนื่องจากการทดลองนี้มีรูปแบบการไหลที่ไม่เสถียร เนื่องจากผลของอัตราเร็วและความดันที่เกิดขึ้นเมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปในอุโมงค์ จึงทำให้ต้องกำหนดการไหลเป็นแบบ Transient ดังรูปที่ 3.17



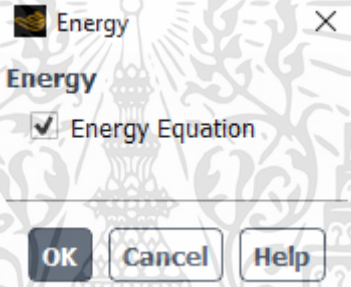
รูปที่ 3.17 แสดงการตั้งค่า ในหัวข้อ General

ในส่วนของ Models เนื่องจากโมเดลที่ทำการทดลองเป็นโมเดลพื้นฐานของการไหลแบบปั่นป่วน จึงทำให้ต้องมีการตั้งค่าเป็น k-epsilon (2 eqn) และในส่วนของ Options ต้องทำการเลือกเป็น Viscous Heating ดังรูปที่ 3.18 และเลือกเป็น Energy Equation เพราะว่ามีการกำหนดค่าอุณหภูมิในการทดลอง ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



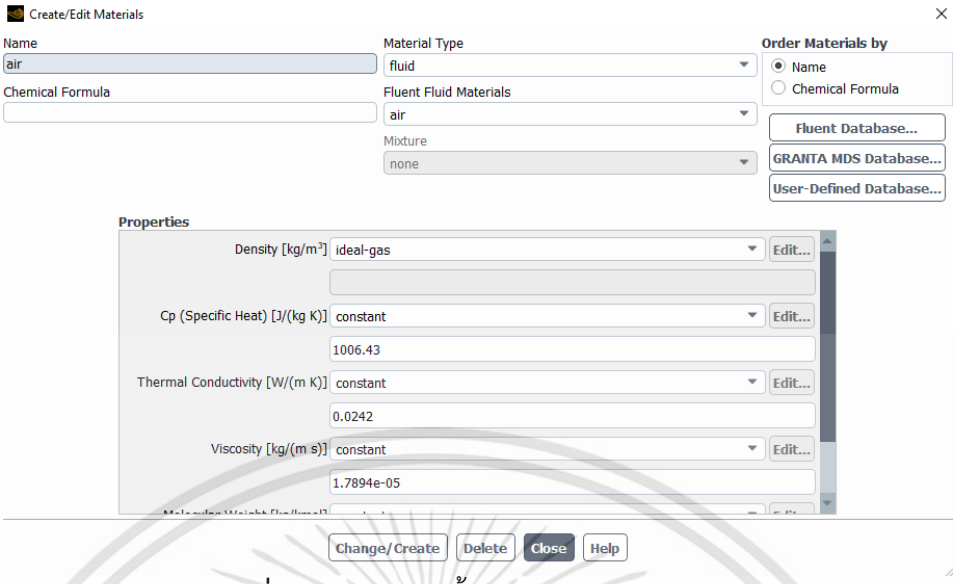
รูปที่ 3.18 แสดงการตั้งค่า Viscous Model



รูปที่ 3.19 แสดงการตั้งค่า Energy

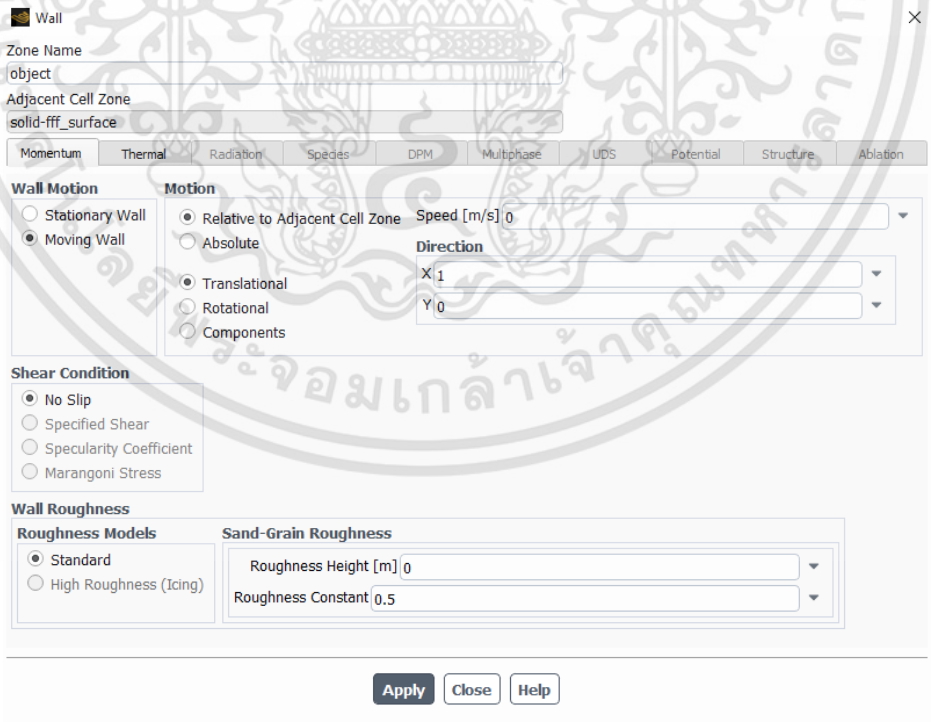
ในส่วนของการตั้งค่า Materials จะใช้เป็นอากาศ (Air) โดยในหัวข้อ Properties ที่ Density ของอากาศจะตั้งเป็น ideal-gas ดังรูปที่ 3.20 เนื่องจากอากาศภายในอุโมงค์เป็นของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible fluid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 แสดงการตั้งค่า ในหัวข้อ Materials

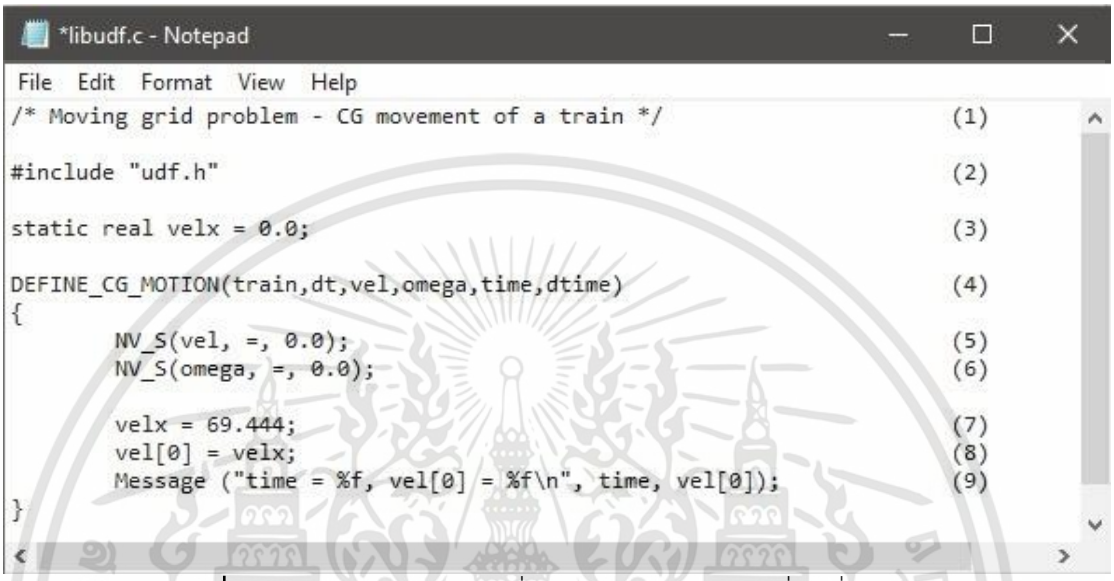
กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ตั้งชนิด (type) ของ out เป็น Pressure-Outlet เพื่อเปรียบเสมือนให้อากาศในแบบจำลองได้ไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมที่มีความดันเกจเป็นศูนย์ wall และ object เป็น wall กำหนด Wall Motion ของ wall เป็น Stationary Wall และobject เป็น Moving Wall ตามที่แสดงในรูปที่ 3.21 เนื่องจากตัว object ต้องมีการตั้งค่าใน Dynamic Mesh ให้เกิดการเคลื่อนที่จึงเปรียบสเหมือนกับกำแพงที่มีการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.21 แสดงการตั้งค่า Boundary condition ของ object

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการตั้งค่ากริดพลวัต (Dynamic Mesh) จาก Ansys Fluent Student: Moving and Deforming Mesh Example ก่อนที่จะทำการตั้งค่าในหัวข้อนี้จะต้องทำการเขียน C++ โค้ดขึ้นมาก่อน เพื่อให้โปรแกรม Fluent อ่านโค้ดแล้วใช้งานในหัวข้อ Dynamic Mesh โดยโค้ดที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงการเขียนโค้ดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ

จากโค้ดข้างต้นอธิบายได้ดังนี้

(1) ชื่อโค้ด

(2) ประกาศเรียกอ่านแฟ้มส่วนหัว (header file) ที่มีชื่อว่า udf.h

(3) ประกาศอัตราเร็วสถิตย์แนวแกน x เป็นศูนย์

(4) ประกาศพารามิเตอร์ของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา

(5) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นเริ่มต้นของวัตถุเป็นศูนย์

(6) ประกาศอัตราเร็วเชิงมุมเริ่มต้นของวัตถุที่เป็นศูนย์

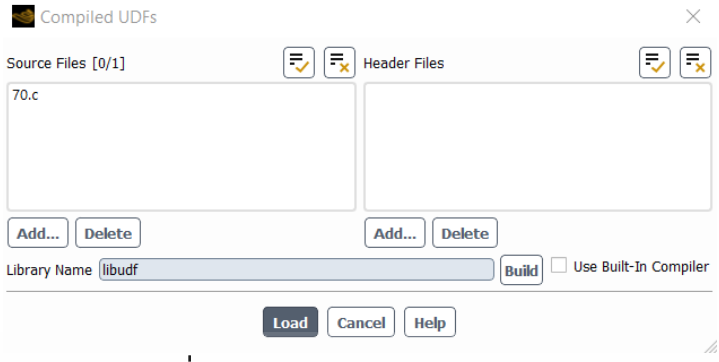
(7) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นแนวแกน x เป็น 69.4 m/s (จากซ้ายไปขวา)

(8) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นของวัตถุเป็นส่วนประกอบของ Array ของอัตราเร็วแนวแกน x

(9) ประกาศคำสั่งแจ้งเตือนเวลาและอัตราเร็วของวัตถุ

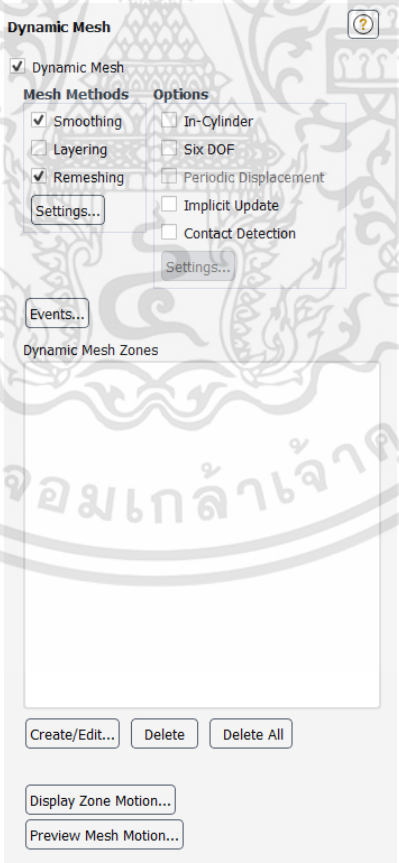
นำโค้ดไปใส่ไว้ในไฟล์ Fluent ของการทดลอง และทำการ Compiled โค้ดดังนี้ ที่แถบเมนูด้านบนของโปรแกรม Ansys Fluent ไปที่ User-Defined -> Functions -> Compiled จะปรากฏดังรูปที่ 3.23 ทำการเพิ่มโค้ด กด Build และกด Load ตามลำดับเพื่อเป็นการให้ตัวโปรแกรม Fluent อ่านโค้ดเข้ามาใช้ภายในโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



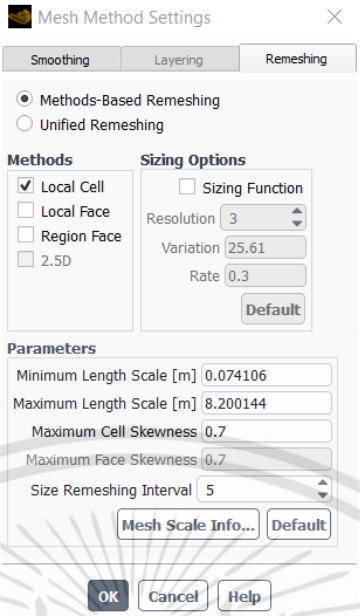
รูปที่ 3.23 แสดงการ Compiled UDFs

หลังจากทำการ Compiled UDFs เรียบร้อยแล้ว เข้าไปตั้งค่าการเคลื่อนที่ของวัตถุในหัวข้อ Dynamic Mesh ติ๊กเลือก Smoothing และ Remeshing ดังรูปที่ 3.24 เพื่อที่จะตั้งให้กริดมีการเกิดใหม่ให้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ หลังจากนั้นทำการ Settings ในหัวข้อ Remeshing ให้ตั้งค่า Minimum Length Scale และ Maximum Length Scale ตรงตรงกับกริด (Mesh) ที่เราสร้างมา โดยดูค่าที่ Mesh Scale Info ดังที่แสดงในรูปที่ 3.25 หลังจากนั้นทำการ Create Dynamic Mesh โดยเลือก Zone Names เป็นสิ่งที่เราต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่ของกริด (Mesh) ในงานวิจัยนี้เลือกเป็น object ดังรูปที่ 3.26

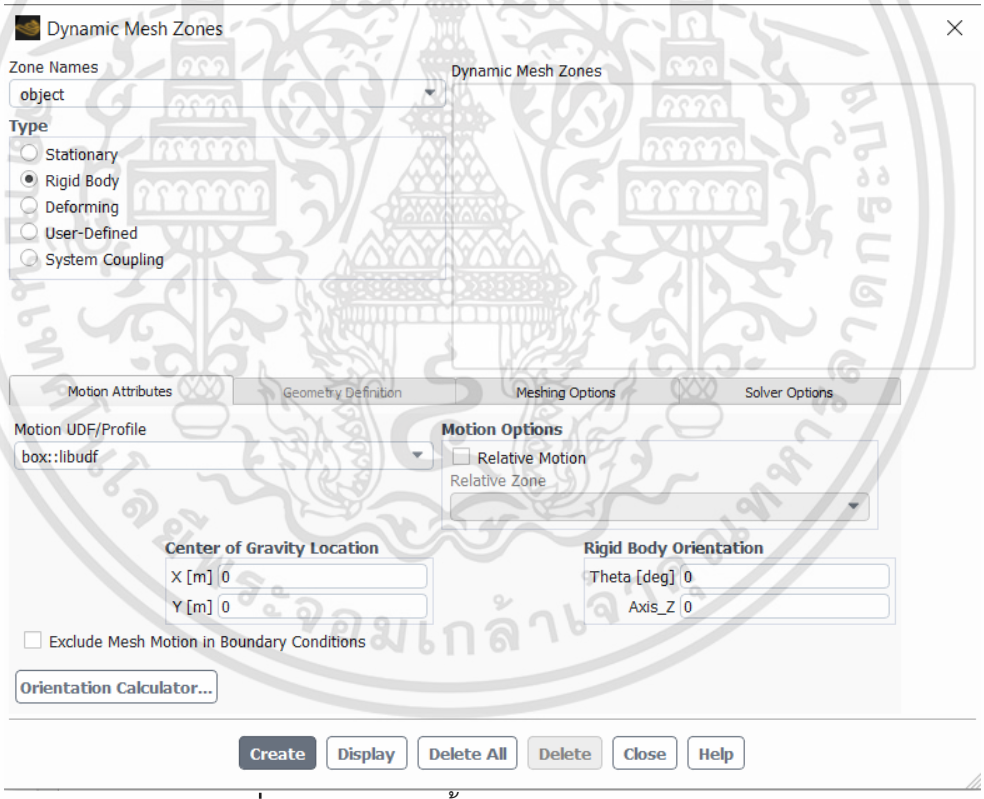


รูปที่ 3.24 แสดงการตั้งค่า Dynamic Mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



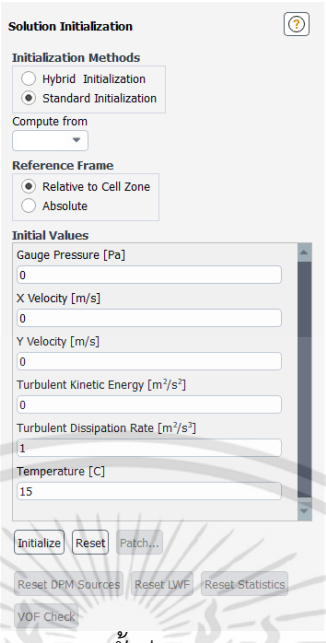
รูปที่ 3.25 แสดงการตั้งค่า Remeshing ในส่วนของ Parameters



รูปที่ 3.26 แสดงการตั้งค่า Dynamic Mesh Zone

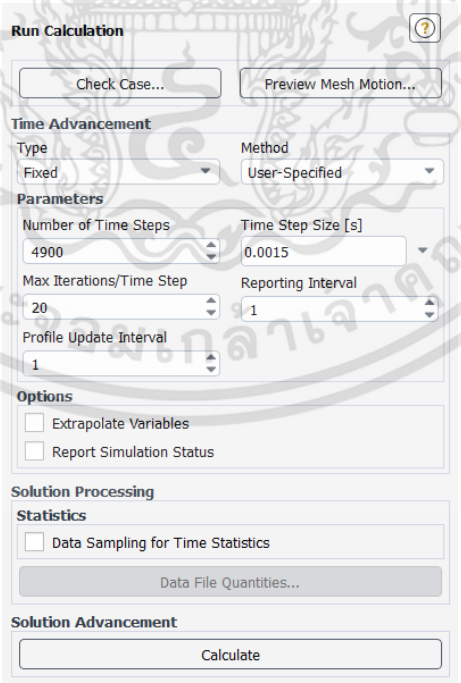
หัวข้อ Initialization ตั้งค่า Turbulent Kinetic Energy เป็น 0 และ Temperature เป็น 15°c ตามรูปที่ 3.27 โดยอ้างอิงจากงานวิจัย [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แสดงการตั้งค่า Solution Initialization

หัวข้อ Run Calculation จะอ้างอิงค่า Time Step Size (s) จากงานวิจัย [6] เป็น 0.0015 และ Number of Time Steps เป็น 4900 ดังรูปที่ 3.28 ทั้งนี้เมื่อได้ผลค่าการทดลองมาจะพบว่าค่า Number of Time Steps จะจบที่ 4809 ที่เวลา 7.214 s โดยที่โปรแกรม Ansys Fluent จะแจ้งเตือนว่า "Update-Dynamic-Mesh failed. Negative cell volume detected" เนื่องจากตัวรถไฟได้เคลื่อนที่ชนกับขอบโมเดลที่สร้างไว้แล้ว

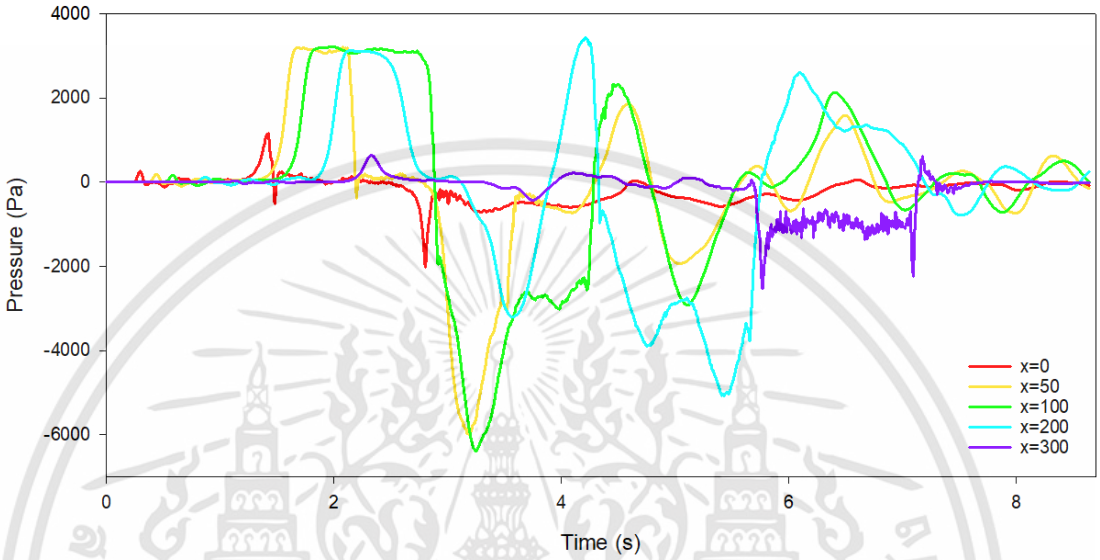


รูปที่ 3.28 แสดงการตั้งค่า Run Calculation

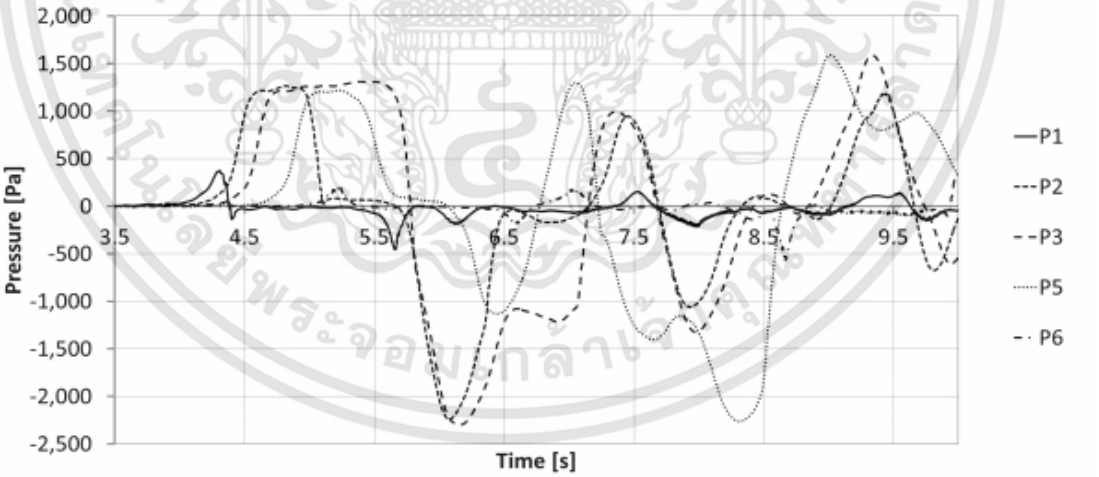
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง หลังจากได้ผลของการทดลองออกมาพบว่าการสร้างแบบจำลองสองมิติไม่สามารถนำค่าความดันไปเทียบกับแบบจำลองสามมิติได้ เนื่องจากแบบจำลองสองมิติมีพื้นที่สำหรับให้อากาศอัดตัวน้อยกว่าพื้นที่ของแบบจำลองสามมิติ ทั้งนี้จึงตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากแนวโน้มของกราฟ



รูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) และเวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ด้วยอัตราเร็ว 70 m/s

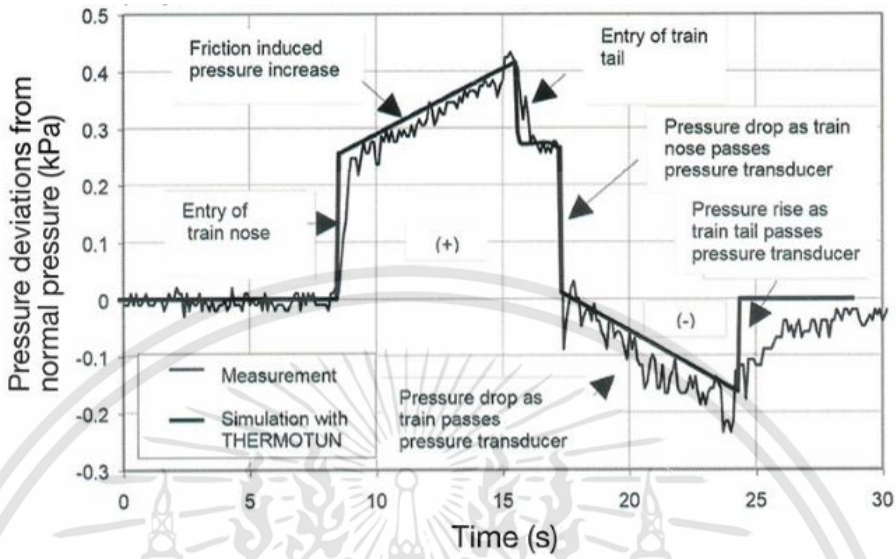


รูปที่ 3.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (Pa) กับเวลา (s) P1, P2, P3, P5 และ P6 ในเวลาต่าง ๆ จากงานวิจัย [6]

ในรูปที่ 3.29 พบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของความดันในแต่ละจุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับตำแหน่งที่รถไฟเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเก็บผล ที่ตำแหน่ง x=300 m ค่าความดันจะไม่เพิ่มขึ้นมากจนกว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเก็บผล เนื่องจากไปตำแหน่งที่อยู่ห่างจากรถไฟมากที่สุด และอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

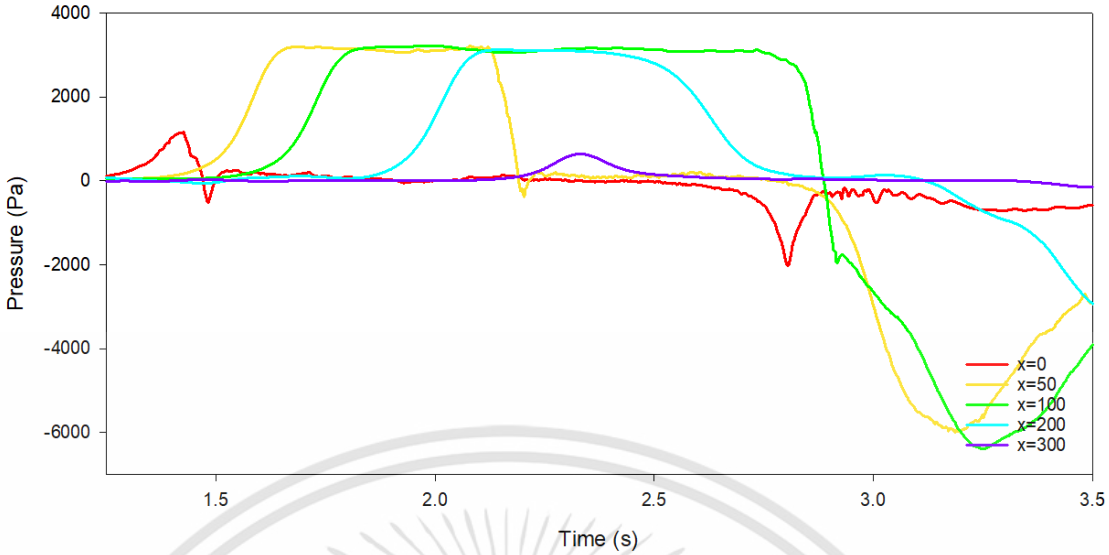
ใกล้กับสิ่งแวดล้อมทำให้ได้รับอิทธิพลจากการเคลื่อนที่ของรถไฟน้อยมาก ซึ่งรูปแบบของกราฟความดันกับเวลามีลักษณะแนวโน้มเหมือนกับงานวิจัย [6] ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.31 รูปแบบของความดันที่ถูกวัดและคำนวณโดย termodun ใน Grauholz [8] อุโมงค์ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (อัตราเร็วของรถไฟ 200 km/h พื้นที่หน้าตัด 70 m²)

จากงานวิจัย [3] ในหัวข้อที่ 2.9 รูปที่ 3.31 พบว่า เมื่อรถไฟวิ่งเข้าอุโมงค์ด้วยอัตราเร็ว 200 km/h ความดันจะเกิดความผันผวนเมื่อรถไฟเข้าไปแทนที่อากาศภายในอุโมงค์ โดยความดันในแต่ละตำแหน่งมีพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะแบ่งพฤติกรรมออกเป็น 2 แบบ คือ ช่วงขาเข้าและช่วงขาออก ดังนี้ 1.เมื่อจมูกรถไฟเคลื่อนที่มาใกล้กับตำแหน่งเก็บผลจะส่งผลให้ความดัน ณ ตำแหน่งนั้นเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน และเมื่อจมูกรถไฟเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งนั้นจะทำให้ความดันลดลงแล้วจึงจะค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ 2.เมื่อท้ายรถไฟเคลื่อนที่มาใกล้กับตำแหน่งเก็บผลจะส่งผลให้ความดัน ณ ตำแหน่งนั้นลดลงอย่างฉับพลัน และเมื่อท้ายรถไฟเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งนั้นจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นแล้วจึงค่อย ๆ ลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศเช่นกัน

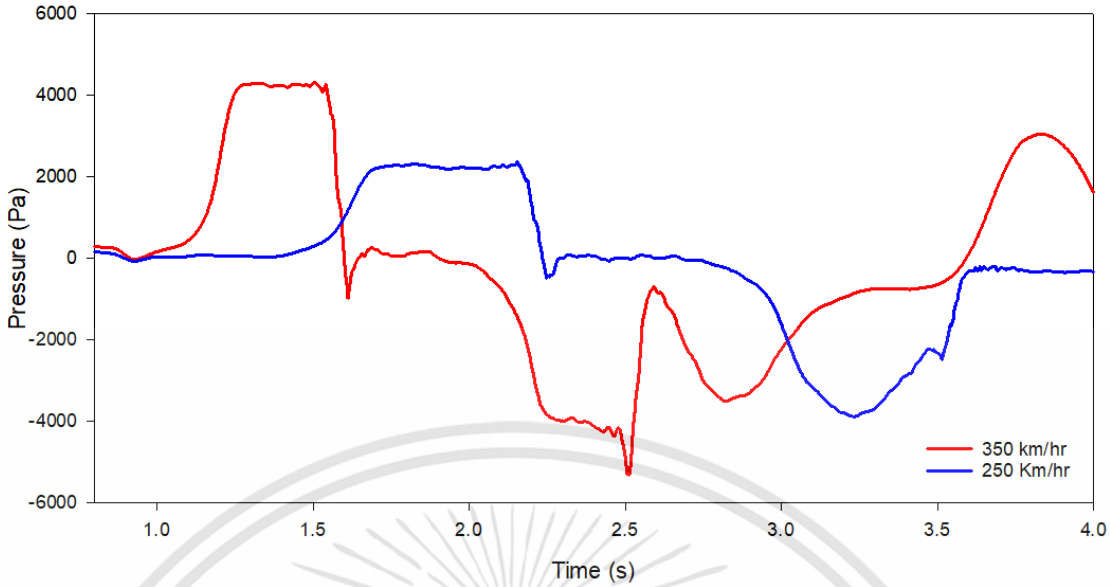
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ที่จุดเก็บผลทดสอบ

จากรูปที่ 3.32 ยกตัวอย่างด้วยการสังเกตพฤติกรรมของความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง x=0 m พบว่าวินาทีที่ 1.15 s ความดันบริเวณจมูกรถไฟเคลื่อนที่มาใกล้กับตำแหน่งเก็บผลทำให้ความดันเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นไปถึงจุดสูงสุดช่วงขาเข้าที่วินาทีที่ 1.45 s แล้วจึงมีค่าลดลงมาอย่างรวดเร็ว จากนั้นวินาทีที่ 1.47 จมูกรถไฟเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งเก็บผลส่งผลให้ความดันลดลงจนถึงจุดที่ความดันมีค่าต่ำที่สุดช่วงขาเข้า แล้วจึงค่อยๆลู่เข้าสู่ความบรรยากาศ เมื่อท้ายรถไฟเริ่มเคลื่อนที่มาใกล้กับตำแหน่งเก็บผลที่วินาทีที่ 2.43 ทำให้ความดันเริ่มมีค่าลดลง และลดลงจนถึงจุดต่ำสุดช่วงขาออกที่วินาทีที่ 2.79 แล้วจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนวินาทีที่ 2.84 ท้ายรถไฟเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งเก็บผล หลังจากนั้นความดันเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยแล้วจึงลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศเมื่อท้ายรถไฟเคลื่อนที่ห่างออกไป จากนั้นเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ไปถึงจุดเก็บผลอื่น ๆ แล้ว ความดันจะยังคงแสดงพฤติกรรมเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน เนื่องจากผลของอัตราเร็ว และการแทนที่อากาศของรถไฟ ซึ่งพฤติกรรมในตำแหน่งอื่น ๆ จะแสดงออกมาในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยแตกต่างกันที่ความสามารถในการระบายความดันจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างตำแหน่งเก็บผลและสิ่งแวดล้อม กล่าวคือถ้าตำแหน่งเก็บผลตั้งอยู่ใกล้กับสิ่งแวดล้อมมากจะทำให้ความดันสามารถถูกระบายได้ดีกว่าตำแหน่งที่ตั้งอยู่ไกลจากสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ ที่อัตราเร็ว 350 km/h และ 250 km/h

จากรูปที่ 3.33 ผลการทดลองเมื่อทำการเพิ่มอัตราเร็วเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องโดยอ้างอิงผลจากงานวิจัย [9] ทำการทดลองวิเคราะห์อัตราเร็วของรถไฟที่ส่งผลกระทบต่อหูของผู้โดยสารโดยใช้การทดลองแบบการสร้างแบบจำลอง (Physical modelling) พบว่าเมื่อรถไฟมีอัตราเร็วเพิ่มขึ้นจาก 250 km/h เป็น 350 km/h ผลของค่าความดันที่มากที่สุดมีความแตกต่างกันประมาณ 56% และจากแบบจำลองของงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความดันของจุดวัด ณ จุดเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราเร็วของรถไฟที่เข้าสู่อุโมงค์ ผลของค่าความดันที่มากที่สุดมีความแตกต่างกันประมาณ 86% โดยทั้งสองการทดลอง มีค่าความดันเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอัตราเร็ว ทั้งนี้ค่าร้อยละที่มีความแตกต่างกันสันนิฐานว่าน่าจะเกิดจากเทคนิคในการหาผลการทดลอง (Experimental and computational techniques) ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

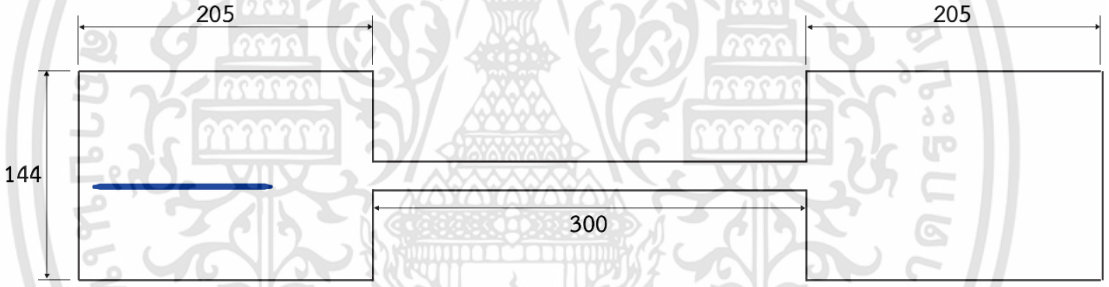
3.3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องมีความใกล้เคียงหรือพัฒนามาจากบทที่ 3.2 หลังจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้แก่ การสร้างแบบจำลอง การแบ่งกริดที่ใช้จำลอง (Meshing) การวิเคราะห์กริด (Mesh analysis) รวมไปถึงการกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลอง (Model condition) ในโปรแกรม Ansys Fluent เพื่อให้ตรงไปกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยการปรับเปลี่ยนขนาดของอุโมงค์ ตำแหน่งของรถไฟ และการเพิ่มขบวนรถไฟเข้ามาอีกหนึ่งคันในปลายอุโมงค์

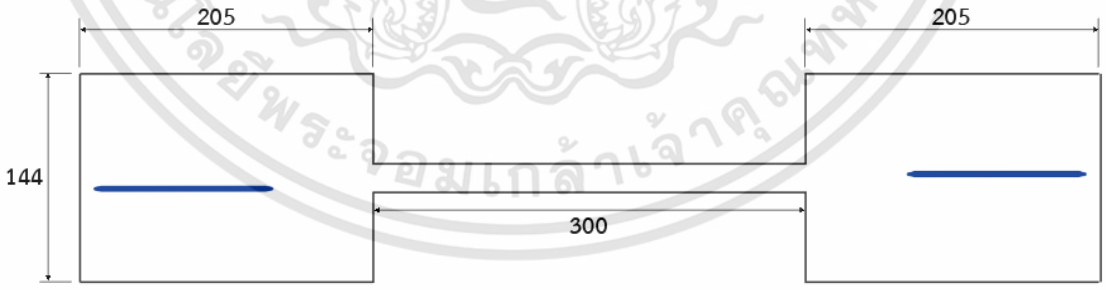
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

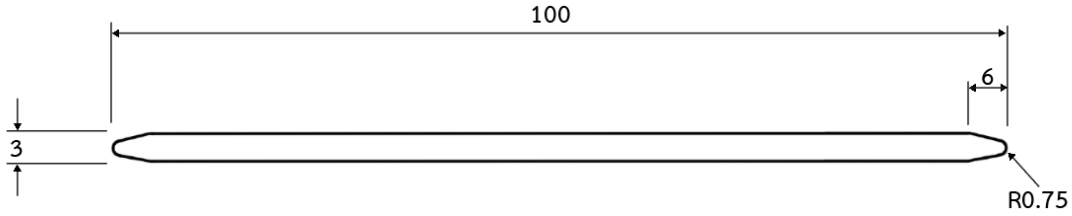
แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แบบจำลองการศึกษารถไฟขบวนเดียว และแบบจำลองการศึกษารถไฟสองขบวนสวนกันที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์ โดยขนาดของรถไฟมีความกว้างและความยาวเหมือนกับแบบจำลองรถไฟที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง คือกว้าง 3 m ยาว 100 m หัวและท้ายของขบวนรถไฟมีลักษณะรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมลบความคมของมุมด้วยรัศมีโค้ง 0.750 m ขนาดของสิ่งแวดล้อมทั้งสองด้านอุโมงค์เป็น กว้าง 144 m ยาว 205 m เนื่องจากต้องทำการเว้นระยะห่างจากหัวรถไฟ 100 m ก่อนเข้าอุโมงค์ และเว้นระยะห่างจากท้ายรถไฟอย่างน้อย 5 m ดังรูปที่ 3.34 ถึง 3.36 เนื่องจากผลของอัตราเร็วรถไฟที่เข้าสู่อุโมงค์ จากงานวิจัย [11] วิเคราะห์ถึงผลของอากาศพลศาสตร์ที่มีต่ออุโมงค์ตามอัตราเร็วของรถไฟ จึงได้ขนาดความกว้างของอุโมงค์ที่เหมาะสมกับอัตราเร็วรถไฟที่วิ่งเข้าสู่อุโมงค์ โดยขนาดของอุโมงค์รถไฟจะปรับเปลี่ยนขนาดไปตามอัตราเร็วของรถไฟดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2.11.3 ทำให้ที่อัตราเร็ว 350, 250 และ 200 km/h มีขนาดความกว้างของอุโมงค์ คือ 12.6, 12.2 และ 11.5 m ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.34 ขนาดแบบจำลองสำหรับรถไฟหนึ่งขบวน (ขนาดมีหน่วยเป็น m)

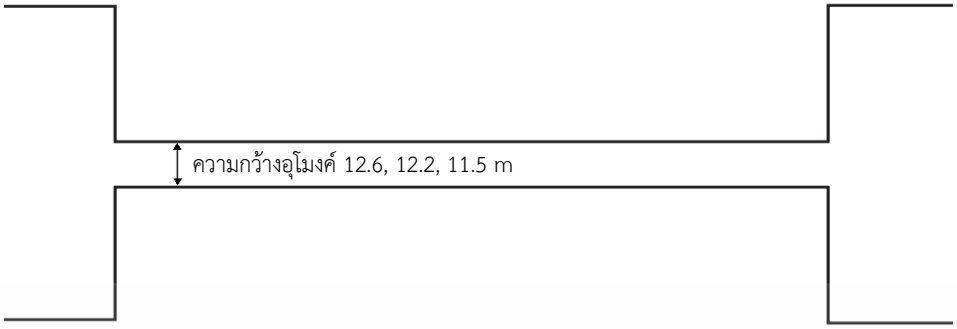


รูปที่ 3.35 ขนาดแบบจำลองสำหรับรถไฟสองขบวนสวนทางกัน (ขนาดมีหน่วยเป็น m)

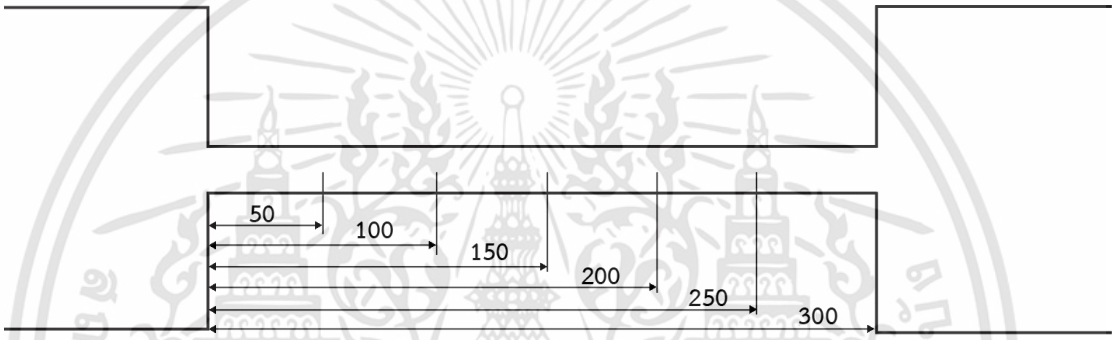


รูปที่ 3.36 ขนาดแบบจำลองรถไฟ (ขนาดมีหน่วยเป็น m)

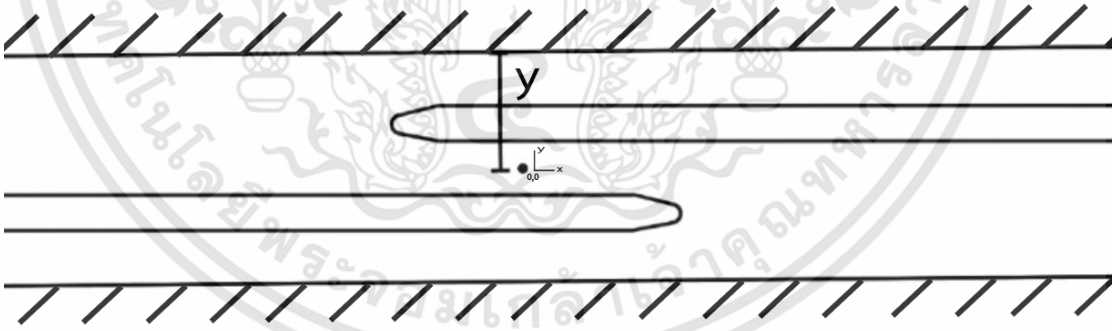
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.37 ขนาดแบบจำลองขนาดอุโมงค์
ที่อัตราเร็ว 350, 250, 200 ความกว้าง 12.6, 12.2 และ 11.5 m



รูปที่ 3.38 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองที่ระยะ x = 0, 50, 100, 200 และ 300 m



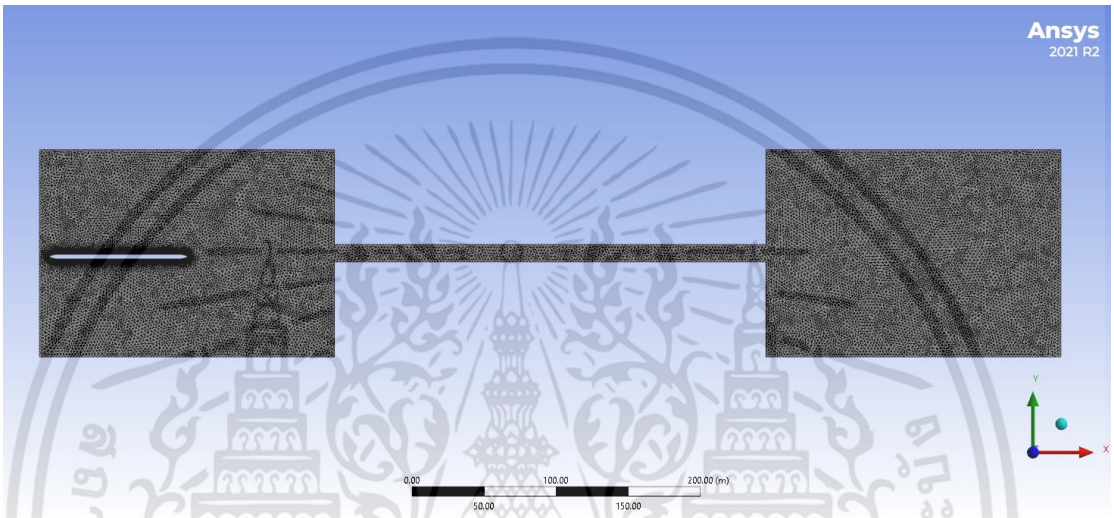
รูปที่ 3.39 ตำแหน่งจุดเก็บผลการทดลองตามแนวแกน Y m

จากรูปที่ 3.38 จุดเก็บผลทดสอบในแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟจะแบ่งช่วงออกเป็นทุกๆ 50 m เริ่มที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์จนไปถึงปลายอุโมงค์ได้แก่ x = 0, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 m ตามลำดับ รูปที่ 3.39 แสดงจุดเก็บผลทดสอบตามแนวแกน y โดยจะอยู่ที่บริเวณกลางอุโมงค์หรือมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของขนาดความกว้างอุโมงค์ในรูปที่ 3.37 ที่อัตราเร็ว 350, 250 และ 200 km/h ค่า y = 6.30, 6.10 และ 5.75 m ตามลำดับ

