ต้นแบบเครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ทางรถไฟด้วยเลเซอร์วัดระยะ

Measurement of Railway Tunnel Cross-section with Laser Range Finder

กิติเดช สันติชัยอนันต์[1*] และ สุริยา พิทักษ์กุล[2]

[1] ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร
[3] ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: kitidech.san@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) มีเขตโครงสร้าง (Structure gauge) ตามทางรถไฟตลอดเส้นทางของประเทศ ขนาดของเขตบรรทุก (Loading gauge) จำเป็นต้องมีขนาดปลอดภัยที่จะผ่านเขตโครงสร้าง อุโมงค์ก็เช่นกันถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของเขตโครงสร้างที่ระยะห่างระยะระหว่างผนังของอุโมงค์กับขบวนรถมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์เอง จากการมีหัวรถจักร ขบวนรถโดยสารหรือรถขนตู้สินค้าคอนเทนเนอร์ที่มีขนาดใหม่ ตลอดจนจากการซ่อมบำรุงทางรถไฟให้มีระดับสูงขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลจนเกิดปัญหาขบวนรถดังกล่าวเบียดชนกับผนังของอุโมงค์ได้ จากรายงานคณะทำงานตรวจสอบโครงสร้างทางของ รฟท. รายงานว่าเกิดการเบียดชนระหว่างรถจำลองเขตบรรทุก (Mock up car) ในอุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยที่ไม่ทราบจุดที่ชนแน่นอน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อการเดินรถในอุโมงค์จึงจำเป็นต้องดำเนินกาตรวจสอบมิติของอุโมงค์ดังกล่าวโดยละเอียด ว่าจุดใดเป็นจุดที่เกิดการชน เพื่อหาแนวทางการแก้ไขไม่ให้เกิดการเบียดชนอีก ดังนั้นหน่วยงานที่รับผิดชอบของ รฟท. จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหาวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาต้นแบบเครื่องมือ อุปกรณ์ประกอบ และขบวนการวัดมิติหน้าตัดตามขวางของอุโมงค์ ต้นแบบเครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์แบบมือถือที่ทำงานร่วมกับการใช้และไม่ใช้แผ่นจานองศาถูกพัฒนาขึ้น เพื่อให้สามารถนำข้อมูลการวัดระยะทางจากศูนย์กลางแนวรางถึงผนังอุโมงค์ตามองศาต่างๆจากแนวราบมาจำลองหน้าตัดตามขวางของผนังอุโมงค์ ผลการพัฒนาและทดลองใช้งาน สรุปได้ว่าต้นแบบเครื่องมือ อุปกรณ์ประกอบ และขบวนการวัด สามารถระบุตำแหน่งของอุโมงค์ช่องเขาที่มีปัญหาการเบียดชนได้อย่างถูกต้องภายใต้ความแม่นยำที่เพียงพอที่จะตรวจจับความผิดปกติของผนังอุโมงค์ ขนาดของขบวนรถที่ใหญ่เกินไป การยกตัวของโครงสร้างทางและรางเนื่องจากการซ่อมบำรุง ตลอดจนต้นแบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานตามแขวงและเขตทางต่างๆของ รฟท. ทั่วประเทศ

คำสำคัญ: อุโมงค์, เขตโครงสร้าง, เขตบรรทุก เครื่องวัดระยะด้วยเลเซอร์, มิติหน้าตัดขวาง