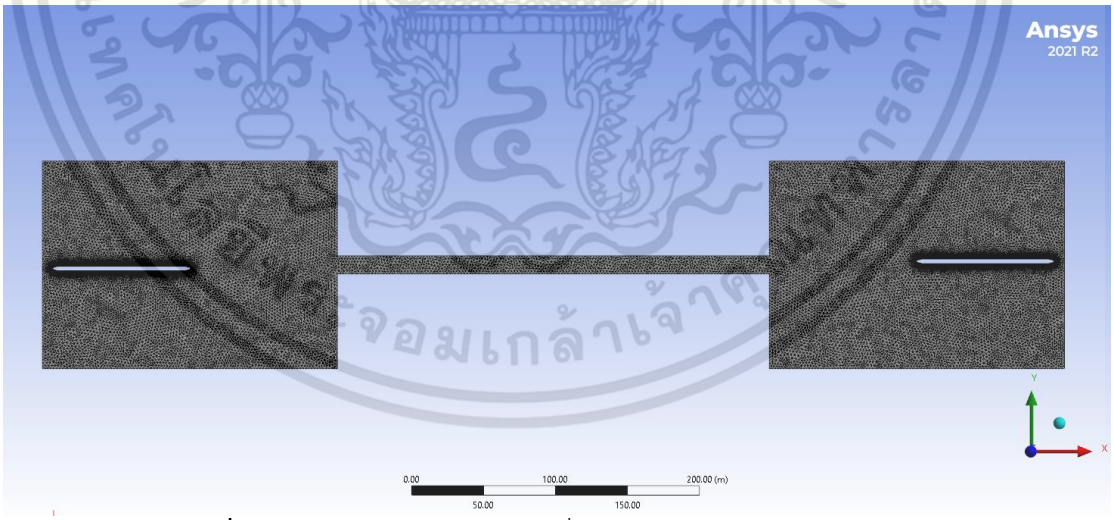
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การแบ่งกริดที่ใช้ในการศึกษา (Meshing)

การแบ่งกริดที่ใช้ในการศึกษานี้ จะใช้ขนาดกริดละเอียดเท่ากับที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง แต่เนื่องจากตำแหน่งเก็บผลทดสอบถูกย้ายมาอยู่บริเวณกลางอุโมงค์รถไฟ ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องสร้างกริดที่ขอบอุโมงค์ จึงเหลือเพียงการขึ้นกริดละเอียดขนาด 0.150 m รอบรถไฟตามรูปที่ 3.42 และกริดสิ่งแวดล้อมขนาด 2 m เพื่อให้เพียงพอต่อการทำ Dynamic mesh โดยจำนวนกริดที่ได้สำหรับรถไฟขบวนเดียวรูปที่ 3.40 เป็น 48,123 กริด และสำหรับแบบจำลองรถไฟ 2 ขบวนสวนกันรูปที่ 3.41 จำนวนกริดเป็น 63,240 กริด

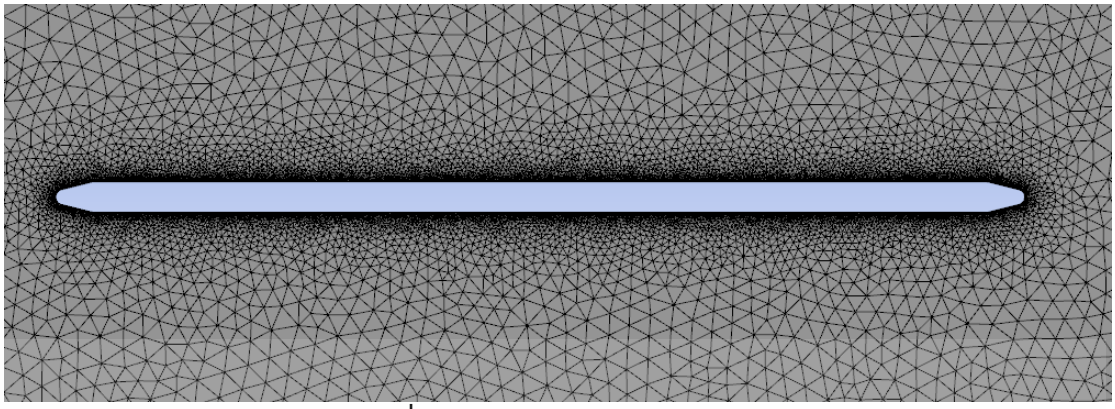


รูปที่ 3.40 แสดงภาพรวมของกริดที่ใช้ในการศึกษาแบบรถไฟคันเดียว



รูปที่ 3.41 แสดงภาพรวมของกริดที่ใช้ในการศึกษาแบบรถไฟสวนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 แสดงภาพกริดรอบรถไฟ

อ้างอิงจากหัวข้อที่ 3.1.2 การตรวจสอบคุณภาพของกริด Ansys User's Guide [12] ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาสร้าง พบว่าคุณภาพของกริดที่เราได้ทำการจำลองมีค่า Skewness ที่แสดงถึงความสมมาตรของกริดอยู่ที่ 0.074 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเยี่ยม และในส่วนของค่า Orthogonal Quality ที่ไว้บ่งบอกถึงกริดส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ามากน้อยเพียงใดมีค่าอยู่ที่ 0.954 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากเช่นกัน

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขในแบบจำลองที่ทำการศึกษา (Model condition)

ในหัวข้อนี้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองเหมือนกับหัวข้อที่ 3.2.4 เนื่องจากมีการเปลี่ยนเพียงแค่การเพิ่มของรถไฟเป็นสองขบวนสวนทางกันและการเปลี่ยนขนาดของอุโมงค์ ทั้งนี้ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงแค่สิ่งที่แตกต่างออกไปในการตั้งค่าจากหัวข้อ 3.2.4 โดยการเพิ่มขึ้นของรถไฟเป็นสองขบวนสวนทางกัน ทำให้ต้องมีการเขียนโค้ดในการเคลื่อนที่ของรถไฟขึ้นมาใหม่ ดังรูปที่ 3.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*libudf.c - Notepad

File Edit Format View Help

```
/* Moving grid problem - CG movement of a train */                    (1)

#include "udf.h"                                                      (2)

static real velx = 0.0;                                               (3)

DEFINE_CG_MOTION(train1,dt1,vel1,omega1,time1,dtime1)                 (4)
{
        NV_S(vel1, =, 0.0);                                           (5)
        NV_S(omega1, =, 0.0);                                         (6)

        velx = 69.444;                                                (7)
        vel1[0] = velx;                                               (8)
        Message ("time1 = %f, vel1[0] = %f\n", time1, vel1[0]);       (9)
}
DEFINE_CG_MOTION(train2,dt2,vel2,omega2,time2,dtime2)                 (10)
{
        NV_S(vel2, =, 0.0);                                           (11)
        NV_S(omega2, =, 0.0);                                         (12)

        velx = -69.444;                                               (13)
        vel2[0] = velx;                                               (14)
        Message ("time2 = %f, vel2[0] = %f\n", time2, vel2[0]);       (15)
}
```

รูปที่ 3. 43 แสดงการเขียนโค้ดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

จากโค้ดข้างต้นอธิบายได้ดังนี้

(1) ชื่อโค้ด

(2) ประกาศเรียกอ่านแฟ้มส่วนหัว (header file) ที่มีชื่อว่า udf.h

(3) ประกาศอัตราเร็วสถิตย์แนวแกน x เป็นศูนย์

(4) ประกาศพารามิเตอร์ของรถไฟขบวนที่หนึ่ง

(5) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นเริ่มต้นของรถไฟขบวนที่หนึ่งเป็นศูนย์

(6) ประกาศอัตราเร็วเชิงมุมเริ่มต้นของรถไฟขบวนที่หนึ่งที่เป็นศูนย์

(7) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นแนวแกน x เป็น 97.222 m/s (350 km/h), 69.444 m/s (250 km/h), 55.556 m/s (200 km/h) เพื่อให้รถไฟเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา

(8) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นของรถไฟเป็นส่วนประกอบของ Array ของอัตราเร็วแนวแกน x

(9) ประกาศคำสั่งแจ้งเตือนเวลาและอัตราเร็วของรถไฟขบวนที่หนึ่ง

(10) ประกาศพารามิเตอร์ของรถไฟขบวนที่สอง

(11) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นเริ่มต้นของรถไฟขบวนที่สองเป็นศูนย์

(12) ประกาศอัตราเร็วเชิงมุมเริ่มต้นของรถไฟขบวนที่สองที่เป็นศูนย์

(13) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นแนวแกน x เป็น -97.222 m/s (350 km/h), -69.444 m/s (250 km/h), -55.556 m/s (200 km/h) เพื่อให้รถไฟเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(14) ประกาศอัตราเร็วเชิงเส้นของรถไฟเป็นส่วนประกอบของ Array ของอัตราเร็วแนวแกน x

(15) ประกาศคำสั่งแจ้งเตือนเวลาและอัตราเร็วของรถไฟขบวนที่สอง

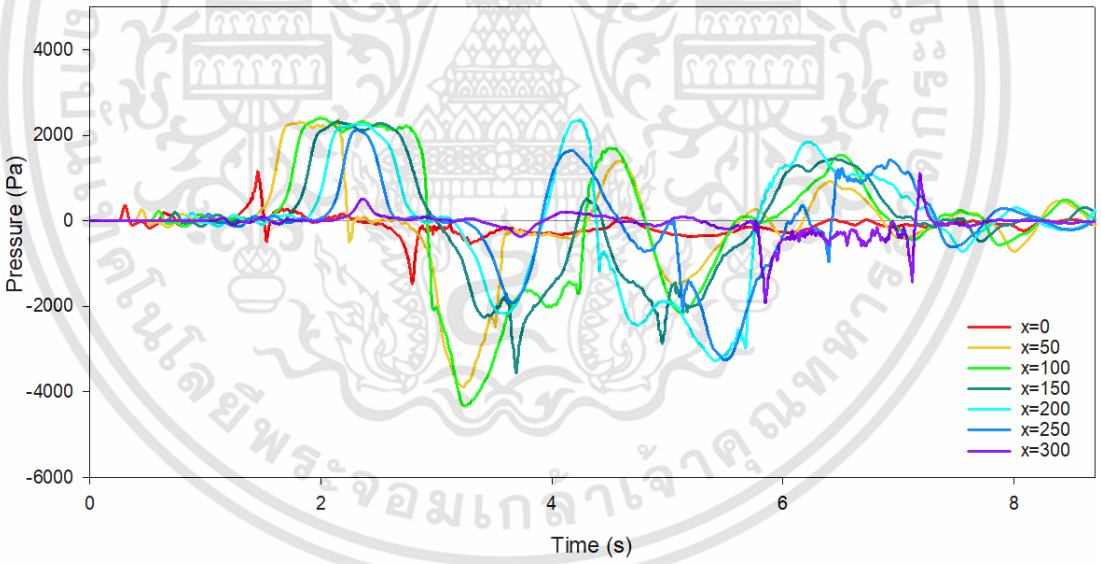
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและอภิปรายผล

จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟที่เข้าอุโมงค์ดังแสดงในบทที่ 3.3 แบ่งเป็นผลหลัก ๆ อยู่ 2 ประเภท คือ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อรถไฟเข้าอุโมงค์ขบวนเดียว และผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อรถไฟเข้าอุโมงค์ 2 ขบวนสวนทางกัน โดยงานวิจัยนี้จะทำการอภิปรายผลในรูปแบบของกราฟความดันกับเวลาประกอบกับภาพคอนทรัว โดยอิงจากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้มา

4.1 พฤติกรรมการไหลของอากาศและความดันภายในอุโมงค์รถไฟขบวนเดียว

ในงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อรถไฟเข้าอุโมงค์ขบวนเดียว มีด้วยกัน 3 ผลการวิเคราะห์ที่แปรผันตามอัตราเร็ว คือ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อรถไฟเข้าอุโมงค์ขบวนเดียวที่อัตราเร็ว 350, 250 และ 200 km/h โดยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่จะนำมาอธิบายพฤติกรรมการไหลของอากาศและความดันภายในอุโมงค์รถไฟขบวนเดียว จะเลือกที่อัตราเร็วรถไฟ 250 km/h ส่วนผลอื่นๆจะถูกนำไปวิเคราะห์ถึงปัจจัยของอัตราเร็วที่มีผลต่อความดันในภายหลัง



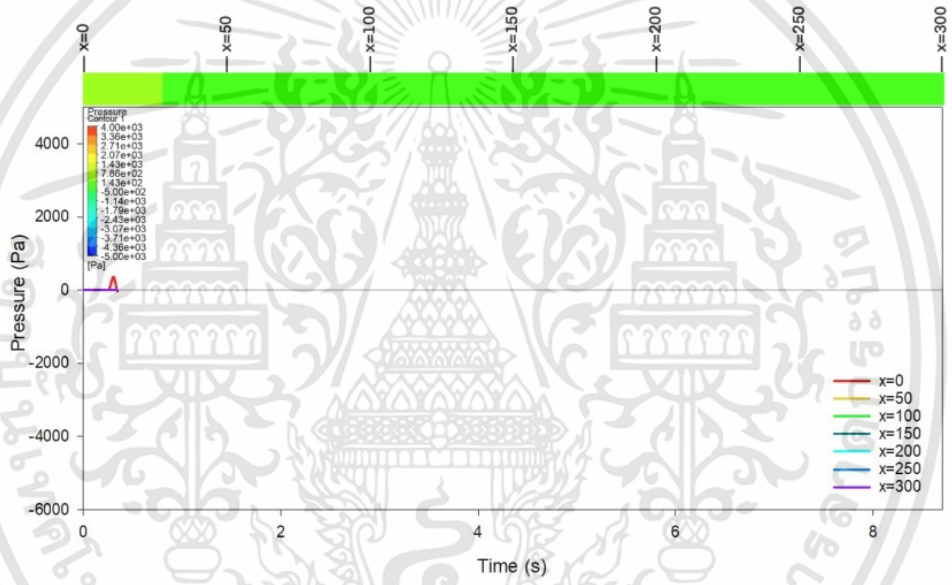
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 250 km/h

เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าอุโมงค์ขบวนเดียวด้วยอัตราเร็ว 250 km/h รูปที่ 4.1 กราฟแสดงให้เห็นถึงความดันบวก (Compression wave) และความดันลบ (Expansion wave) ที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ ณ ตำแหน่งจุดเก็บผลทั้ง 6 จุด พบว่าพฤติกรรมของความดันจะมีลักษณะเป็นคลื่น 5 ช่วง โดยเริ่มจากความดันบวก และความดันลบสลับกันไป อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของรถไฟเมื่อเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

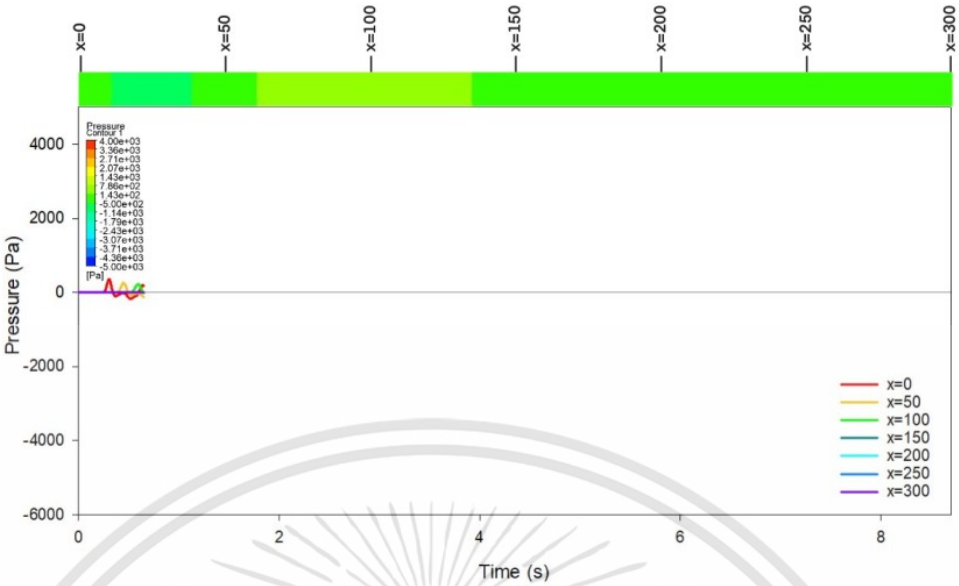
อุโมงค์ ทำให้อากาศถูกอัดตัวบริเวณด้านหน้าของรถไฟก่อให้เกิดความดันบวกที่ด้านหน้ารถไฟ ซึ่งถูกส่งต่อไปยังปลายอุโมงค์ทางออกส่งผลให้บริเวณที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านมีปริมาณอากาศน้อยมาก และเมื่อท้ายขบวนรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ เนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ลูกสูบที่ถูกกล่าวมาในหัวข้อที่ 2.8 อากาศจากภายนอกอุโมงค์จะถูกดูดเข้ามาตามการเคลื่อนที่ของท้ายขบวนรถไฟ โดยปรากฏการณ์ลูกสูบนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาการเคลื่อนที่ในอุโมงค์ของขบวนรถไฟ เปรียบเสมือนอุโมงค์เป็นกระบอกสูบ และรถไฟเป็นลูกสูบ

งานวิจัยนี้พยายามจะทำให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงลักษณะของความดันที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ควบคู่ไปกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟ โดยในรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 แสดงกราฟความดันในอุโมงค์ทั้ง 6 จุดทดสอบ และด้านบนของกราฟจะแสดงภาพคอนทัวร์ความดันในอุโมงค์ตั้งแต่วินาทีที่รถไฟยังไม่เคลื่อนที่เข้ามาจนถึงวินาทีที่รถไฟเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์

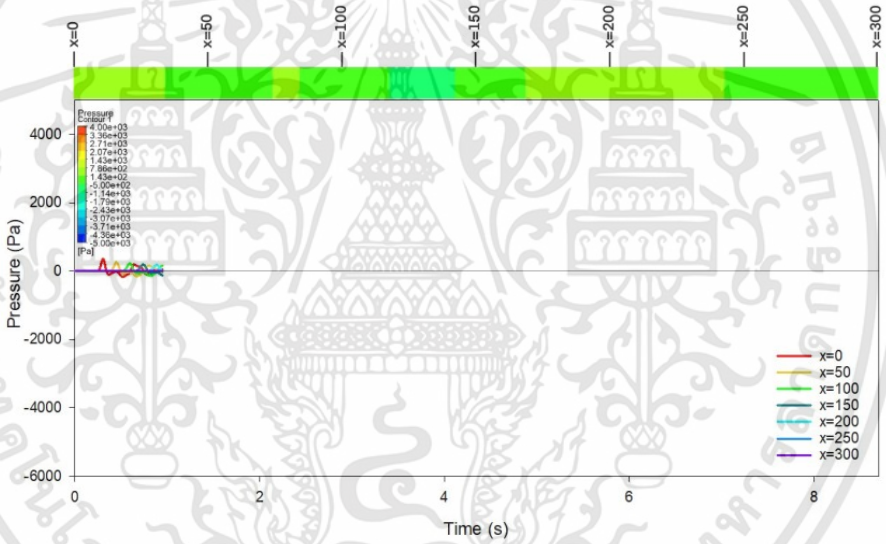


(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)



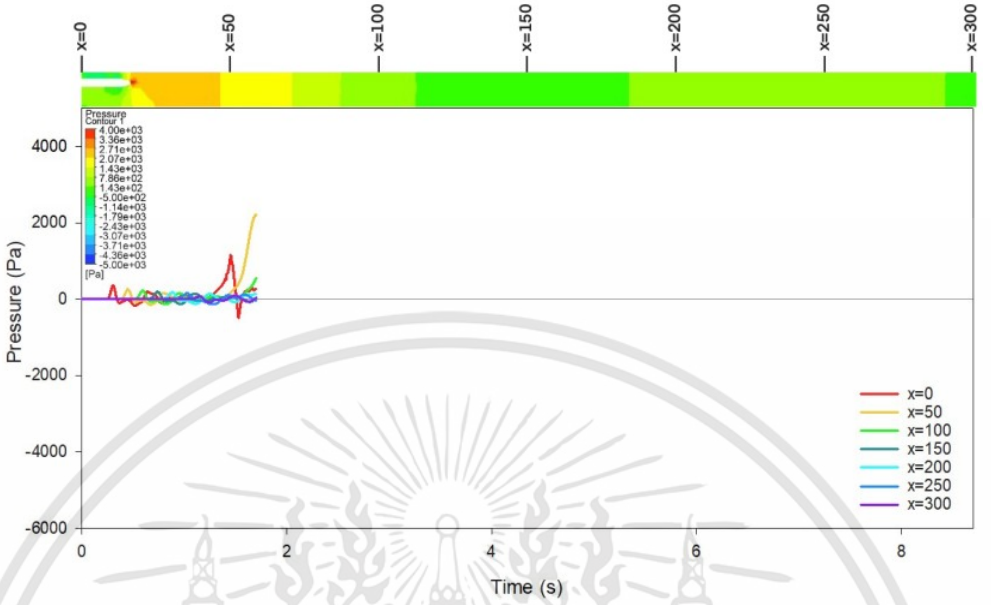
(c)

รูปที่ 4.2 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ก่อนรถไฟเข้าอุโมงค์ (a) ที่เวลา 0.35 s (b) ที่ 0.65 เวลา s (c) ที่เวลา 0.95 s

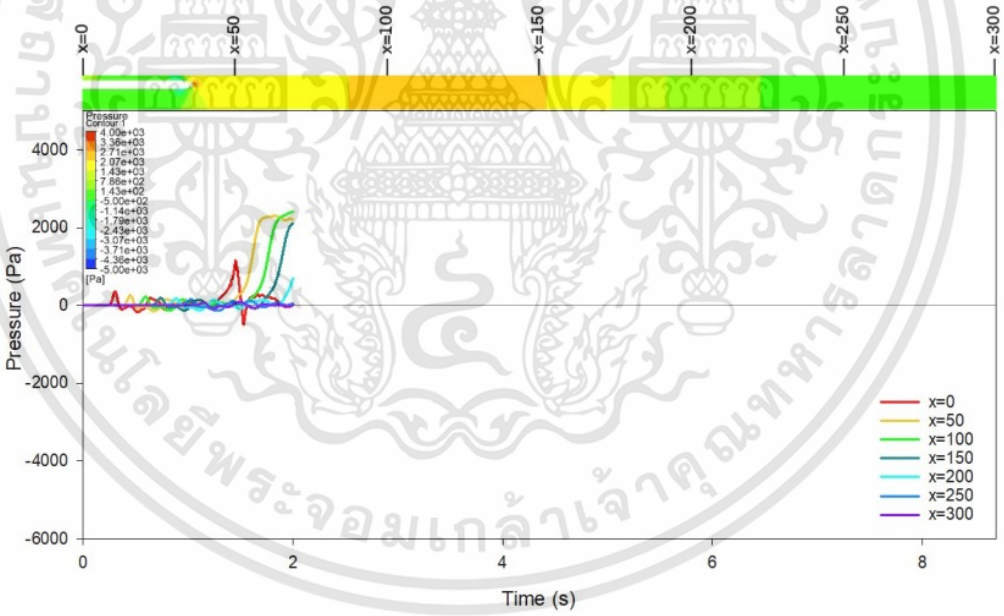
จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความดันภายในอุโมงค์เมื่อรถไฟเคลื่อนที่บริเวณสภาพแวดล้อมนอกอุโมงค์ เข้ามาใกล้อุโมงค์ระยะ 80 ถึง 30 m ก่อนถึงทางเข้าอุโมงค์ความดันอากาศจะมีค่าเป็นความดันบวกและลบสลับกันเล็กน้อย เนื่องจากในที่โล่งหรือบริเวณสภาพแวดล้อม เมื่อรถไฟเข้ามาแทนที่อากาศ อากาศจะถูกผลักออกไปทางด้านหน้าและด้านข้างของรถไฟ โดยอากาศสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดก็ได้ แต่อากาศบางส่วนถูกผลักมาทางด้านหน้าตามแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟเข้าสู่ภายในอุโมงค์ อากาศจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยผนังอุโมงค์และเคลื่อนตัวไปตามอุโมงค์