Abstract

Nowadays, State Railway of Thailand (SRT) provides the structure gauge along theirs own railway countrywide. Loading gauge is necessary limited and controlled to pass through the structure gauge. Tunnel is also one of the structure gauge needed to be concerned. Distance between the tunnel's wall and rail cars may varied due to the wall movement itself, new locomotive, new passenger car, new container car and due to the rehabilitation of permanent way. All mentioned scenarios may cause the collision of tunnel wall and rail cars. From a report of a SRT working group responsible for inspecting railway supporting structure, there were unknown collisions between the mock up car and tunnel's wall at Chongkhao tunnel, Nakhon Si Thammarat province. Therefore, for safety railway operation, precise inspection should be carried out and determines the exact locations of collision in the target tunnel. This paper shows two typical laser range finders were applied to develop basic measuring tools, accessories and a simple method to measure the target tunnel's cross section. There were two prototypes with and without angle graduated discs. The measured data of distances from center of rail alignment to the tunnel's wall at different angles were recorded and used to model proportionally the tunnel's wall in a computer. The results showed that the prototypes were in function as expected to determine a specific collision location in the target tunnel. In conclusion, with the tools and measuring method in this paper, some scenario, e.g., abnormal of tunnel's wall movements, unexpected lifting of rail and permanent structure, as well as enlargement of new loading gauges, will be effectively verified by the SRT local officers who are capable of using a user friendly and simple tool with low cost operation and maintenance.

Keywords: Tunnel, Structure Gauge, Loading Gauge, Handheld Laser Range Finder, Cross section

1. คำนำ

อุโมงค์ทางรถไฟสำหรับประเทศไทย เริ่มเข้ามามีบทบาทตั้งแต่เริ่มมีการก่อตั้ง การรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งในอดีตมีการก่อสร้างเป็นอุโมงค์รางเดี่ยวเท่านั้น แต่ปัจจุบันจากการสร้างระบบรางรถไฟทางคู่ทั่วประเทศและโครงการรถไฟความเร็วสูง อุโมงค์มีจำนวน มีขนาดใหญ่และยาวมากขึ้น

การวัดมิติหน้าตัดภายในอุโมงค์ ถือได้ว่ามีความสำคัญต่อช่วงการก่อสร้างและขณะกำลังใช้งานอุโมงค์ โดยเฉพาะอุโมงค์ที่มีขนาดใหญ่ และมีหน้าที่เพื่อใช้งานด้านการขนส่ง เช่น อุโมงค์ทางรถไฟ ซึ่งจำเป็นต้องถูกตรวจสอบทั้งช่วงการก่อสร้าง ช่วงการบำรุงรักษา และต้องตรวจสอบความปลอดภัยจากการเบียดชนต่างๆ ระหว่างโครงสร้างของอุโมงค์และขบวนรถไฟในขณะใช้งาน

เทคนิคในการวัดมิติจากด้านในของอุโมงค์ทางรถไฟมีเทคนิคสำคัญหลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

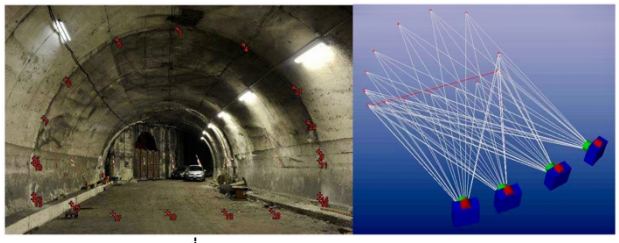
การสำรวจรังวัดโดยกล้อง Total Station (Total Station Survey) วิธีนี้เป็นวิธีปกติที่ใช้ในการวัดตำแหน่งพิกัดเชิงหน้าตัดของผนังอุโมงค์ โดยมักจะทำการสำรวจโยงยึดกันเป็นวงรอบ และเป็นช่วงๆ ตามแนวอุโมงค์ มีทั้งแบบใช้และไม่ใช้เป้าสะท้อนแสง (Optical Reflector Target) เพื่อความแม่นยำในการวัดระยะ ดังรูปที่ 1 วิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งบนผนังอุโมงค์ได้แม่นยำสูง โดยทั่วไปจะทำการติดตั้งเป้าประมาณ 5-7 ตำแหน่งในแต่ละหน้าตัดที่ทุกๆระยะประมาณ 15-20 ม. ตามแนวอุโมงค์ เช่น ติดตั้งไว้ที่ มุมเปิดจากแนวราบที่ 0, 45 และ 90 องศา ณ ระนาบตัดขวางหนึ่ง โดยทั่วไปภายในระยะไม่เกิน 100 ม. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเป้าจะอยู่ในช่วง ±2 มม. [1] และ อาจจะละเอียดสูงถึงระดับไม่เกิน ±1 มม. กรณีมีการโยงยึดปรับแก้และมีการติดตั้งอุปกรณ์และเป้าสะท้อนที่มีคุณภาพ [2]