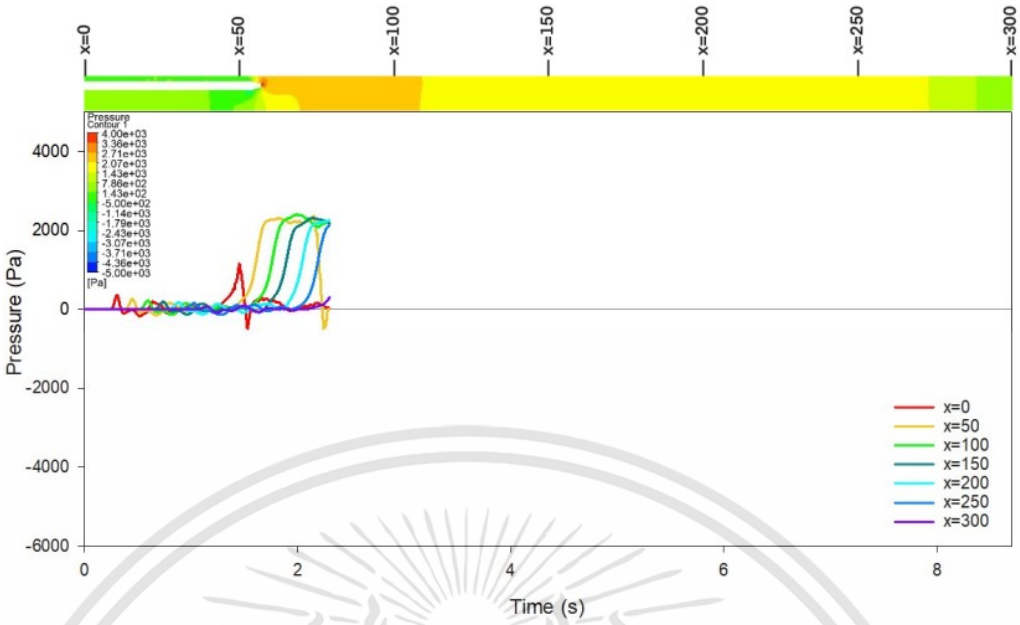


(a)



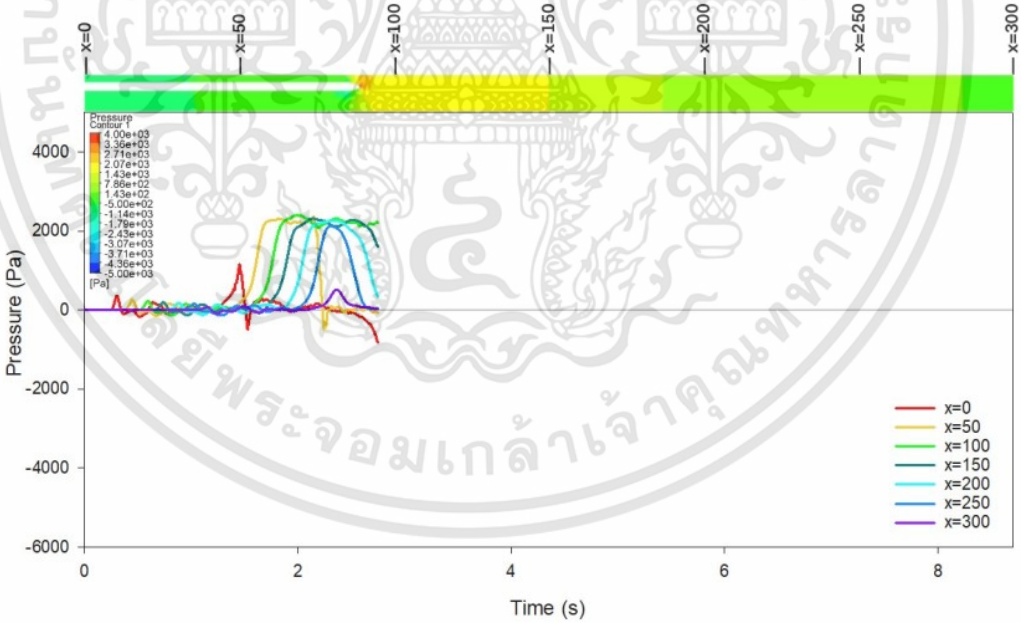
(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



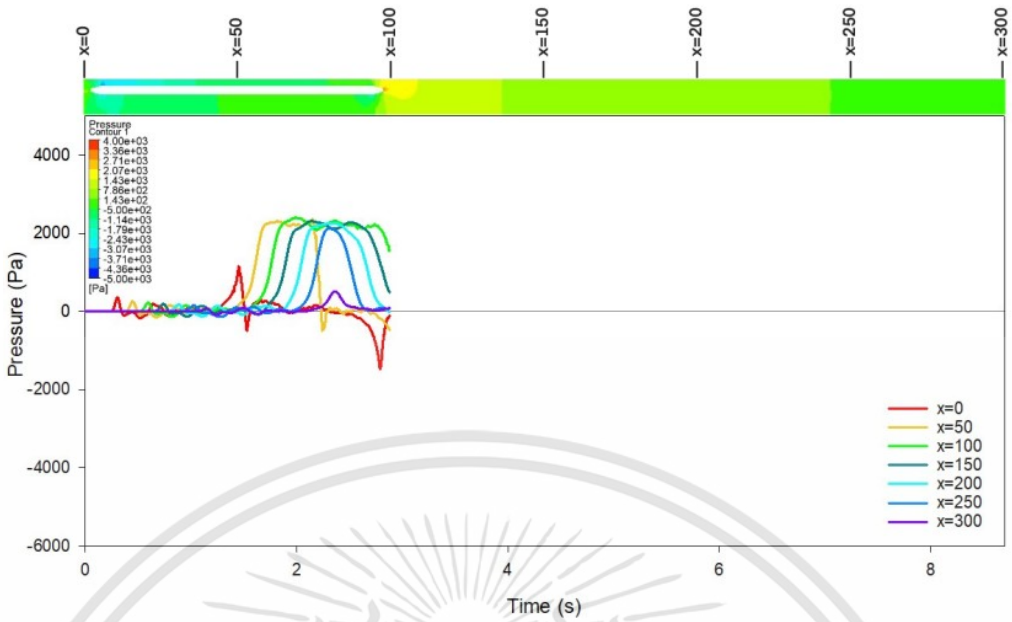
(c)

รูปที่ 4.3 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์
(a) ที่เวลา 1.70 s (b) ที่เวลา 2.00 s (c) ที่เวลา 2.30 s



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

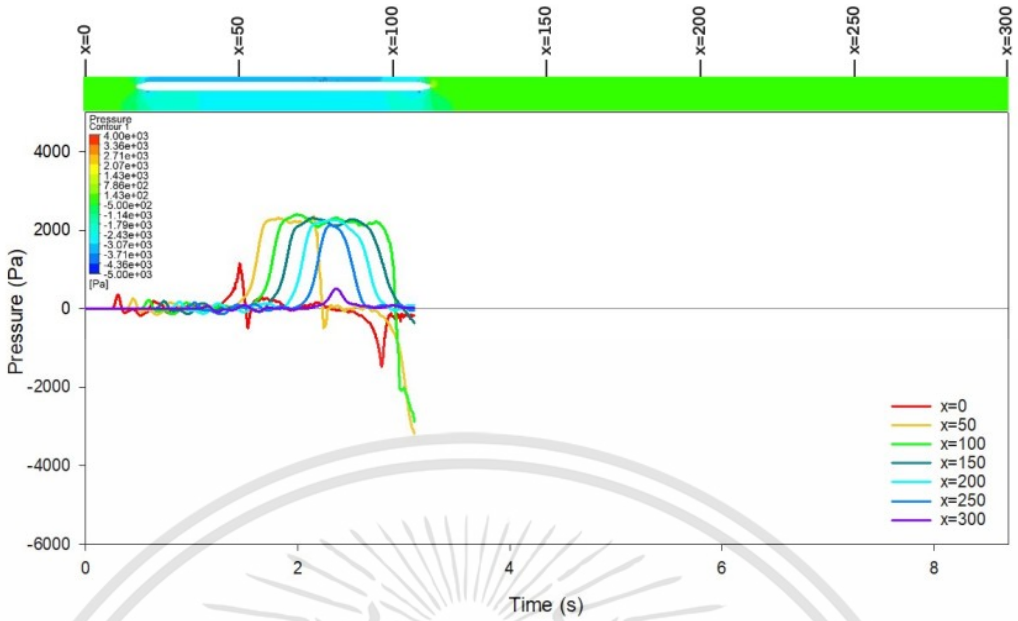


(b)

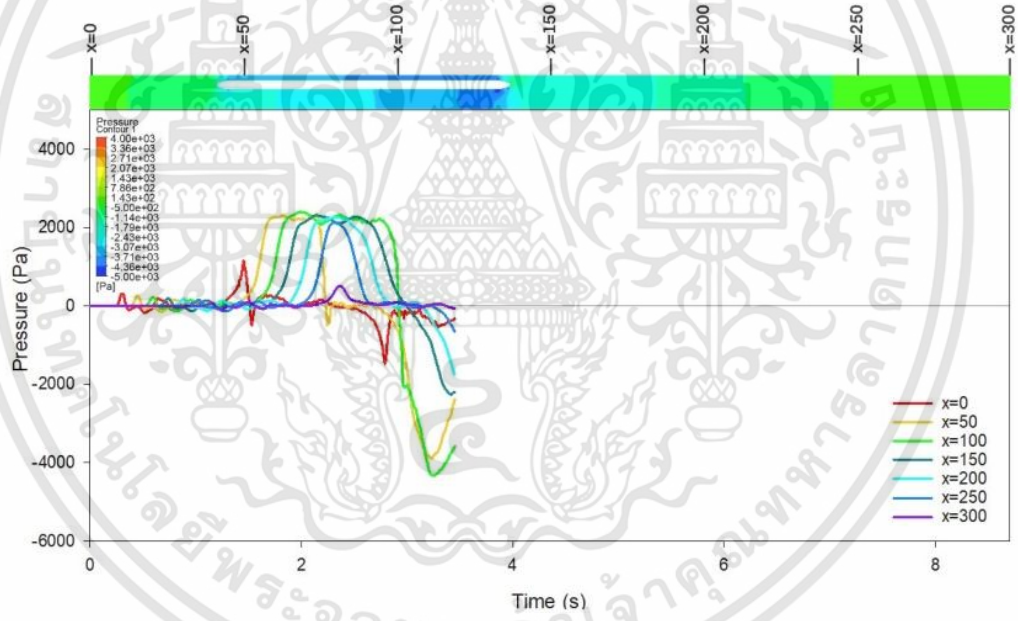
รูปที่ 4.4 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์
(a) ที่เวลา 2.75 s (b) ที่เวลา 2.88 s

รูปที่ 4.3 เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ อากาศบริเวณด้านหน้ารถไฟที่ถูกผลักด้วยการเคลื่อนที่ของรถไฟ จะก่อให้เกิดความดันบวก (Compression wave) ที่ด้านหน้าขบวนรถไฟอย่างมาก เนื่องจากอากาศถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยผนังของอุโมงค์ อากาศจะอัดตัวเป็นความดันบวกเคลื่อนตัวไปทางด้านหน้าหรือปลายทางออกอุโมงค์ ทำให้กราฟความดันที่ตำแหน่ง x=50 m ถึง x=250 m ค่อย ๆ เพิ่มตามลำดับ มีบางส่วนไหลออกทางด้านข้างรถไฟแต่เป็นปริมาณที่น้อยมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพื้นที่แคบอากาศไหลออกได้น้อย และด้วยความหนืดของของไหลกับพื้นผิวรถไฟจึงลากอากาศให้ไหลไปกับตัวรถไฟ จากรูปที่ 4.4 ตำแหน่ง x=300 m นั้นมีค่าความดันขึ้นมาเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าอากาศความดันบวกถูกผลักออกไปด้านหน้านั้นถึงปลายอุโมงค์ทางอุโมงค์เรียบร้อย หลังจากนั้นอากาศภายในอุโมงค์จะถูกอากาศจากด้านนอกอุโมงค์ไหลย้อนกลับเข้ามาแทนที่ ทำให้กราฟความดันที่ตำแหน่ง x=250 ถึง x=100 m จะค่อย ๆ ลดลงมาใกล้ 0 Pa ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



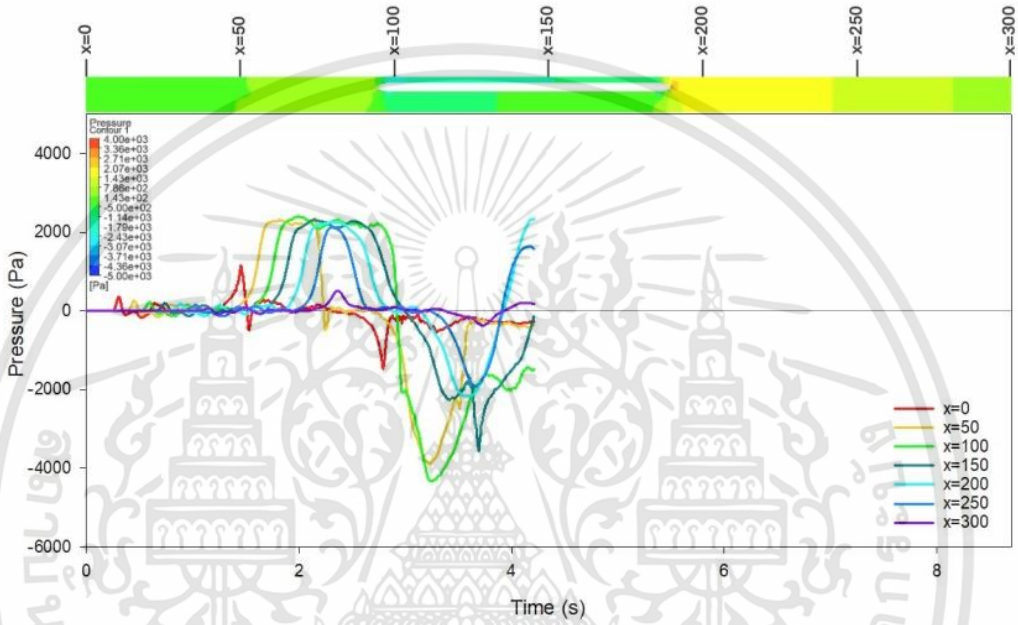
(b)

รูปที่ 4.5 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์
(a) ที่เวลา 3.10 s (b) ที่เวลา 3.45 s

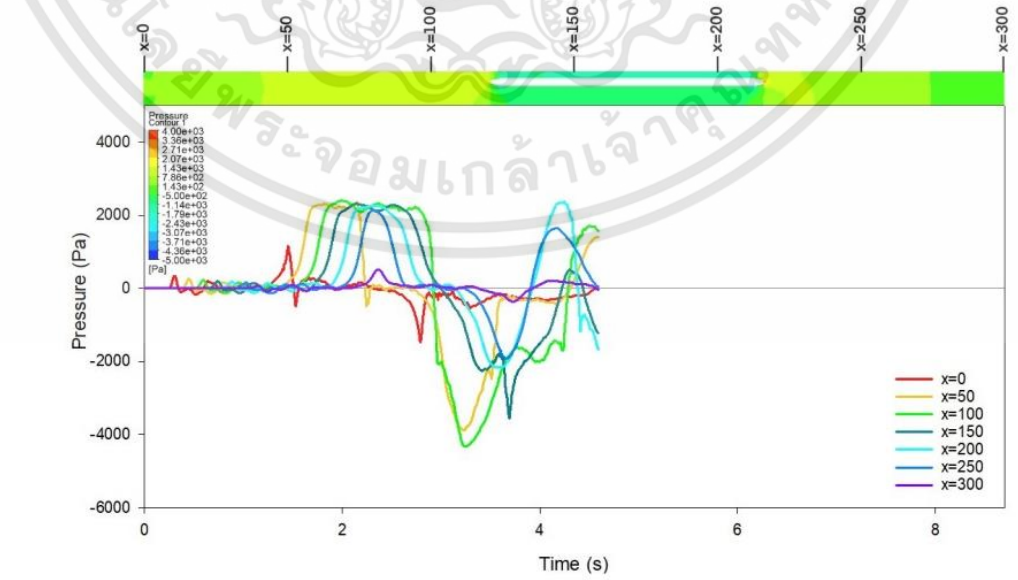
บริเวณด้านท้ายขบวนรถไฟที่กำลังเคลื่อนที่ อากาศจะถูกผลักออกไปทำให้ด้านท้ายของรถไฟเป็นบริเวณที่มีความดันต่ำหรือเป็นบริเวณที่มีความดันลบ (Expansion wave) ก่อให้แรงดูดขึ้น และเมื่อท้ายขบวนรถไฟเข้าสู่อุโมงค์อากาศจะถูกดึงให้ไหลเข้าสู่อุโมงค์ตามการเคลื่อนที่ของรถไฟ จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า บริเวณรอบๆรถไฟจะมีค่าความดันลบ เนื่องอากาศที่ถูกดูดตามมานั้นไม่สามารถเข้ามาแทนที่อากาศที่รถไฟเคลื่อนที่ได้ทัน ทำให้บริเวณที่รถไฟเคลื่อนที่หลังจากที่ท้ายขบวนรถไฟเข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์แล้วนั้น ความดันบริเวณนั้นจะเป็นลบตามไปด้วย นอกจากนั้นด้วยผลของความหนืดของของไหลส่งผลให้ความดันลบนั้นถูกส่งไปยังด้านหน้าขบวนรถไฟอีกด้วย พฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งอากาศจากภายนอกไหลเข้ามาถึงท้ายขบวนรถไฟ และแทนที่ความดันลบรอบรถไฟ จากรูปที่ 4.5 (b) ภาพคอนทัวร์ความดันแสดงให้เห็นว่า อากาศจะแทนที่ทางด้านขวาตามทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไฟมากกว่าทางด้านซ้าย เนื่องจากทางด้านซ้ายเป็นบริเวณพื้นที่ด้านติดผนังของรถไฟพื้นที่ให้อากาศเข้าจึงน้อยกว่า



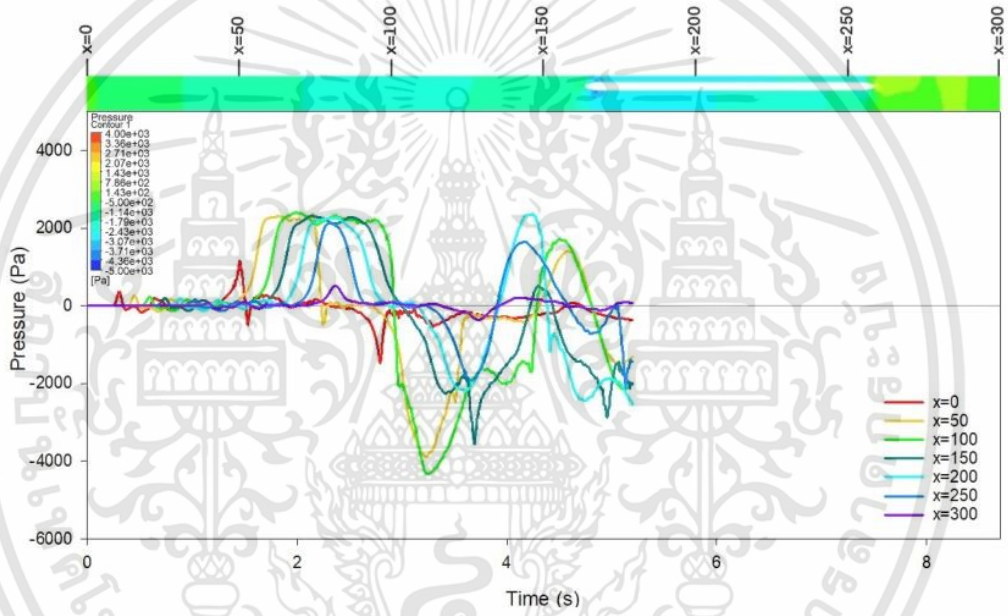
รูปที่ 4.6 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 4.21 s



รูปที่ 4.7 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 4.59 s

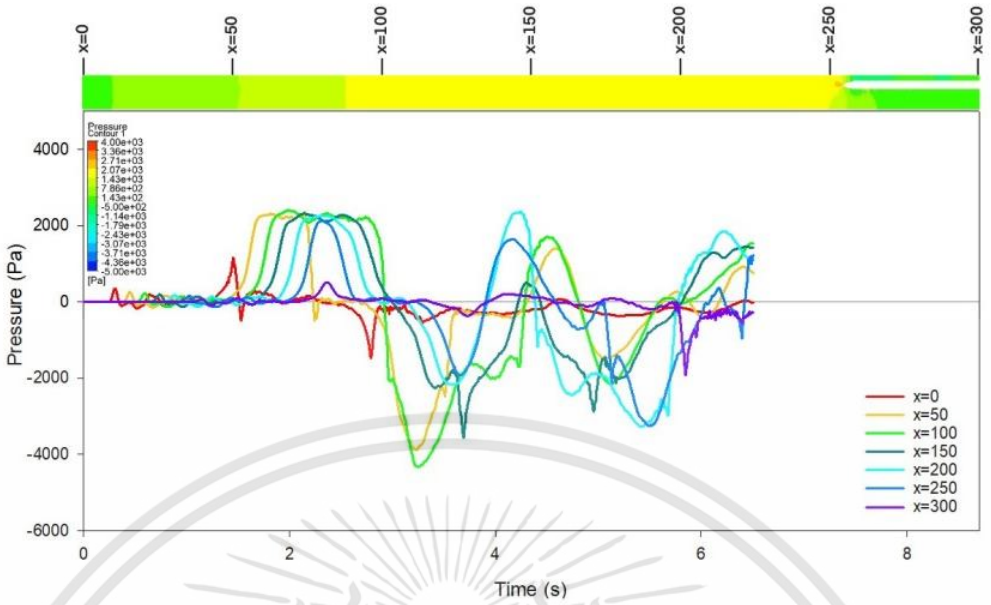
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่บอกว่าความดันลบ (Expansion wave) ถูกผลักออกไปถึงปลายอุโมงค์ คือรูปที่ 4.6 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าความดัน ณ ตำแหน่ง x=300 m มีค่าความดันเป็นลบชั่วขณะหนึ่ง เนื่องจากความดันลบเคลื่อนที่ไปถึงปลายอุโมงค์เรียบร้อยแล้ว โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นตามมาคือ อากาศบริเวณด้านหน้ารถไฟจะกลับมาถูกอัดอีกครั้งเหมือนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ จะเห็นได้ว่า กราฟความดัน x=200 และ 250 m กราฟจะเปลี่ยนทิศทางจากความดันลดลงเรื่อย ๆ มาเป็นค่าความดันที่เพิ่มขึ้น เพราะบริเวณหน้าขบวนรถไฟนั้นเกิดความดันบวก (Compression wave) ขึ้นอีกรอบ และจากรูปที่ 4.7 ทั้งกราฟความดันและภาพคอนทัวร์แสดงให้เห็นว่าความดันบวก (Compression wave) ถูกส่งไปยังด้านหลังของขบวนรถไฟด้วย เนื่องจากอากาศด้านข้างรถนั้นมีความดันที่ต่ำกว่า จึงทำให้อากาศไหลเข้าไปแทนที่ได้มากและถูกส่งออกไปยังด้านหลังของขบวนรถไฟ

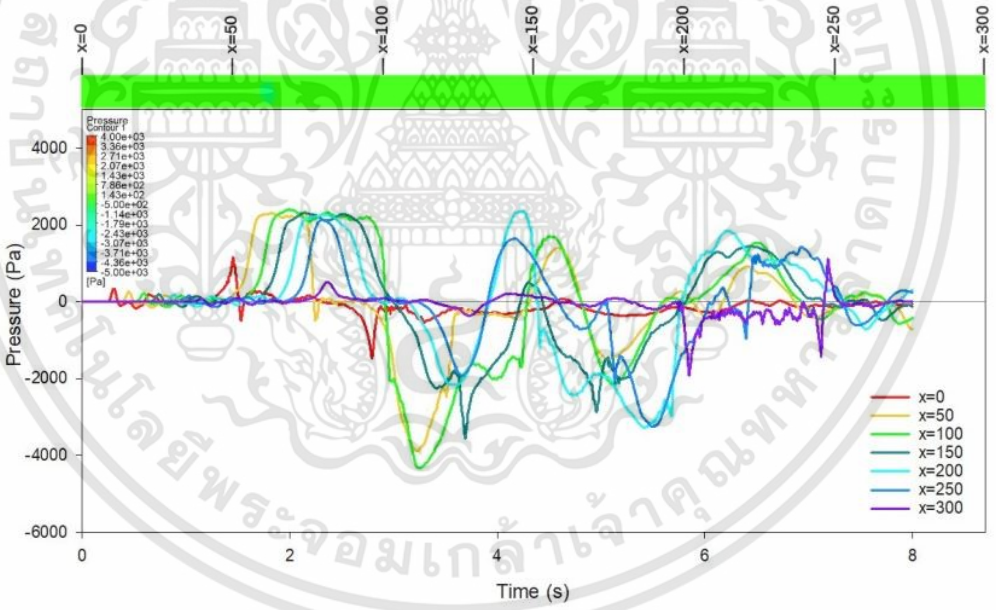


รูปที่ 4.8 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 5.20 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 6.51 s



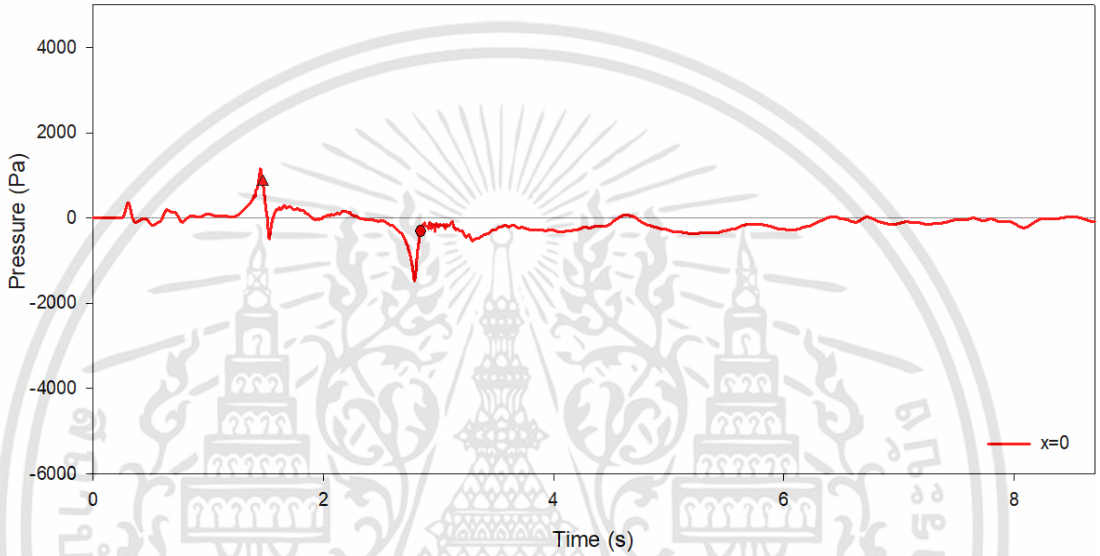
รูปที่ 4.10 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์เมื่อรถไฟออกจากอุโมงค์ ที่เวลา 8.00 s

จากรูปที่ 4.8 ภาพคอนทัวร์แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันบวกถูกส่งออกไปจะเกิดความดันลบตามมาเหมือนกับที่เคยอธิบายไปก่อนหน้า เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ใกล้ถึงบริเวณทางออกของอุโมงค์ อากาศทั้งหน้าขบวนรถไฟและอากาศภายนอกอุโมงค์ จะกลับเข้ามาผลักความดันลบออกจากอุโมงค์ ทำให้ในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าความดันกลับมาบวกอย่างมากบริเวณด้านท้ายของรถไฟ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศจากบริเวณทางเข้าอุโมงค์ไหลเข้ามาแทนที่อากาศภายในอุโมงค์แต่ถูกตัวรถไฟกั้นทางออกของอากาศไว้หรือมีพื้นที่ให้ออกน้อยมากๆ ทำให้อากาศเกิดการอัดตัวเป็นความดันบวกบริเวณท้ายขบวนรถไฟ และค่อยๆลดลงจนอากาศทั้งหมดไหลออกจากอุโมงค์ได้ โดยในรูปที่ 4.10 กราฟความดันที่ตำแหน่ง x=300 นั้นจะสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากรถไฟได้เคลื่อนที่พ้นตำแหน่ง x=300 หรือปลายอุโมงค์แล้ว ความดันบวกจึงไหลออกสู่ทางปลายและเข้าไปแทนที่อากาศที่ท้ายขบวนดูดเข้าไปอีกด้วย

4.1.1 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) ที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m

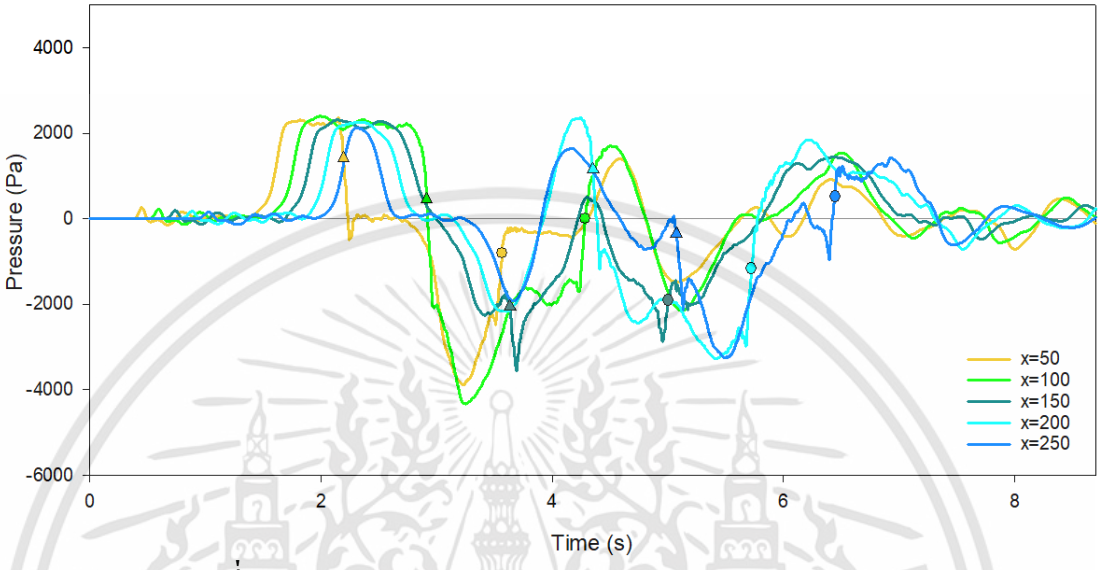
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m

ความดันที่ตำแหน่งทางเข้าอุโมงค์ x = 0 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
1.15	ความดันบริเวณจมูกรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=0 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
1.45	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=0 m ความดันถึงจุดสูงสุดซึ่งมีค่า 1150.58 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามากเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง
1.47	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=0 m ความดันมีค่า 935.49 Pa
2.79	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง x=0 m ความดันถึงจุดต่ำสุดซึ่งมีค่า -1487.76 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.84	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=0 m ความดันมีค่า -369.32 Pa หลังจากนั้นความดันเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ค่อยมีนัยสำคัญ และมีพฤติกรรมลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ

4.1.2 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งภายในอุโมงค์ x = 50, 100, 150, 200, 250 m



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) ตำแหน่งภายในอุโมงค์ x = 50, 100, 150, 200, 250 m

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 50 m

ความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 50 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
1.38	ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=50 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
2.15	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=50 m ความดันถึงจุดสูงสุดจุดแรกซึ่งมีค่า 2370.54 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามาก เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง
2.19	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=50 m ความดันมีค่า 1420.37 Pa เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=50 m จุดเก็บความดันเก็บค่าความดันลดลงเนื่องจากความดันด้านข้างของรถไฟยิ่งห่างจากจมูกรถไฟมากเท่าไรความดันยิ่งมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=50 m มาสักพัก ความดันด้านข้างของรถไฟลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ส่งผลให้จุดเก็บความดันได้รับความดันลบที่อยู่ด้านข้างของรถไฟ
3.23	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง x=50 m ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -3887.48 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.56	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=50 m ความดันมีค่า -801.87 Pa ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=50 m ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันที่มีนัยสำคัญครั้งที่สอง
4.58	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า 1407.51 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์อีกครั้ง หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลงเช่นกัน
5.07	ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -1480.22 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นความดันมีท่าทีที่จะค่อยๆลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ
6.41	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สามซึ่งมีค่า 920.03 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง และลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศอีกครั้ง

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 100 m

ความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 100 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
1.51	ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=100 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
1.99	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=100 m ความดันถึงจุดสูงสุดจุดแรกซึ่งมีค่า 2395.57 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามาก เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง
2.91	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=100 m ความดันมีค่า 447.44 Pa เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=100 m จุดเก็บความดันเก็บค่าความดันลดลงเนื่องจากความดันด้านข้างของรถไฟยิ่งห่างจากจมูกรถไฟมากเท่าไรความดันยิ่งมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=100 m มาสักพัก ความดันด้านข้างของรถไฟลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ส่งผลให้จุดเก็บความดันได้รับความดันลบที่อยู่ด้านข้างของรถไฟ
3.25	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง x=100 m ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -4431.24 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
4.28	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=100 m ความดันมีค่า -3.24 Pa ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=100 m ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันที่มีนัยสำคัญครั้งที่สอง
4.51	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า 1710.51 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์อีกครั้ง หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.12	ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -2162.55 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นความดันมีท่าทีที่จะค่อยๆลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ
6.50	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สามซึ่งมีค่า 1538.02 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง และลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศอีกครั้ง

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 150 m

ความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 150 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
1.67	ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=150 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
2.14	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=150 m ความดันถึงจุดสูงสุดจุดแรกซึ่งมีค่า 2309.128 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามาก เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง
3.63	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=150 m ความดันมีค่า -1998.9 Pa เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=150 m จุดเก็บความดันเก็บค่าความดันลดลงเนื่องจากความดันด้านข้างของรถไฟยิ่งห่างจากจมูกรถไฟมากเท่าไรความดันยิ่งมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อรถไฟผ่านตำแหน่ง x=150 m มาสักพัก ความดันด้านข้างของรถไฟลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ส่งผลให้จุดเก็บความดันได้รับความดันลบที่อยู่ด้านข้างของรถไฟ
3.69	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง x=150 m ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -3552.42 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
4.29	ความดันถึงจุดเปลี่ยนเว้า และเริ่มมีค่าลดลงอีกครั้ง
4.96	ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -2871.15 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
5.00	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=150 m ความดันมีค่า -1986.8 Pa
6.43	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า 1839.50 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง และลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศอีกครั้ง

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 200 m

ความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 200 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.83	ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=200 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
2.36	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=200 m ความดันถึงจุดสูงสุดจุดแรกซึ่งมีค่า 2244.75 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามาก เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง
3.61	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่ง x=150 m ความดันที่ตำแหน่ง x=200 mถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -2168.87 Pa เนื่องจากความดันลบที่ถูกส่งมาจากตำแหน่ง x=150 m
4.25	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า 2371.24 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลงเช่นกัน
4.35	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=200 m ความดันมีค่า 1203.35 Pa
5.40	ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -3279.59 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
5.72	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=200 m ความดันมีค่า -1317.602 Pa หลังจากนั้นความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=200 m ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันที่มีนัยสำคัญครั้งที่สอง
6.20	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สามซึ่งมีค่า 1839.50 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง และลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ

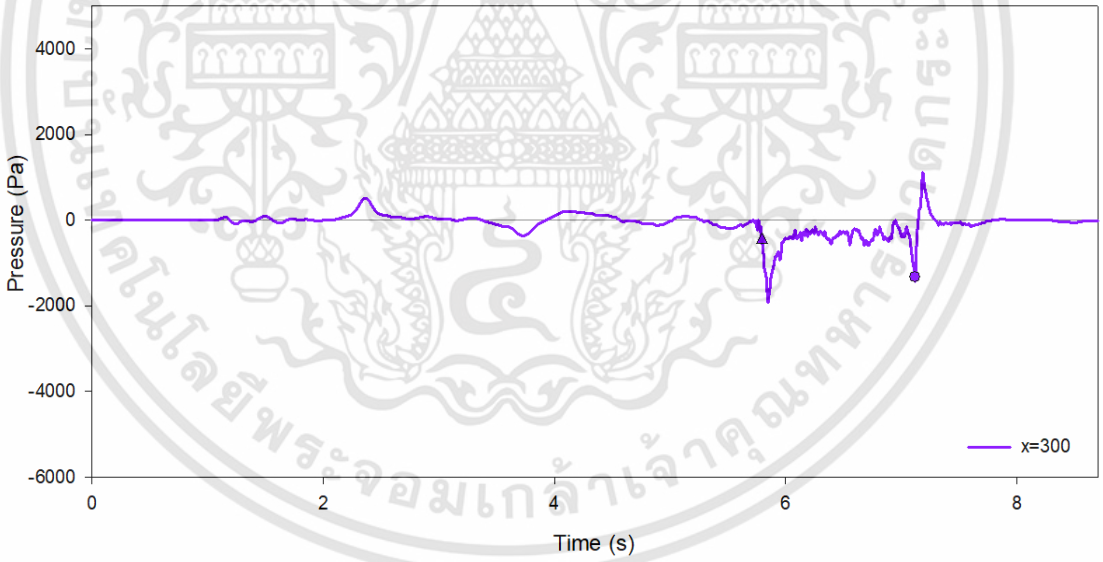
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 250 m

ความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 250 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
1.97	ความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=250 m เป็นจุดเริ่มต้นของการเพิ่มขึ้นของความดัน
2.31	เมื่อรถไฟเข้าใกล้ตำแหน่ง x=250 m ความดันถึงจุดสูงสุดจุดแรกซึ่งมีค่า 2121.38 Pa เนื่องจากอากาศบริเวณด้านหน้าของจมูกรถไฟทำให้เกิดความดันบวกที่มีค่ามาก เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเก็บค่าความดัน หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.61	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่ง x=200 m ความดันที่ตำแหน่ง x=250 m ถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -1918.28 Pa เนื่องจากความดันลบที่ถูกส่งมาจากตำแหน่ง x=200 m
4.17	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า 1647.41 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลงเช่นกัน
5.07	จมูกรถไฟถึงตำแหน่ง x=250 m ความดันมีค่า 275.81 Pa
5.49	ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -3257.03 Pa หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
6.44	ท้ายรถไฟถึงตำแหน่ง x=250 m ความดันมีค่า 396.4458 Pa หลังจากนั้นความดันจากการเคลื่อนที่ของรถไฟถูกส่งมาถึงตำแหน่ง x=250 m ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความดันที่มีนัยสำคัญครั้งที่สอง
6.92	ความดันถึงจุดสูงสุดจุดที่สามซึ่งมีค่า 1425.39 Pa เนื่องจากเกิดการบีบอัดมวลอากาศภายในอุโมงค์ในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ใกล้กับปากทางออกของอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันจึงมีค่าลดลง และลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ

4.1.3 พฤติกรรมของความดันที่ตำแหน่งทางออกอุโมงค์ x = 300 m



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ความดัน (Pa) กับเวลา (s) ที่ตำแหน่งทางออกอุโมงค์ x = 300 m

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงรายละเอียดความดันที่ตำแหน่งอุโมงค์ x = 300 m

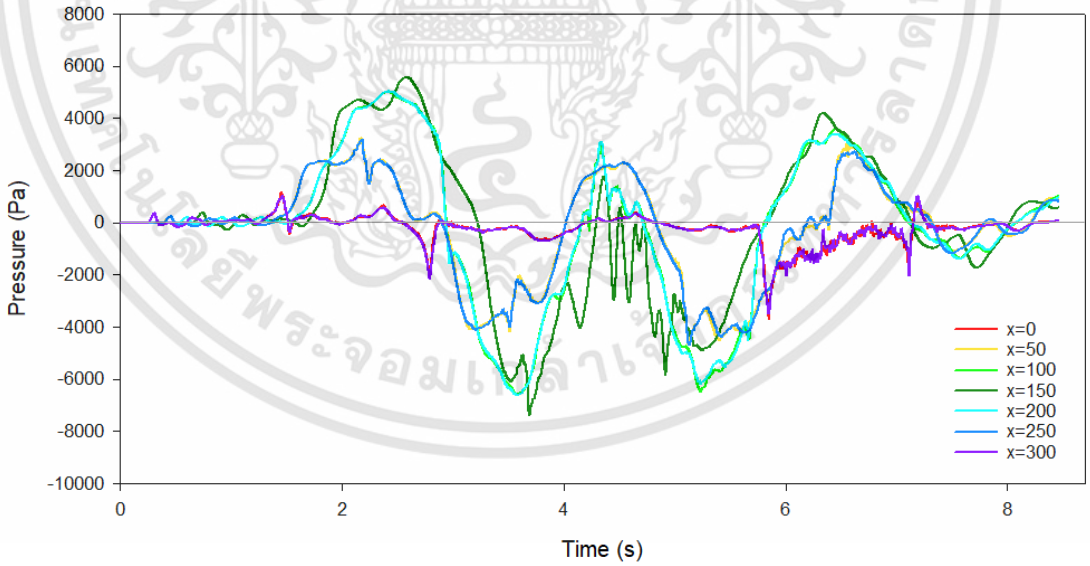
ความดันที่ตำแหน่งทางออกอุโมงค์ x = 300 m	
เวลา (s)	พฤติกรรม
5.72	ความดันเริ่มลดลง หลังจากที่ความดันมีค่าใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.85	เมื่อรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่ง x=300 m ความดันถึงจุดต่ำสุดจุดแรกซึ่งมีค่า -1923.40 Pa เนื่องจากความดันลบบริเวณด้านข้างของรถไฟ หลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้น และมีค่ากลับมาใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศอยู่ช่วงหนึ่ง
7.12	ความดันลดลงอีกครั้งเมื่อท้ายรถไฟเริ่มเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งนี้ และถึงจุดต่ำสุดจุดที่สองซึ่งมีค่า -1432.439 Paหลังจากนั้นความดันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
7.17	ความดันถึงจุดสูงสุด หลังจากที่ท้ายรถไฟเคลื่อนที่ออกจากปากทางออกของอุโมงค์ได้สักพัก ซึ่งความดันที่ตำแหน่งนี้มีค่า 1125.129 Pa หลังจากนั้นจึงลู่เข้าสู่ความดันบรรยากาศ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ห่างออกไปจากปากทางออกของอุโมงค์ตามลำดับ

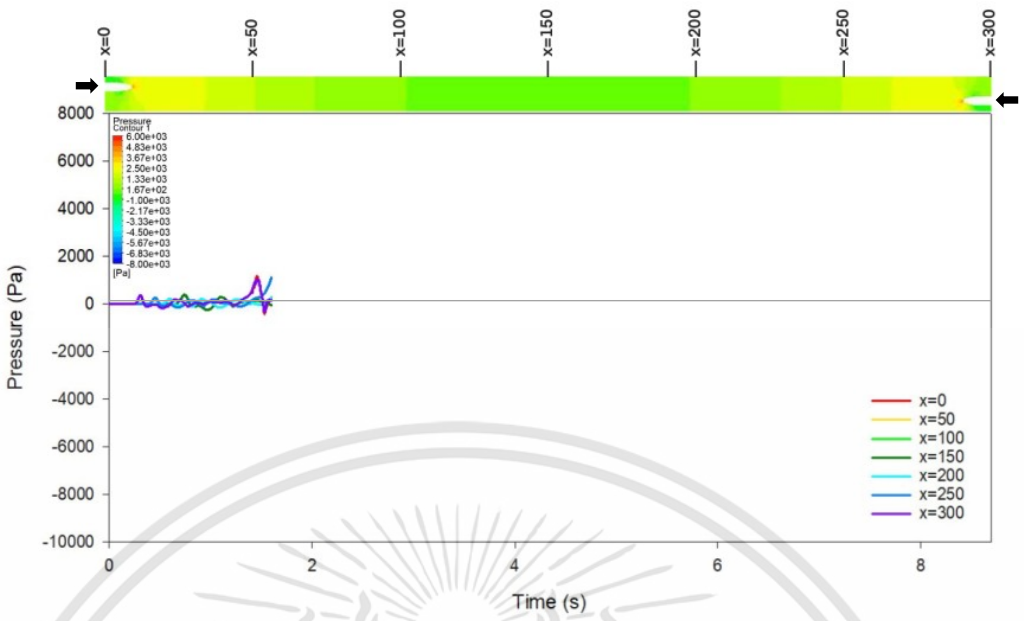
4.2 ขนาดของความดันในอุโมงค์ เมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกัน

ในบทนี้เป็นผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกันในอุโมงค์ มีผลการวิเคราะห์ที่แปรผันตามการเคลื่อนที่ 3 อัตราเร็ว คือ ผลการวิเคราะห์ด้วยอัตราเร็ว 200, 250 และ 300 km/h เพื่อให้เห็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่แตกต่างกับรถไฟเข้าอุโมงค์ขบวนเดียว จะเลือกผลการวิเคราะห์ความดันด้วยรถไฟที่มีอัตราเร็ว 250 km/h มาอธิบายพฤติกรรมการไหลของอากาศ และความดันภายในอุโมงค์ โดยจากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นถึงความดันที่เกิดขึ้นภายในอุโมงค์ ณ จุดเก็บผลทั้ง 6 จุด พบว่าจะสามารถแบ่งช่วงความดันออกเป็น 5 ช่วงใหญ่ ๆ คล้ายกับกรณีรถไฟเข้าอุโมงค์คันเดียวในบทที่ 4.1