การสแกนด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ (Laser Scanning) วิธีนี้เริ่มเป็นที่นิยมมากขึ้น ดังรูปที่ 2 เพราะเครื่องมือพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วและเริ่มใช้งานได้ง่าย รวดเร็ว และแม่นยำมากกว่าแต่ก่อน วิธีนี้จะใช้หัวเลเซอร์สแกนแบบพร้อมกันเพื่อจับระยะกระจายเชิงจุด (Point Cloud) จำนวนมากอย่างรวดเร็ว (อาจจะถึงระดับล้านจุด ต่อวินาที) ซึ่งสามารถสร้างพื้นผิวสามมิติของผนังอุโมงค์ได้อย่างรวดเร็ว ครอบคลุมพื้นที่ได้มาก ข้อมูลจำนวนมากต้องถูกสังเคราะห์ด้วยซอฟแวร์เฉพาะของแต่ละผู้ผลิต ผู้อ่านสามารถศึกษาเพิ่มเติมการใช้ประโยชน์ของวิธีนี้สำหรับการวัดมิติของอุโมงค์ได้จาก [3] วิธีนี้โดยทั่วไปแล้วจะมีความแม่นยำระดับ ±4 มม. ในระยะทางสแกนไม่เกิน 300 ม. [3] (ยิ่งสแกนไกล ยิ่งคลาดเคลื่อน) แต่ความคาดเคลื่อนก็จะขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมในอุโมงค์ด้วย เช่น ปริมาณฝุ่น ความชื้น และฝน ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดการเปรียบเทียบวิธีการวัดนี้กับวิธีการวัดโดยใช้กล้อง Total Station ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์สำหรับโครงการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟได้จาก [4]

การถ่ายภาพซ้อนความละเอียดสูง (Photogrammetry) วิธีนี้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพความละเอียดสูงด้วยกล้องดิจิตอลในอุโมงค์ ณ ตำแหน่งตั้งกล้องหลายตำแหน่ง และมักต้องใช้ซอฟแวร์เฉพาะของแต่ละผู้ผลิตเช่นกัน ดังรูปที่ 3 เพื่อสร้างภาพจำลองสามมิติของอุโมงค์ มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับความแม่นยำของวิธีนี้ เช่น ความละเอียดและคุณภาพของกล้องและภาพ ขนาดของวัตถุ จำนวนภาพที่ใช้ มิติความซับซ้อนของวัตถุ เป็นต้น [5] โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ±3-10 มม. แต่สามารถเพิ่มขีดความสามารถให้เกิดคลาดเคลื่อนได้น้อยมากในระดับ ±0.5 มม. [6]

รูปที่ 1 กล้อง Total Station และ เป้าสะท้อนแสง

รูปที่ 2 Laser Scanner



รูปที่ 3 เทคนิค Photogrammetry [6]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ด้วยเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือ ออกแบบวิธีการวัด ตลอดจนทดลองใช้และประเมินการใช้งานกับอุโมงค์เป้าหมาย (อุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช) ทำการตรวจสอบตำแหน่งการเบียดชนตามคำร้องขอจากคณะทำงานตรวจสอบโครงสร้างทางของ รฟท. ระหว่าง ผนังของอุโมงค์และขบวนรถ

3. ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยครอบคลุมประเด็นดังต่อไปนี้

3.1 ประเภทและคุณสมบัติเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์

เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ในงานวิจัย อยู่ในประเภทที่มีราคาและมีจำหน่ายตามท้องตลาด ประเภทมือถือ ใช้งานในระดับการก่อสร้างทั่วไป ใช้

แบตเตอรี่ของตนเอง มีความแม่นยำไม่มากกว่า ±2 มม. ต่อการวัดระยะ 10 ม. มีคุณภาพความทนทานกันน้ำและกันฝุ่นระดับ IP67