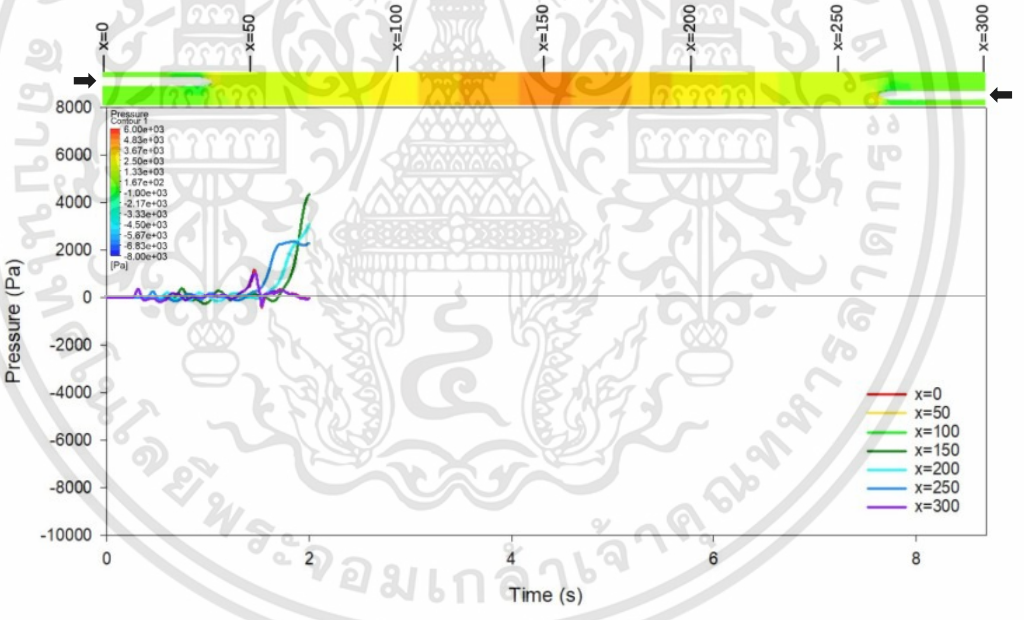


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับเวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์สองขบวนสวนทางกัน ที่อัตราเร็ว 250 km/h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

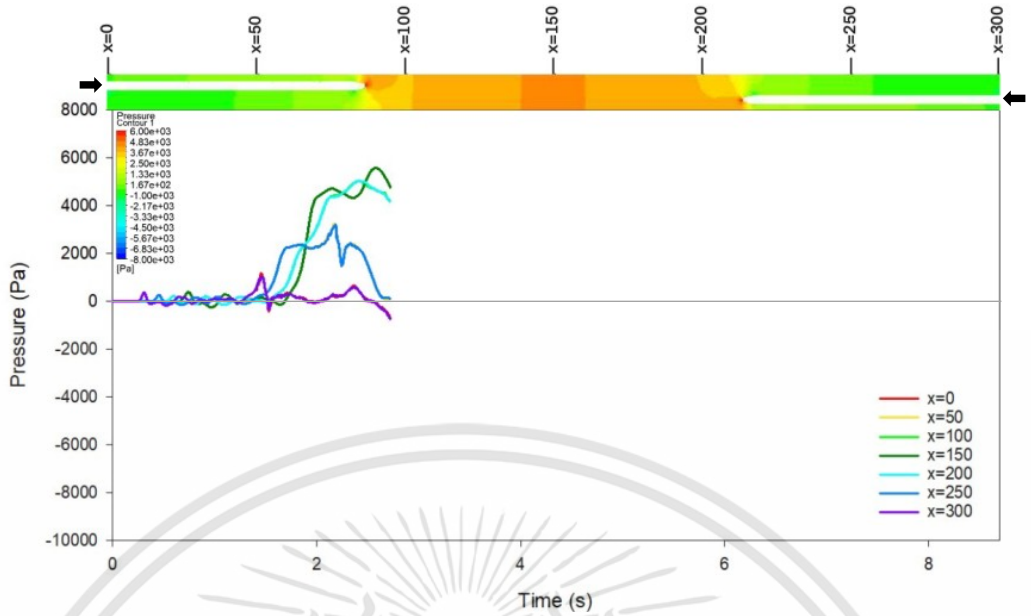


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

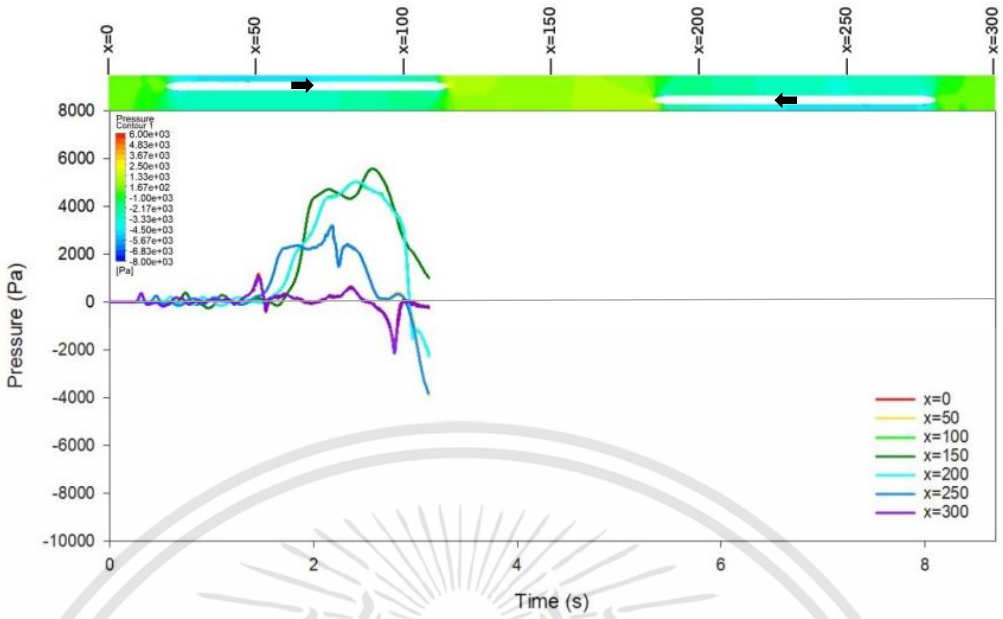


(c)

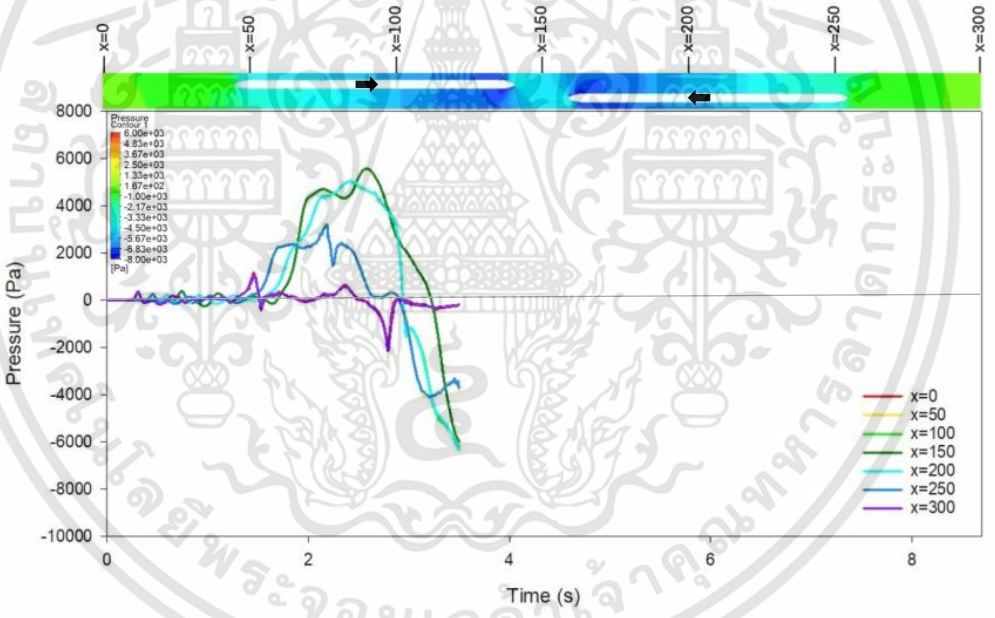
รูปที่ 4.15 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ เมื่อรถไฟทั้งสองขบวนเริ่มเข้าอุโมงค์ (a) ที่เวลา 1.60 s (b) ที่เวลา 2.00 s (c) ที่เวลา 2.72 s

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงความดันภายในอุโมงค์เมื่อรถไฟทั้งคู่เคลื่อนที่บริเวณเข้ามาในอุโมงค์ที่ระยะ 0 ถึง 100 m และ 200 ถึง 300 m เมื่อรถไฟเข้ามาแทนที่อากาศ อากาศจะถูกผลักออกไปทางด้านหน้าและด้านข้างของรถไฟ โดยอากาศสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดก็ได้ แต่อากาศบางส่วนถูกผลักมาทางด้านหน้าตามแนวการเคลื่อนที่ของรถไฟเข้าสู่ภายในอุโมงค์ อากาศจะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่โดยผนังอุโมงค์ให้เคลื่อนตัวไปตามอุโมงค์ อากาศบริเวณด้านหน้ารถไฟที่ถูกผลักด้วยการเคลื่อนที่ของรถไฟ จะก่อให้เกิดความดันบวก (Compression wave) ที่ด้านหน้าขบวนรถไฟอย่างมาก อากาศจะอัดตัวเป็นความดันบวกเคลื่อนตัวไปทางด้านหน้าสู่ปลายทางออกอุโมงค์ ทำให้กราฟความดันทุกตำแหน่ง ยกเว้นที่ x=0 และ x=300 m จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากที่ตำแหน่ง x=0 และ x=300 m เป็นตำแหน่งที่ถ่ายเทอากาศได้ดีจึงได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย มีอากาศบางส่วนไหลออกทางด้านข้างรถไฟแต่เป็นปริมาณที่น้อยมากเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีพื้นที่แคบทำให้อากาศไหลออกได้น้อย หลังจากนั้นอากาศภายในอุโมงค์จะถูกอากาศจากด้านนอกอุโมงค์ที่ไหลตามมากับรถไฟขบวนทางขวา ทำให้กราฟความดันทุกตำแหน่งค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

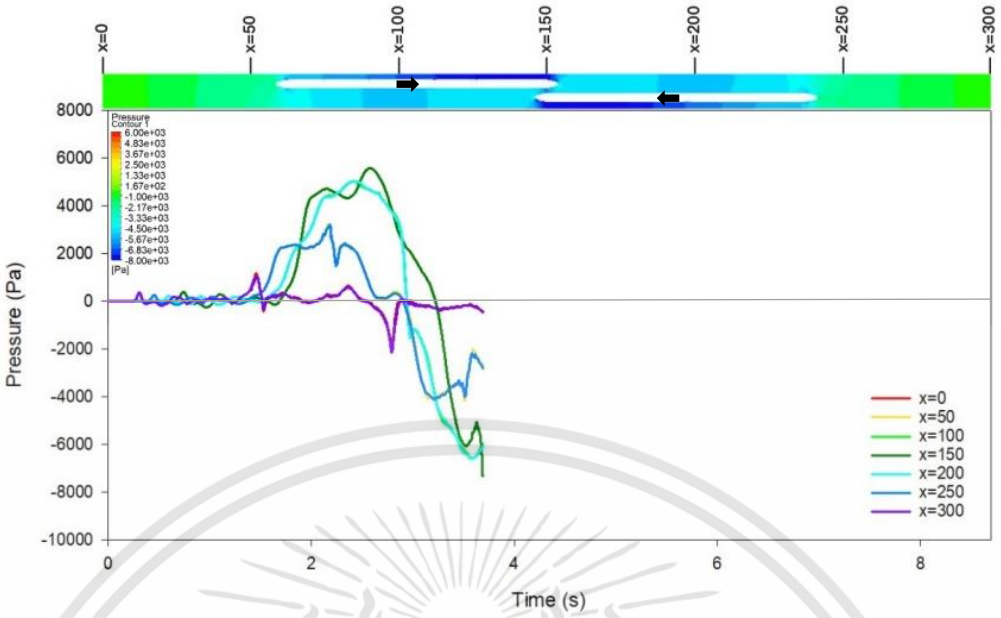


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



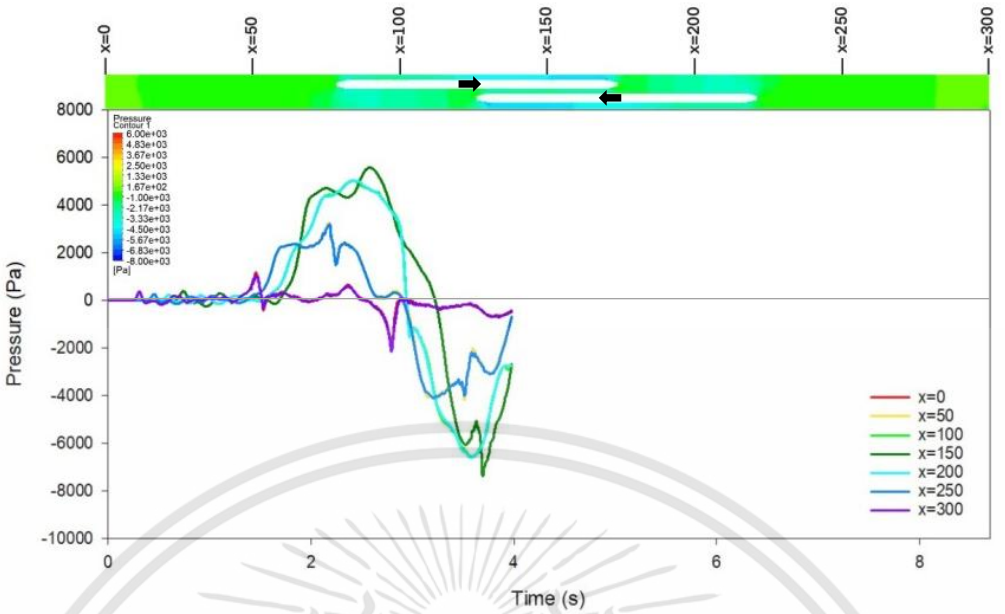
(c)

รูปที่ 4.16 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์
(a) ที่เวลา 3.13 s (b) ที่เวลา 3.50 s (c) ที่เวลา 3.69 s

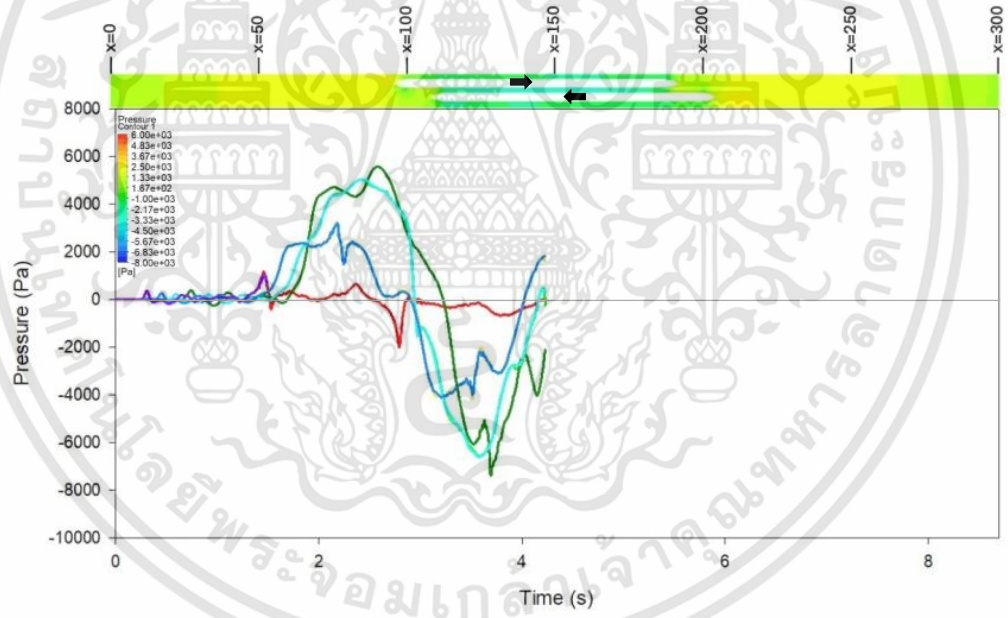
เมื่อท้ายขบวนรถไฟทั้งสองที่เคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์ อากาศจะถูกดูดให้ไหลเข้าสู่อุโมงค์ตามการเคลื่อนที่ของรถไฟทั้งสองขบวน เนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ลูกสูบที่ถูกกล่าวมาในหัวข้อที่ 2.8 โดยปรากฏการณ์ลูกสูบนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาการเคลื่อนที่ในอุโมงค์ของรถไฟทั้งสองขบวน เช่นเดียวกันกับเมื่อมีรถไฟเพียงขบวนเดียวเคลื่อนที่อยู่ภายในอุโมงค์

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า บริเวณรอบๆรถไฟจะมีค่าความดันลบ เนื่องอากาศที่ถูกดูดตามมานั้นไม่สามารถเข้ามาแทนที่อากาศที่รถไฟเคลื่อนที่ได้ทัน ทำให้บริเวณที่รถไฟเคลื่อนที่หลังจากที่ท้ายขบวนรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ไปได้สักพักแล้วนั้น ความดันบริเวณนั้นจะเป็นลบตามไปด้วย นอกจากนี้ด้วยผลของความหนืดของของไหลส่งผลให้ความดันลบนั้นถูกส่งไปยังด้านหน้าขบวนรถไฟอีกด้วย พฤติกรรมนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งอากาศจากภายนอกไหลเข้ามาถึงท้ายขบวนรถไฟ และแทนที่ความดันลบรอบรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

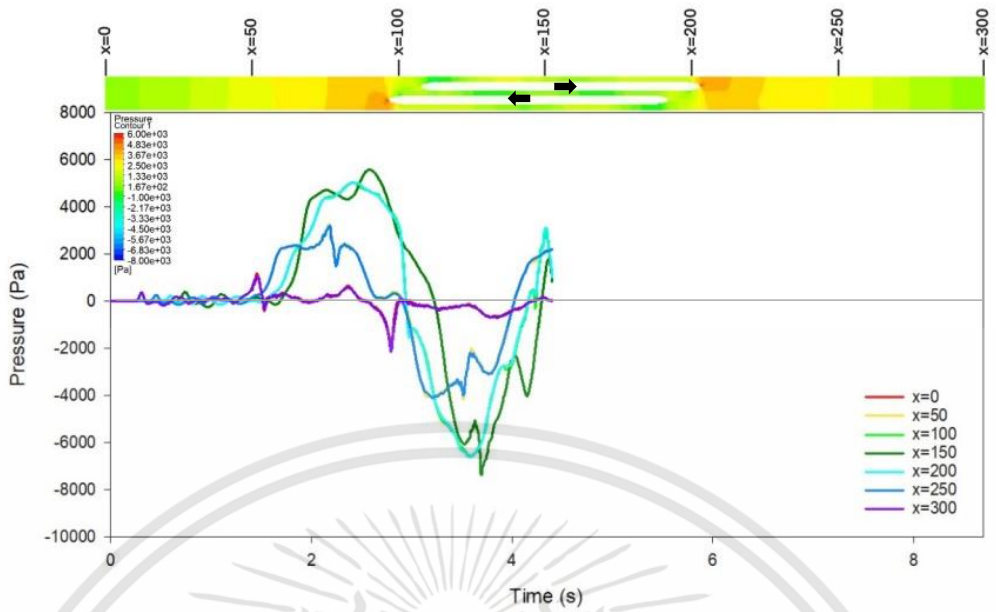


(a)



(b)

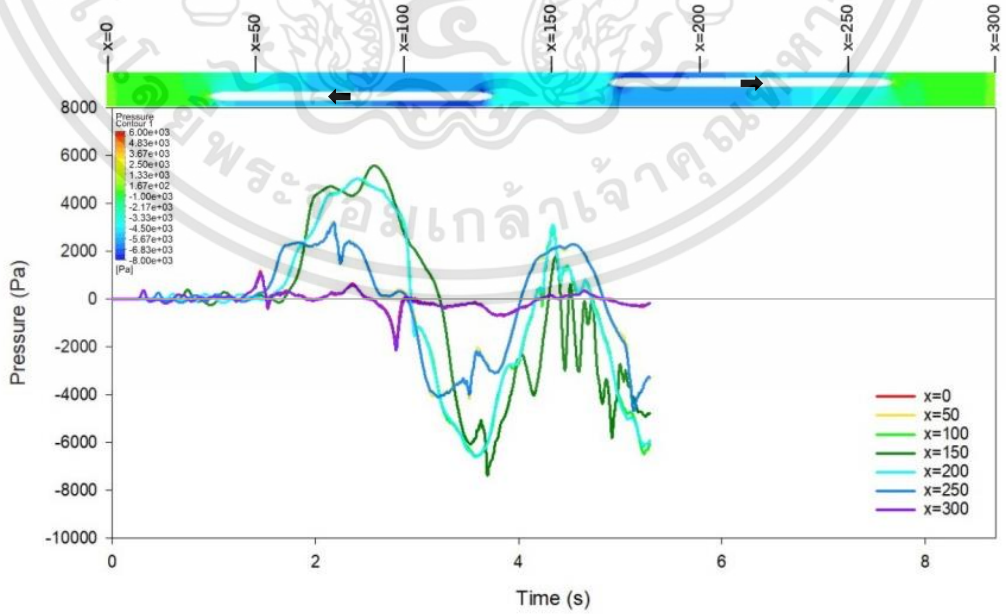
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

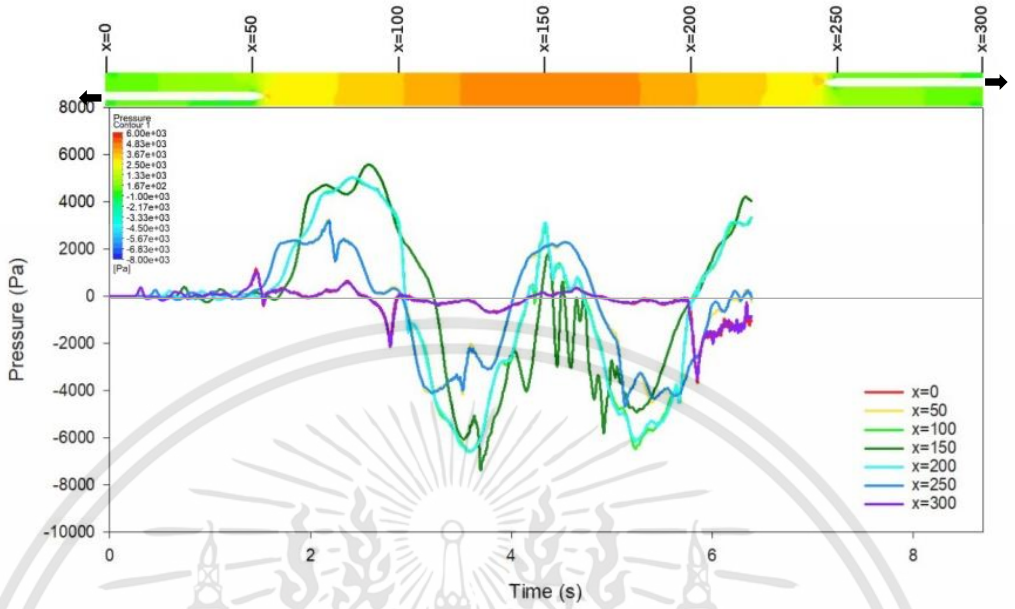
รูปที่ 4.17 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์
(a) ที่เวลา 3.98 s (b) ที่เวลา 4.23 s (c) ที่เวลา 4.40 s