3.2 ขอบเขตเชิงพื้นที่ของการศึกษา

ต้นแบบเครื่องมือและวิธีการวัด ถูกใช้ตรวจสอบมิติของอุโมงค์ช่องเขา ความยาวของอุโมงค์ 235.90 เมตร (ทุกระยะ 5.00 เมตร) ตั้งอยู่ระหว่างสถานี ช่องเขา – ร่อนพิบูลย์ ในทางรถไฟสายใต้ ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 อุโมงค์ช่องเขา ตั้งอยู่ระหว่างสถานี ช่องเขา – ร่อนพิบูลย์ ในทางรถไฟสายใต้

3.3 แนวทางการวัด การตรวจสอบ นิยาม และกฎข้อบังคับ เกี่ยวกับเขตโครงสร้างและเขตบรรทุก

แนวทางการวัด การตรวจสอบ นิยาม และกฎข้อบังคับ เกี่ยวกับเขตโครงสร้างและเขตบรรทุกยึดหลักการ แนวทาง และหลักปฏิบัติภายใต้การทำงานและการบำรุงรักษาทางและโครงสร้างรองรับของการรถไฟแห่งประเทศไทย [8]

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

นิยาม คำศัพท์ หลักการการวัดตลอดจน มิติและขนาดทางรถไฟทางไกล ถูกนำเสนอดังต่อไปนี้

4.1 นิยามและศัพท์เฉพาะ

4.1.1 End Throw

End Throw คือ การจำลองเขตบรรทุก บริเวณปลายหรือท้ายของขบวนรถไฟ ดังรูปที่ 5

4.1.2 Center Throw

Center Throw คือ การจำลองเขตบรรทุก บริเวณกึ่งกลางของขบวนรถไฟ ดังรูปที่ 5

4.1.3 Center Bogie Throw

Center Bogie Throw คือ การจำลองเขตบรรทุก บริเวณตำแหน่งแคร่ของขบวนรถไฟ

4.1.4 Structural Profile (Gauge)

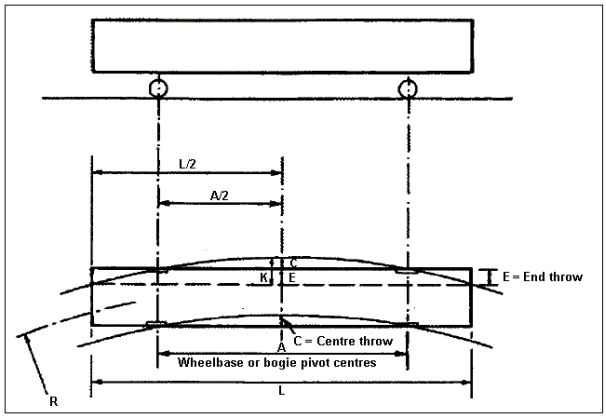
Structural Profile (Gauge) คือ เขตโครงสร้างตามแนวทางที่ปลอดภัยสำหรับการเดินรถผ่าน สำหรับ รฟท. ใช้การอ้างอิงเขตโครงสร้างที่ปลอดภัยตามข้อบังคับและระเบียบการเดินรถ (ขดร.) พ.ศ. 2549 ของ รฟท. ตามแบบเลขที่ 1966 – 36 ดังรูปที่ 6