จากรูปที่ 4.17 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นตามมาคือ หลังจากที่บริเวณด้านหน้าของรถไฟทั้งสองขบวนสวนทางกันแล้ว อากาศบริเวณด้านหน้ารถไฟจะกลับมาถูกอัดอีกครั้งเหมือนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ จะเห็นได้ว่ากราฟความดันทุกตำแหน่ง ยกเว้นที่ตำแหน่ง x=0 และ x=300 m จะเปลี่ยนทิศทางจากความดันลดลงเรื่อย ๆ มาเป็นค่าความดันที่เพิ่มขึ้น เพราะบริเวณหน้าขบวนรถไฟนั้นเกิดความดันบวก (Compression wave) ขึ้นอีกรอบ

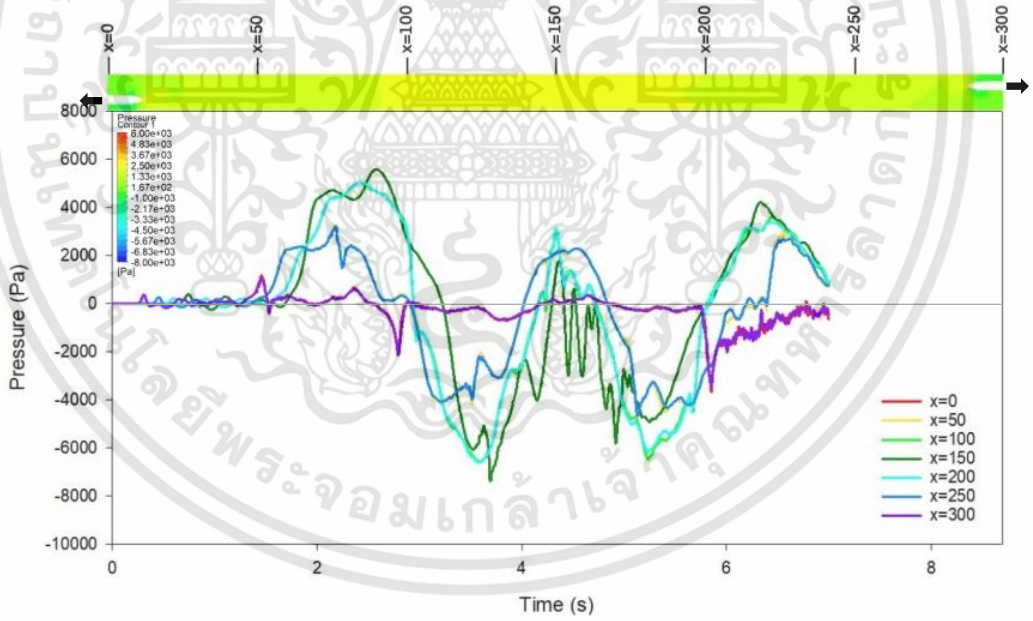


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 5.29 s

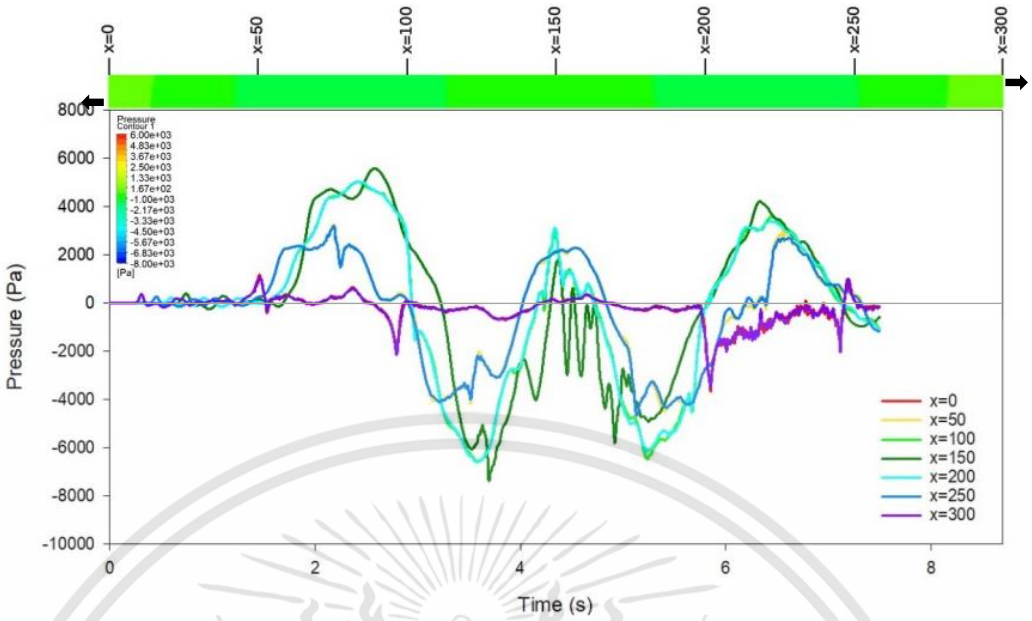


รูปที่ 4.19 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 6.39 s



รูปที่ 4.20 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์ ที่เวลา 7.00 s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงภาพคอนทัวร์และกราฟความดันในอุโมงค์เมื่อรถไฟออกจากอุโมงค์ที่เวลา 7.50 s

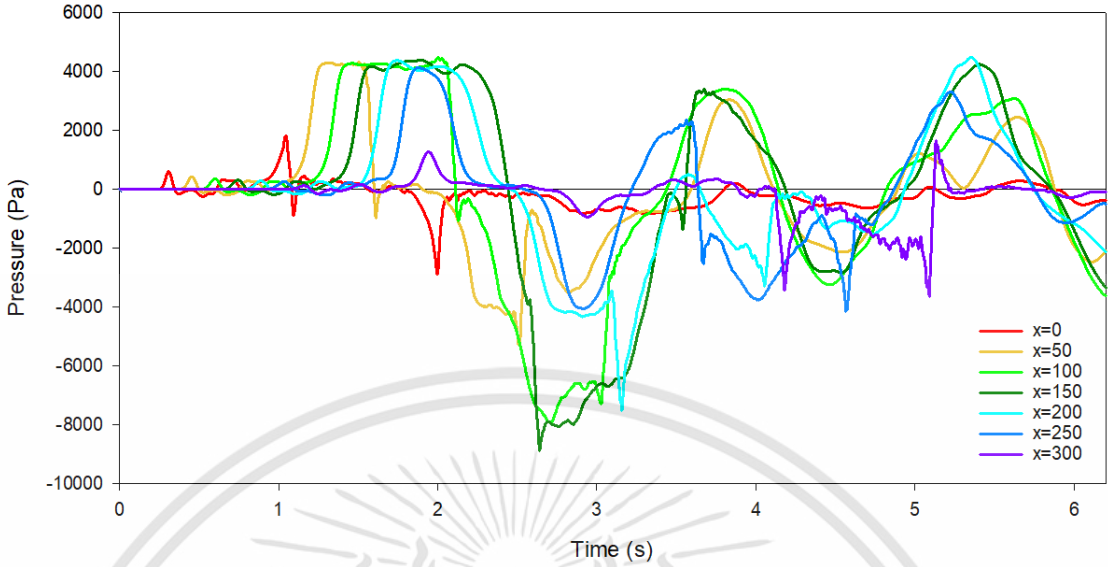
จากรูปที่ 4.18 ภาพคอนทัวร์แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันบวกถูกส่งออกไปจะเกิดความดันลบตามมาเหมือนกับที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ใกล้ถึงบริเวณทางออกของอุโมงค์ อากาศทั้งหน้าขบวนรถไฟและอากาศภายนอกอุโมงค์ จะกลับเข้ามาผลักความดันลบออกจากอุโมงค์ ทำให้ในรูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21 จะเห็นได้ว่าค่าความดันกลับมาบวกอย่างมากบริเวณด้านท้ายของรถไฟ เนื่องจากอากาศจากบริเวณทางเข้าอุโมงค์ไหลเข้ามาแทนที่อากาศภายในอุโมงค์แต่ถูกตัวรถไฟกั้นทางออกของอากาศไว้หรือมีพื้นที่ให้ออกน้อยมากๆ ทำให้อากาศเกิดการอัดตัวเป็นความดันบวกบริเวณท้ายขบวนรถไฟ และค่อย ๆ ลดลงจนอากาศทั้งหมดไหลออกจากอุโมงค์ได้ โดยในรูปที่ 4.20 กราฟความดันที่ตำแหน่ง x=0 และ x=300 m นั้นจะสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากรถไฟได้เคลื่อนที่พ้นตำแหน่งทั้งคู่ หรือปลายอุโมงค์ทั้งสองฝั่งแล้ว ความดันบวกจึงไหลออกสู่ทางปลายและเข้าไปแทนที่อากาศที่ท้ายขบวนดูดเข้าไปอีกด้วย

4.3 ขนาดของความดันในอุโมงค์กับอัตราเร็ว

งานวิจัยนี้ทำผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และอภิปรายผลในกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ด้วยอัตราเร็วที่เปลี่ยนไป เพื่อตรวจสอบค่าและดูลักษณะพฤติกรรมของกราฟความดัน รวมไปถึงการทำนายแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราเร็วเพิ่มขึ้นหรือลดลง

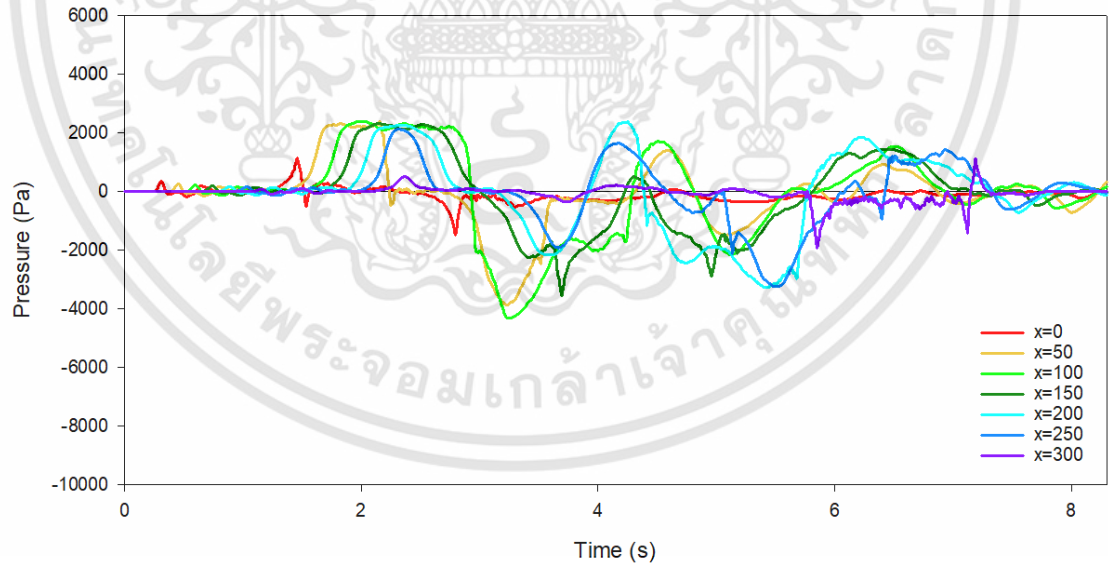
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 รถไฟขบวนเดียว



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 350 km/h

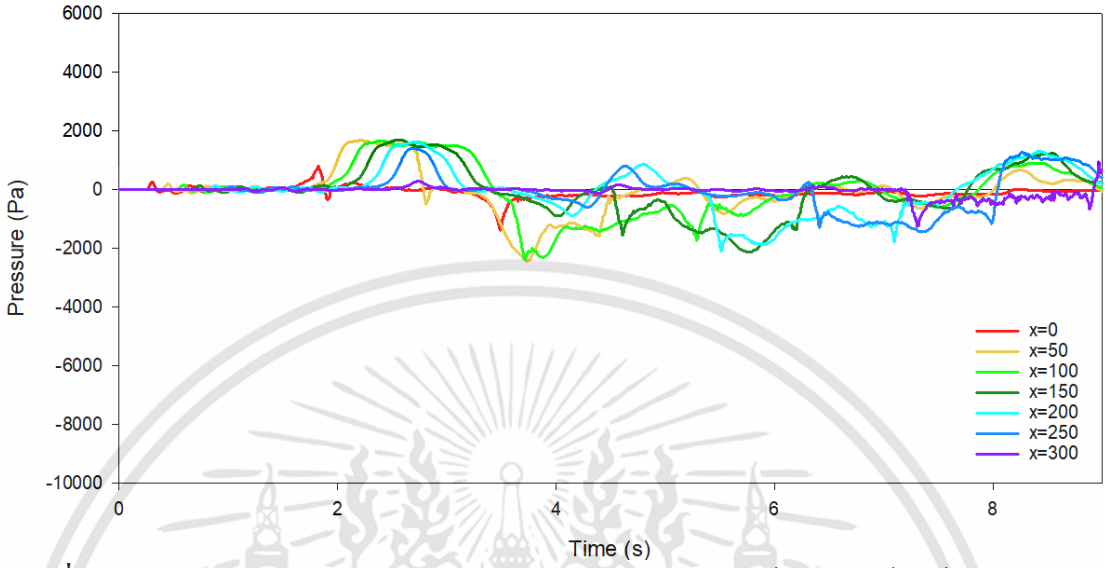
จากรูปที่ 4.22 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็ว 350 km/h ณ ตำแหน่ง x = 50, 100, 150, 200 และ 250 m จะมีค่าเป็น 4,312.289, 4,467.624, 4,393.161, 4,474.989, 4,127.596 Pa ตามลำดับ และความดันลบสูงสุดที่เกิดขึ้นในเป็น -8,873.61 Pa



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 250 km/h

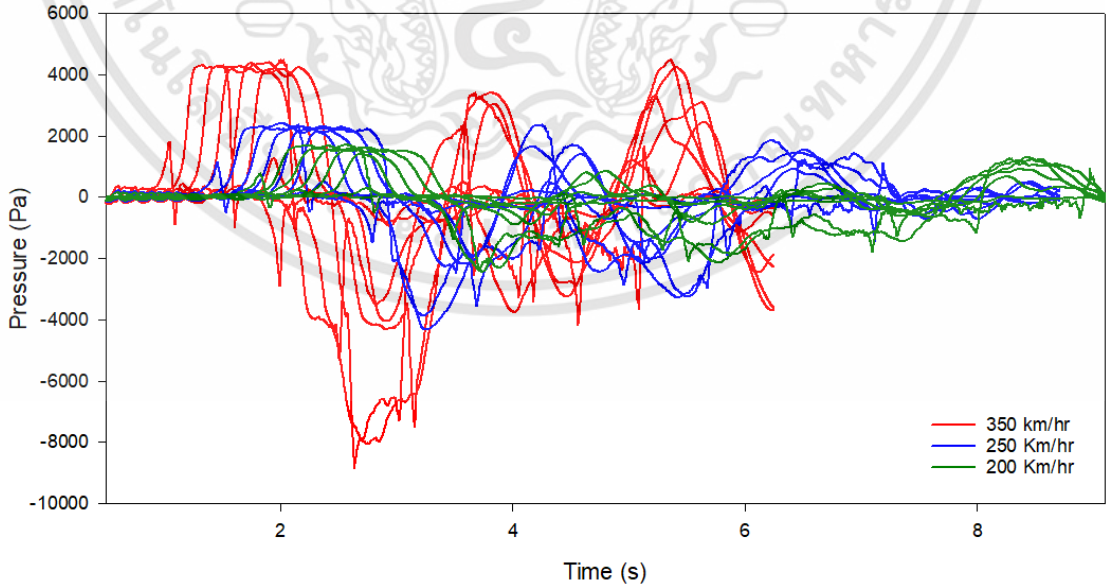
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็ว 250 km/h ณ ตำแหน่ง x = 50, 100, 150, 200 และ 250 m จะมีค่าเป็น 2,370.540 , 2395.572 , 2,309.128 , 2,371.237 , 2,121.375 Pa ตามลำดับ และความดันลบสูงสุดที่เกิดขึ้นเป็น -3,552.420 Pa



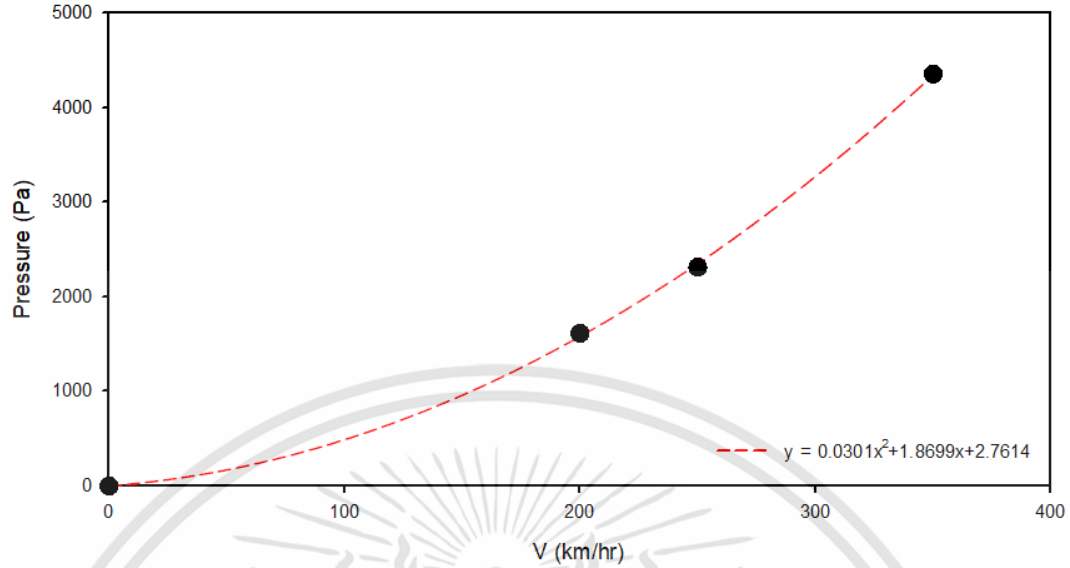
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 200 km/h

จากรูปที่ 4.24 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ ที่อัตราเร็ว 200 km/h ณ ตำแหน่ง x = 50, 100, 150, 200 และ 250 m จะมีค่าเป็น 1681.238 , 1669.068 , 1699.157 , 1615.062 , 1402.646 Pa ตามลำดับ และความดันลบสูงสุดที่เกิดขึ้นเป็น -2430.160 Pa และแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในรูปที่ 4.25



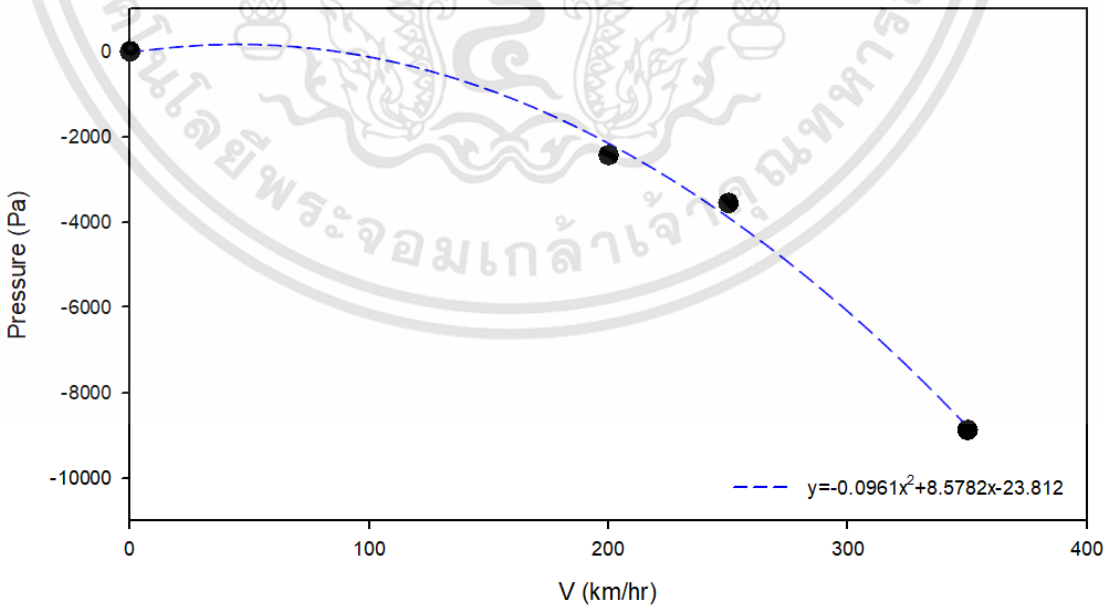
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟเคลื่อนที่เข้าไปภายในอุโมงค์ขบวนเดียว ที่อัตราเร็ว 350, 250 และ 200 km/h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)

จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 อัตราเร็วที่ทำการทดสอบจะมีค่าความดันที่แตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 4.25 เมื่อนำค่าความดันเฉลี่ยทั้ง 5 จุดที่อัตราเร็ว 350, 250, 200 km/h เป็น 4355.132 , 2313.570 , 1613.435 Pa ตามลำดับ เมื่อนำค่าความดันไปพล้อตกราฟ โดยกำหนดให้ที่อัตราเร็วรถไฟเป็น 0 ความดันที่เป็น 0 จากรูปที่ 4.26 แสดงเห็นถึงกราฟการเพิ่มขึ้นของความดันเป็นไปตามสมการพหุนามอันดับที่ 2



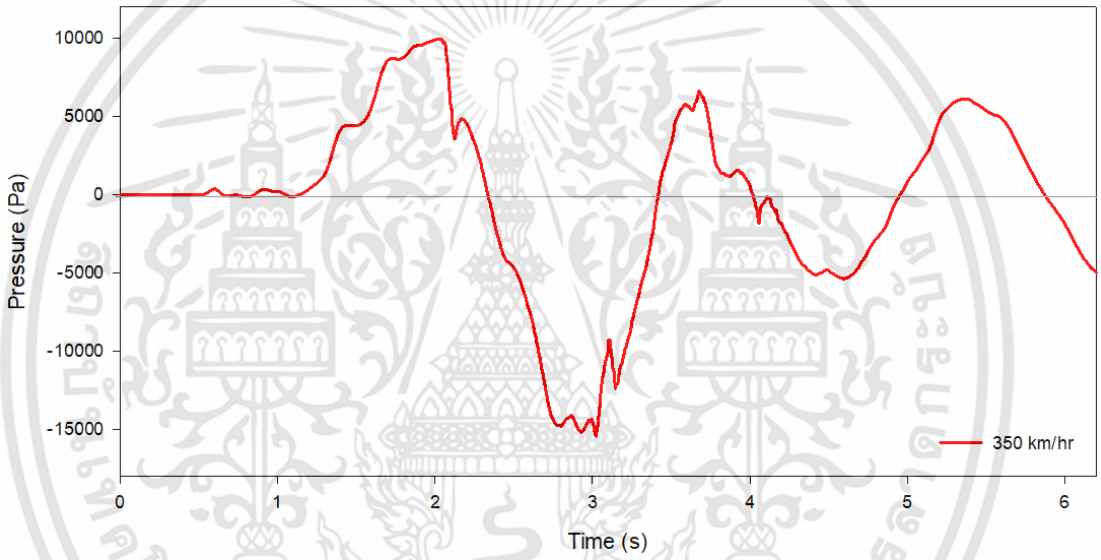
รูปที่ 4.27 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความลบสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.27 ความดันลบสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราเร็ว โดยมีค่าที่อัตราเร็ว 350, 250, 200 km/h เป็น -8,873.61, -3,552.420, -2430.160 Pa ตามลำดับ เมื่อนำค่าความดันลบสูงสุดไปพล้อตกราฟ โดยกำหนดให้ที่อัตราเร็วรถไฟเป็น 0 ความดันที่เป็น 0 จากรูปที่ 4.27 แสดงเห็นถึงกราฟการเพิ่มขึ้นของความดันเป็นไปตามสมการพหุนามอันดับที่ 2