4.1.5 Loading Profile (Gauge)

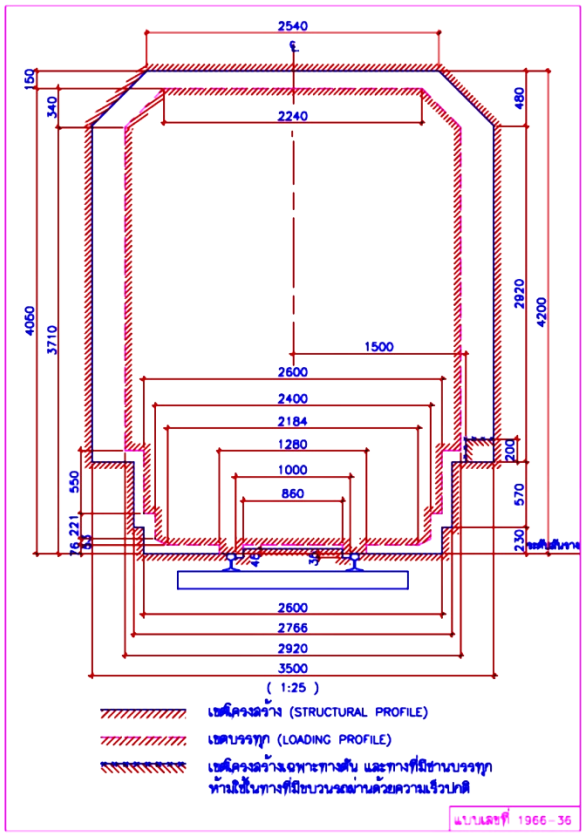
Loading Profile (Gauge) คือ เขตบรรทุก ขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของตัวรถ โดยใช้แบบมาตรฐานตามการอ้างอิงเขตบรรทุกที่ปลอดภัยตาม ขดร. พ.ศ. 2549 ดังรูปที่ 6

4.1.6 เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัย

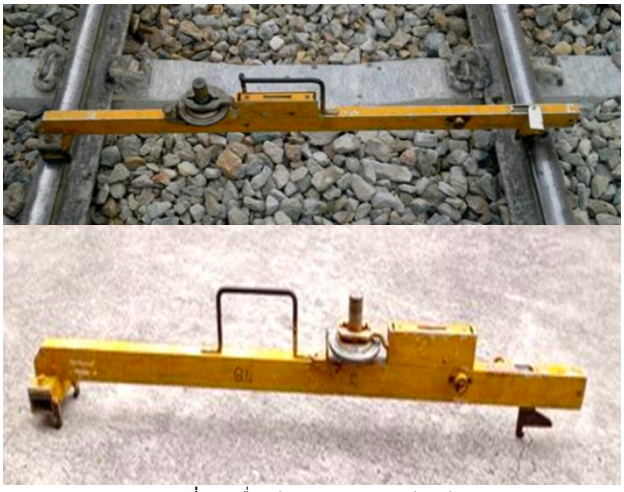
เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัย คือ เครื่องวัดขนาดความกว้างและความต่างระดับของรางประเภท Meter Gauge (1.000 ม.) ของ รฟท. โดยวัด ณ จุดที่ต่ำกว่าสันราง ลงไป 14 มม. (Gauge Point) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 5 ตำแหน่งเขตบรรทุก End และ Center Throw [http://www.trainweb.org/railengineering/track/Throw.html]



รูปที่ 6 เขตโครงสร้างและเขตบรรทุกตาม ขดร. 2549 [8]



รูปที่ 7 เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัย

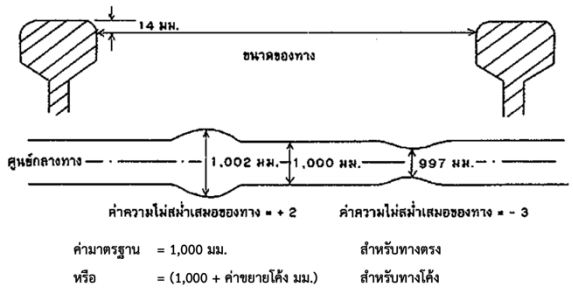
4.2 หลักการวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์

เครื่องวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ทำงานโดยใช้การวัดระยะเวลาที่มีการส่งพัลซ์ (Pulse) ของแสงเลเซอร์ออกไปยังเป้าหมายและส่งกลับมายังเครื่องวัด หลักการทำงานพื้นฐานคือวัด “เวลาของการเดินทาง” โดย อยู่บนพื้นฐานของความจริงที่ว่าแสงเลเซอร์เดินทางที่ความเร็วคงที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ระยะเวลาเดินทางดังกล่าวในเครื่องวัดจะถูกคำนวณได้อย่างรวดเร็ว

การคำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องวัดและเป้าหมายหาได้จาก D = 0.5CT โดยที่ที่ C คือความเร็วของแสงและ T คือเวลาสำหรับการเดินทางไปกลับระหว่างเครื่องวัดและเป้าหมาย แสงเลเซอร์จะมีความเข้มข้นของแสงปกติความถี่เดียว เครื่องวัดนี้มีประโยชน์มากสำหรับการวัดระยะทางเพราะแสงเลเซอร์เดินทางในอัตราที่ค่อนข้างคงที่ผ่านชั้นบรรยากาศ การเดินทางระยะทางยาวๆ ความเข้มและกำลังอาจจะลดลง และอาจจะแพร่กระจายออกจากลำแสงเดิมได้ ความถูกต้องของเครื่องเลเซอร์วัดระยะทางขึ้นอยู่กับคุณภาพของลำแสงเลเซอร์และพลังงานที่ส่งออกมา ลำแสงอาจถูกบิดเบือนจากฝุ่นละออง เป้าที่ตกระทบ และชั้นบรรยากาศจนอาจจะทำให้ยากที่จะได้รับการอ่านที่ถูกต้อง ดังนั้นระยะทางของวัตถุที่ต้องการตรวจวัดถ้าอยู่ไกลมากโอกาสความคลาดเคลื่อนก็มีสูง นอกจากนี้ความหลากหลายของผิววัตถุที่มีคุณสมบัติการสะท้อนแสง ตลอดจนมุมมองศาตกกระทบมากหรือน้อย ก็มีผลต่อการวัด เพราะวัตถุมีแนวโน้มที่จะดูดซับหรือกระจายแสง (แพร่) จนลดโอกาสที่เลเซอร์จะสะท้อนกลับ

4.3 มิติ ขนาด และค่าพิกัดความเคลื่อนของทางรถไฟ

ขนาดทาง คือ ระยะห่างของรางทั้งสองเส้นระหว่างริมรางด้านใน (Running Edge) ดังรูปที่ 8 รฟท. ใช้ขนาดทางประเภท Meter Gauge โดยมีขนาดทางมาตรฐานบนทางตรงและทางโค้ง ที่มีขนาดแตกต่างกัน คือ ทางตรงจะมีขนาด 1,000 มม. และทางโค้งจะมีขนาด 1,000 มม. + ค่าขยายขนาดทาง (ขยายทางด้านท้องโค้ง ตั้งแต่ 0-20 มม. ขึ้นอยู่กับรัศมีของโค้ง) การวัดขนาดทางปัจจุบัน รฟท. ใช้ “เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัย” ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องตรวจสอบคุณภาพทางด้วยค่าพิกัดความเคลื่อน (คคค.) คือ ค่าขนาดทาง และความไม่สม่ำเสมอของขนาดทาง โดยทำการวัดเมื่อไม่มีน้ำหนักกดทาง (Static Value) ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดทาง ต้องอยู่ในช่วงที่ยอมให้ได้ภายในพิกัด/มาตรฐาน [7]



รูปที่ 8 ขนาดและความคลาดเคลื่อนของทางขนาด Meter gauge (รฟท)

5. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยมีขั้นตอนครอบคลุมดังต่อไปนี้

5.1 ออกแบบและประยุกต์เลือกใช้เครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์

ผู้วิจัยได้มีแนวความคิดในการศึกษาหาและประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดและเป็นปัจจุบัน ให้เหมาะสมที่สุด เช่น การวัดระยะโดยใช้เทปวัด, เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือ (Handheld Laser Range Finder), กล้อง Total Station, เครื่องสแกนสามมิติ (3D Scanner) และ การใช้ภาพถ่าย (Photogrammetry) นอกจากนี้ ผู้วิจัยศึกษาวิธีการประยุกต์ใช้เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของ รฟท. และ การประยุกษ์ใช้แผ่นจานองศา (ครึ่งวงกลม) เพื่อเป็นอุปกรณ์ประกอบในการวัด หลังจากได้ศึกษาข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือวัดดังกล่าวแล้ว จึงนำข้อมูลมาตัดสินและคัดเลือกเครื่องวัดที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