4.3.2 รถไฟสองขบวนสวนทางกัน

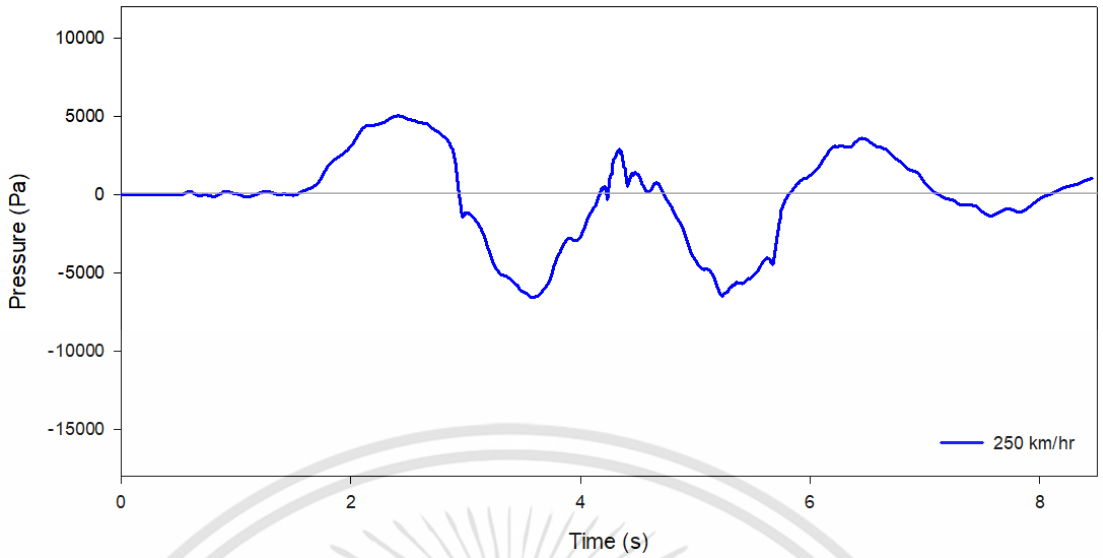
สำหรับกรณีรถไฟสอนขบวนสวนกัน จะพบว่าความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์ หรือ x = 150 ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของอัตราเร็วจะนำค่าความดันที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์มาคำนวณหาแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นดังนี้



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s) เมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกัน ที่อัตราเร็ว 350 km/h

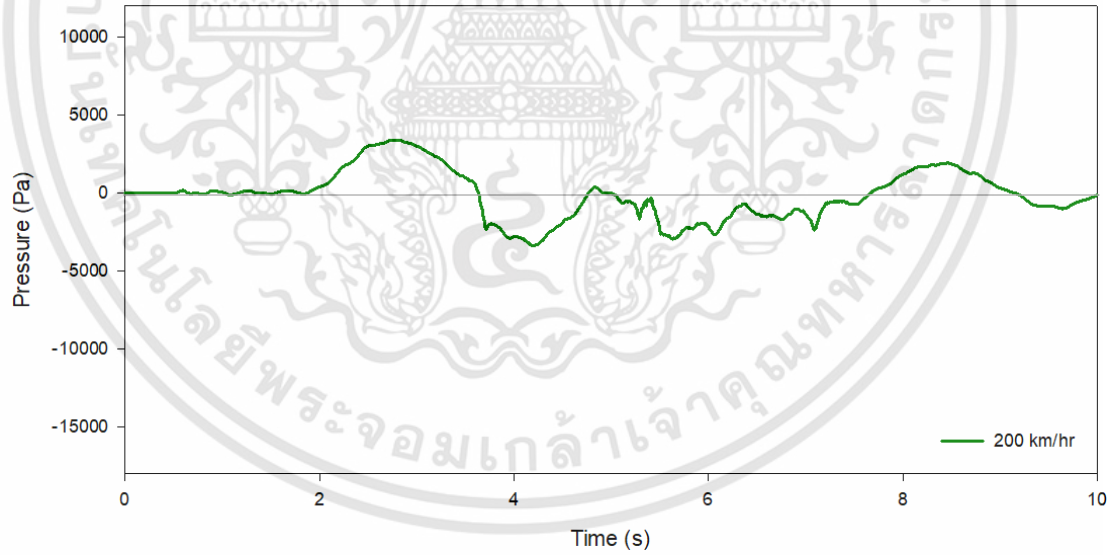
จากรูปที่ 4.28 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็ว 350 km/h ณ ตำแหน่ง x = 150 m จะมีค่าเป็น 9956.795 Pa และความดันลบสูงสุดเป็น -15,458.2 Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)
เมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกัน ที่อัตราเร็ว 250 km/h

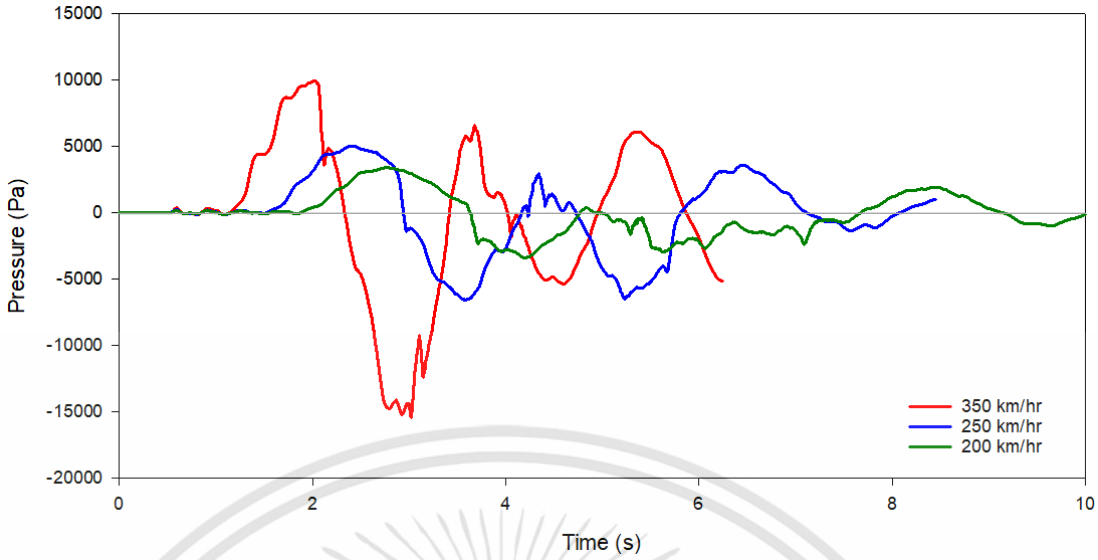
จากรูปที่ 4.29 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็ว 350 km/h ณ ตำแหน่ง x = 150 m จะมีค่าเป็น 5032.276 Pa และความดันลบสูงสุดเป็น -6,587.3 Pa



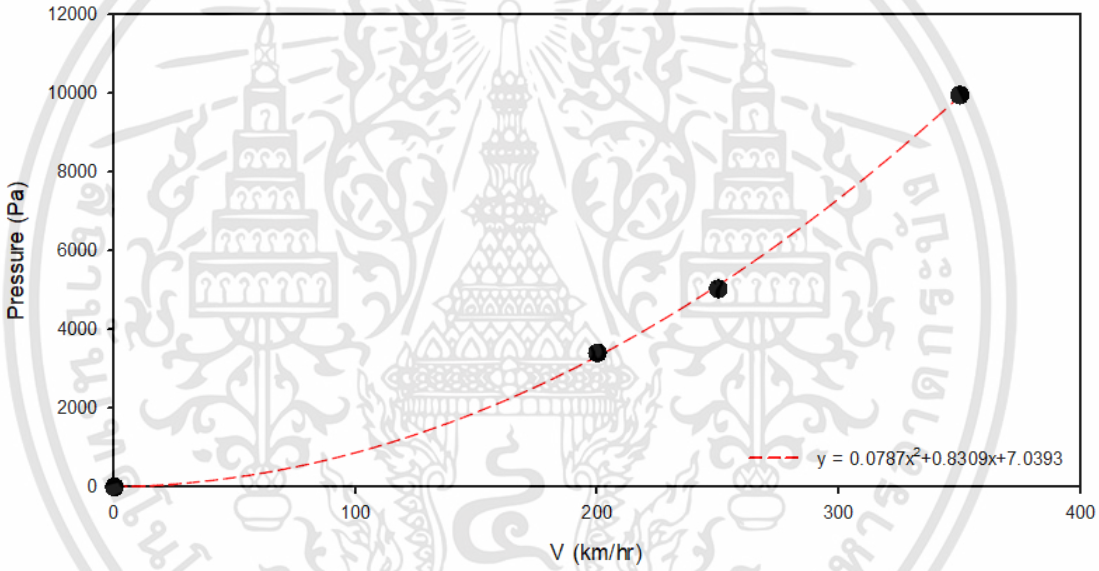
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน (Pa) กับ เวลา (s)
เมื่อรถไฟสองขบวนสวนทางกัน ที่อัตราเร็ว 200 km/h

จากรูปที่ 4.30 ความดันช่วงแรกเมื่อรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็ว 200 km/h ณ ตำแหน่ง x = 150 m จะมีค่าเป็น 3401.625 Pa และความดันลบสูงสุดเป็น -3,378.99 Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



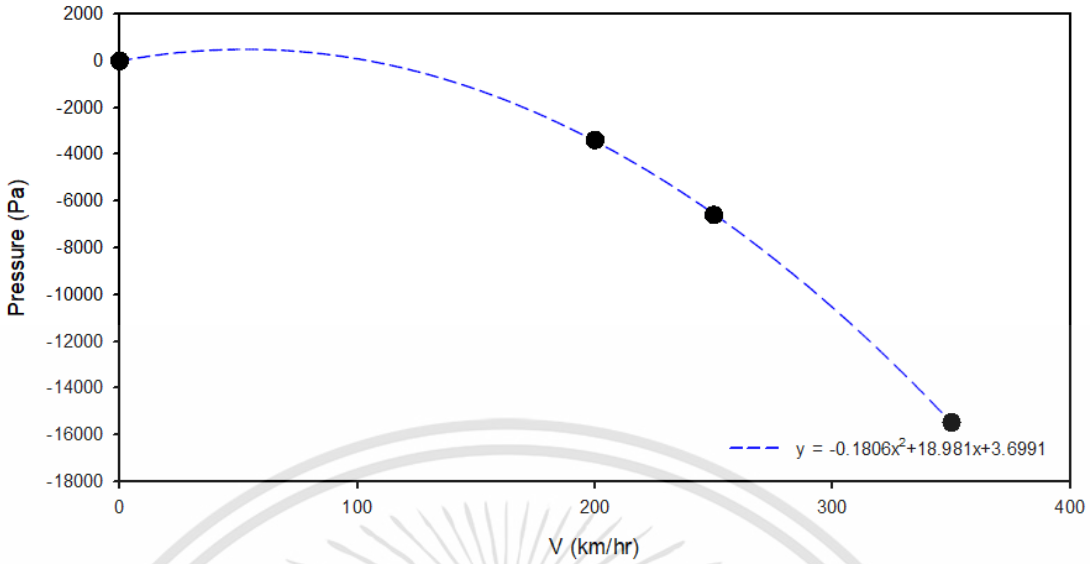
รูปที่ 4.31 แสดงค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)



รูปที่ 4.32 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความดันสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าทั้ง 3 อัตราเร็วที่ทำการทดสอบจะมีค่าความดันที่แตกต่างกัน เมื่อนำค่าความดันไปพล้อตกราฟ โดยกำหนดให้ที่อัตราเร็วรถไฟเป็น 0 ความดันที่เป็น 0 จากรูปที่ 4.32 แสดงเห็นถึงกราฟการเพิ่มขึ้นของความดันเป็นไปตามสมการพหุนามอันดับที่ 2 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงเส้นแนวโน้มค่าความลบสูงสุดระหว่าง ความดัน (Pa) กับ อัตราเร็ว (km/h)

และความดันลบสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราเร็ว โดยมีค่าที่อัตราเร็ว 350, 250, 200 km/h เป็น -15,458.2 , -6587.3 และ -3,378.9 Pa ตามลำดับ เมื่อนำค่าความดันลบสูงสุดไปพล้อตกราฟ โดยกำหนดให้ที่อัตราเร็วรถไฟเป็น 0 ความดันที่เป็น 0 เช่นกัน จากกราฟการลดลงของความดันเป็นไปตามสมการพหุนามอันดับที่ 3 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทวิจารณ์และสรุปการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และอภิปรายผล การศึกษาอากาศพลศาสตร์รอบวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่จำกัดของแบบจำลองรถไฟเข้าอุโมงค์ทั้งแบบจำลองรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ขบวนเดียวและสองขบวนสวนทางกันที่อัตราเร็วต่าง ๆ สามารถสรุปพฤติกรรมของความดันที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

เมื่อรถไฟขบวนเดียวเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วหนึ่งผ่านอุโมงค์เดี่ยวทางคู่ การเคลื่อนที่ของรถไฟจะส่งผลให้เกิดอากาศถูกผลักออกไปทุกทิศทางรอบ ๆ รถไฟ ทำให้เกิดความดันอากาศที่เคลื่อนที่ไปด้านหน้าตามทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ ความดันอากาศส่วนใหญ่จะไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมก่อนที่จะถึงทางเข้าอุโมงค์ ส่วนความดันอากาศที่เข้ามาในอุโมงค์จะถูกผนังของอุโมงค์บังคับทิศทางการเคลื่อนที่ให้ออกสู่อุโมงค์ จนกระทั่งรถไฟเคลื่อนที่เข้าใกล้ทางเข้าอุโมงค์ในระยะหนึ่ง อากาศที่อยู่ภายในอุโมงค์จะถูกอัดตัวก่อให้เกิดความดันบวกตลอดแนวอุโมงค์ตั้งแต่ตำแหน่งหน้ารถไฟเป็นต้นไป โดยในช่วงที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าสู่อุโมงค์จนถึงช่วงที่เข้าอุโมงค์แล้วนั้น ความดันอากาศจะมีขนาดที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วที่ขบวนรถไฟเคลื่อนที่ ที่อัตราเร็ว 200, 250 และ 350 km/h จะมีค่าความดันสูงสุดเฉลี่ยเป็น 1,613 , 2,313 และ 4,355 Pa ตามลำดับ และค่าความดันลบสูงสุด เป็น -2,430 , -3,552 , -8,873 Pa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าของความดันอากาศมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นและลดลงตามอัตราเร็วของรถไฟอย่างเห็นได้ชัด และในทุก ๆ ตำแหน่งนั้นจะเกิดความดันในอุโมงค์ที่มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในทุก ๆ อัตราเร็ว เมื่อท้ายขบวนของรถไฟเริ่มเข้าสู่อุโมงค์ ท้ายขบวนรถไฟจะดูดมวลอากาศให้เคลื่อนที่ตามมาด้วยเกิดเป็นความดันลบ และความดันลบรอบ ๆ รถไฟจะส่งต่อไปยังด้านหน้าของรถไฟทำให้ความดันอากาศในอุโมงค์เป็นลบตลอดแนวอุโมงค์ ในเวลาเพียงไม่กี่วินาทีต่อมาความดันอากาศจะกลับมามีค่าเป็นบวกอีกครั้งตลอดแนวด้านหน้าของรถไฟ เพราะเกิดการสะท้อนของอากาศจากด้านนอกอุโมงค์ไหลย้อนกลับเข้ามาในอุโมงค์อีกครั้ง จากการทำการทดลองทำให้เห็นว่าจะเกิดความดันบวก ความดันลบสลับกันไปมาจนกว่ารถไฟจะออกจากอุโมงค์ ทั้งนี้จะสลับกันกี่ครั้งขึ้นอยู่กับขนาด ความยาวของทั้งตัวรถไฟและอุโมงค์

กรณีเมื่อรถไฟเข้าสู่อุโมงค์ที่อัตราเร็วเดียวกันทั้งสองขบวน และสวนทางกันที่บริเวณกลางอุโมงค์ พบว่าความดันอากาศจากเดิมที่ไหลออกสู่ปลายอุโมงค์ที่ทางออก เมื่อมีรถไฟอีกขบวนเคลื่อนที่สวนมาที่ทางออกของอุโมงค์ทำให้อากาศไหลออกไปได้น้อยมาก ๆ กล่าวคือรถไฟทั้งสองขบวนต่างก็มีความดันบวกหน้าขบวน ทำให้ความดันบวกมาบรรจบกันที่บริเวณกลางอุโมงค์ ส่งผลให้กรณีที่สวนกันกลางอุโมงค์ค่าความดันอากาศบริเวณกลางอุโมงค์จะมีค่ามากที่สุด โดยความดันอากาศที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์ที่อัตราเร็ว 200, 250 และ 350 km/h ความดันสูงสุดมีค่า เป็น 2,313 , 4,355 และ 9,956 Pa และ ค่าความดันลบสูงสุดมีค่าเป็น -15,458 , -6587 , -3378 Pa ตามลำดับ ซึ่งความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงตามอัตราเร็วเหมือนกับกรณีที่รถไฟเข้าสู่อุโมงค์ขบวนเดียว แต่จะมีค่าที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเนื่องมาจากมีรถไฟที่เคลื่อนที่สวนกันภายในอุโมงค์ หลังจากนั้นความดันอากาศมีความผันผวนเป็นความดันบวกและความดันลบสลับกันไปตลอดจนรถไฟทั้งสองเคลื่อนที่ออกจากอุโมงค์

ดังนั้นงานวิจัยนี้พบว่าทั้งกรณีที่รถไฟเคลื่อนที่ขบวนเดียว และรถไฟสองขบวนสวนกันที่กลางอุโมงค์ จะมีพฤติกรรมของความดันที่คล้ายคลึงกัน แตกต่างกันตรงที่รถไฟขบวนเดียวความดันบวกสามารถถูกส่งออกไปยังปลายทางของอุโมงค์ได้ แต่ในกรณีที่รถไฟสวนกันเนื่องจากมีรถไฟอีกขบวนที่เคลื่อนที่มาจากอีกฝั่งของอุโมงค์ทำให้ปิดกั้นพื้นที่ในการไหลของอากาศ ความดันบวกจึงมาบรรจบกันตรงกลางอุโมงค์ หลังจากนั้นทั้งสองกรณีมีความดันบวกสลับกับความดันลบด้วยกันทั้งคู่ และมีแนวโน้มความดันอากาศที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงไปในทิศทางเดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อสานต่องานวิจัย

1. เนื่องจากสถานการณ์โควิด 19 ทำให้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ หรือฮาร์ดแวร์ที่ใช้ มีประสิทธิภาพในการประมวณผลที่ไม่เพียงพอ งานวิจัยนี้จำเป็นต้องลดความซับซ้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงเป็นแบบจำลอง 2 มิติ ทำให้ค่าของความดันอากาศออกมามีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่าที่เกิดขึ้นจริง

2. งานวิจัยนี้เพียงแต่ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของความดันที่เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วรถไฟและผลของการจัดการเดินรถแบบสวนและไม่สวนกันในอุโมงค์เพียงเท่านั้น โดยยังมีปัจจัยอื่นๆ อาทิเช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดของ อุโมงค์ รถไฟ ลักษณะของหัวรถไฟ และอื่นๆ ที่สามารถเพิ่มหรือลดความดันอากาศในอุโมงค์ได้ ซึ่งสามารถต่อยอดได้อีกหลายกรณี

3. ในกรณีที่ผู้ต่อยอดงานวิจัยนี้พบปัญหาเรื่องการ Compile udf.h ในบทที่ 3.2.4 สามารถแก้ไขปัญหาด้วยการติดตั้งซอฟต์แวร์ Visual Studio เพื่อที่จะเปิดซอฟต์แวร์ Ansys Fluent แยกออกมาจากซอฟต์แวร์ Ansys Workbench จึงจะสามารถทำให้ซอฟต์แวร์ Ansys Fluent อ่านโค้ดการเคลื่อนที่ของวัตถุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ไทยพับลิก้า (2014). **ระบบทางคู่ ข้อเท็จจริงรถไฟไทย (ตอน 3).** https://thaipublica.org/2014/09/the-truth-of-thailand-rail-system-3/>

[2] Railway.co.th. (2019). **วารสารรถไฟสัมพันธ์.** https://www.railway.co.th/RailwayMiddle File NewsAndActImg/1307/131951934207171332_2_2562.pdf

[3] iEnergyGuru. (2015). **พลังงานลม กับ อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics).** https://ienergyguru.com/2015/07/พลังงานลม-กับ-อากาศพลศาส/

[4] รศ. ดร. จารุวัตร เจริญสุข. **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการประยุกต์ในงานวิศวกรรม (2561).** ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] Jiqiang Niu, Yang Sui, Qiujun Yu, Xiaoling Cao, and Yanping Yuan. (2020). **AERODYNAMICS OF RAILWAY TRAIN/TUNNEL SYSTEM: A REVIEW OF RECENT RESEARCH**. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China

[6] Samane Faramehr. (2014). **AERODYNAMIC OF THE TRAINS IN TUNNELS**. MRes in Railway Systems Engineering and Integration College of Engineering, School of Civil Engineering University of Birmingham, England

[7] Munson Okiishi Huebsch Rothmayer (seventh edition). **Fundamentals of Fluid Mechanics.**

[8] P. Reinke, M. Flueckiger, and T. Wicht. (2015). **AERODYNAMICS AND VENTILATION IN RAIL TUNNELS.** HBI Haerter Ltd, Berne, Switzerland

[9] Baker C.,Quinn A.,Sima M.,Hoefener L.,andLicciardello R.,(2013a). **'Full-scale measurement and analysis of train slipstreams and wakes: Part 1 Ensemble averages',Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal ofRail and Rapid Transit.** http://doi.org/10.1177/0954409713485944.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Pengpeng Xie, Yong Peng, Tiantian Wang, and Honghao Zhang. (2019). **RISKS OF EAR COMPLAINTS OF PASSENGERS AND DRIVERS WHILE TRAINS ARE PASSING THROUGH TUNNELS AT HIGH SPEED:** A NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY. https://doi.org/10.3390/ijerph16071283

[11] CRDC. **China High-Speed Railway Design Technology Training Program.** China Rail -way Design Corporation , China

[12] Ansys Learning Forum (2020). **What is the source of mesh quality spectrum?.** http://doi.org/10.1177/0954409713485944.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้