5.2 ประกอบ ติดตั้งอุปกรณ์ และออกแบบวิธีการวัด

ผู้วิจัยได้มีแนวความคิดในการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดที่ได้คัดเลือกแล้วมาประกอบกับอุปกรณ์อื่นๆเพิ่มเติม และประยุกต์หาวิธีการวัดและเวลาที่ใช้วัดที่เหมาะสมที่สุด ระยะช่วงการวัดตามแนวทางรถไฟ ตลอดจนความเหมาะสมกับการนำไปจำลองผลของหน้าตัด และการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.3 ทดลองใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในอุโมงค์เป้าหมาย

ผู้วิจัยนำต้นแบบเครื่องมือวัดที่คิดค้นไปทดลองใช้กับอุโมงค์เป้าหมายที่เกิดปัญหาการเบียดชนระหว่างผนังอุโมงค์และขบวนรถไฟ นั่นคือ อุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช

5.4 รายงานผลการตรวจวัดและตำแหน่งที่มีโอกาสเบียดชน

ผู้วิจัยนำผลการตรวจวัดจากการวัดมิติอุของโมงค์เป้าหมาย แต่ละตำแหน่งตามแนวทางรถไฟ (STA.) โดยนำข้อมูลมาขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์อ้างอิงกับตำแหน่งรางรถไฟ พร้อมดำเนินการจำลองรูปตัดขวางของเขตบรรทุกในแต่ละตำแหน่งของขบวนรถ โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบพื้นฐาน

เช่น AutoCAD ให้เสมือนมีขบวนรถผ่านจริงที่ตำแหน่งหน้าตัดขวางที่ตรวจวัด

5.5 ปรับปรุงต้นแบบเครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ ให้มีความแม่นยำและมีขนาดเล็กลง

ผู้วิจัยนำข้อดีและข้อเสียของต้นแบบเครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์รุ่นแรก มาปรับปรุงในประเด็นความแม่นยำ วิธีการวัด และ การลดขนาดและน้ำหนัก เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานมากขึ้น

6. ผลการวิจัย

ผลการดำเนินการวิจัยมีลำดับและรายละเอียดครอบคลุมหัวข้อดังต่อไปนี้

6.1 ผลการออกแบบและประยุกต์เลือกใช้เครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์

จากการประเมินและศึกษาเครื่องมือวัดประเภทต่างๆ ผู้วิจัยได้มีแนวความคิดในการคัดเลือกและประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดที่มีใช้อยู่ในท้องตลาดและเป็นปัจจุบัน ต้นทุนด้านราคาที่ต่ำ ตลอดจนความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามวัตถุประสงค์ของการประเมินมิติตามขวางของอุโมงค์เพื่อตรวจสอบเทียบเคียงกับเขตบรรทุก โดยเน้นอ้างอิงกับตำแหน่งกึ่งกลางของราง ผลการศึกษาเปรียบเทียบ เครื่องมือวัดประเภทต่างๆ ถูกแสดง ดังตารางที่ 1 จากการเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่า แต่ละเครื่องมือวัดมีความสามารถในการตรวจวัดที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะวัดหน้าตัดตามขวางของอุโมงค์โยงยึดกับตำแหน่งอ้างอิงของราง เนื่องจากเขตบรรทุกหรือขบวนรถที่วิ่งบนรางใช้ตำแหน่งนี้อ้างอิงตลอดเส้นทางในอุโมงค์เช่นกัน ดังนั้นเครื่องมือวัดต่างๆ จำเป็นจะต้องสามารถวัดระยะจากแนวศูนย์กลางอ้างอิงของรางไปยังผนังอุโมงค์ให้ได้ ซึ่งศูนย์กลางอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นจุดกึ่งกลางที่อยู่ในแนวระดับที่อยู่สูงกว่าสันรางของรางที่อยู่สูงกว่า ทั้งนี้เพื่อหลีกหนีอุปสรรคที่อาจจะกีดขวางการส่งแสงเลเซอร์หรือเทปวัดระยะ

เทปวัดระยะถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานในการวัด แต่เนื่องจากจำเป็นต้องอาศัยนั่งร้านหรืออุปกรณ์จับยึดเพื่อสามารถยืดเทปถึงผนังอุโมงค์ จึงถือว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้เวลามากและไม่เหมาะสม กล้อง Total Station ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือพื้นฐานความละเอียดสูงในการตรวจวัดตำแหน่งบนผนังอุโมงค์ โดยมีทั้งระบบใช้เป้าสะท้อนแสงและไม่ใช้ การใช้เป้าสะท้อนแสงจะให้ความแม่นยำในการวัดระยะที่ดีกว่า แต่การติดตั้งเป้าบนผนังอุโมงค์ โดยเฉพาะการติดตั้งได้ทุกๆ STA. ตามแนวรางมีต้นทุนที่สูง ดังนั้นการวัดระยะโดยไม่ใช้เป้าจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า ถึงแม้จะได้ความแม่นยำที่น้อยกว่าก็ตาม แต่ก็เพียงพอต่อการเปรียบเทียบผนังอุโมงค์กับเขตบรรทุก เครื่องวัด Laser Scanning โดยทั่วไปมีราคาสูงกว่าและมีความแม่นยำที่น้อยกว่ากล้อง Total Station แต่การวัดทำได้รวดเร็ว จึงลดเวลาการอยู่ในอุโมงค์ได้มากกว่าซึ่งเป็นพื้นที่ที่อันตราย แต่ข้อมูลจากเครื่องวัดนี้จำเป็นต้องใช้ซอฟแวร์เฉพาะของผู้ผลิต (มักจำเป็นต้องซื้อเพิ่มเติม) ในการประมวลผลและสร้างจุดอ้างอิงที่จะโยงยึดข้อมูลจำนวนมากเข้าหากัน โดยเหมาะกับการสร้างภาพสามมิติมากกว่า การวัดโดย Photogrammetry มีความซับซ้อนมากที่สุดเนื่องจากจำเป็นต้องถ่ายภาพจำนวนมาก ที่มีความละเอียดสูง จึงเหมาะกับการสร้างภาพสามมิติที่เน้นให้เห็นชนิดของเนื้อวัตถุ (Texture) ถึงแม้จะสามารถนำมาใช้กับการสร้างภาพสามมิติของอุโมงค์ได้ แต่การติดตั้งกล้องหลายตำแหน่ง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อยในอุโมงค์ ซึ่งจำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดแสดงที่ดี จึงไม่เหมาะสมสำหรับงานตรวจสอบมิติตามขวางในครั้งนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางในการนำเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือมาประยุกต์ร่วมกับการใช้เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยที่มีใช้อยู่แล้วใน รฟท. มากำหนดตำแหน่งศูนย์กลางอ้างอิง และทำงานร่วมแผ่นจานองศา ซึ่งโดยภาพรวมแล้ว มีต้นทุนในการจัดซื้อต่ำ เทคนิคการวัดไม่ซับซ้อน แสงเลเซอร์ทำงานได้ดีในอุโมงค์ที่มีแสงน้อย ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และการประมวลผลเปรียบเทียบทำได้ง่าย ถึงแม้จะมีข้อด้อยในการวัดในอุโมงค์ที่ใช้เวลาที่ค่อนข้างมากกว่า Laser Scanning ก็ตาม

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดรูปแบบเครื่องมือวัดประเภทต่างๆ เพื่อวัดมิติตามขวางของอุโมงค์เพื่อตรวจสอบเทียบเคียงกับเขตบรรทุก

เครื่องมือวัด	ความแม่นยำทั่วไป (มม.)	ช่วงราคา (บาท)	วิธีการวัด (อ้างอิงกับราง)	เทคนิคและอุปกรณ์ประกอบ
เทปวัด	±5	500-2,000	ผู้ใช้วัดจากกึ่งกลางราง ตามมุมองศาที่กำหนด ณ. STA. ต่างๆ ตามแนวราง	เครื่องวัดขนาดทาง รฟท., นั่งร้าน, โปรแกรมเขียนแบบพื้นฐาน
Handheld Laser Range Finder	±2	1,500-3,000	ผู้ใช้วัดจากกึ่งกลางราง ตามมุมองศาที่กำหนด ณ. STA. ต่างๆ ตามแนวราง	เครื่องวัดขนาดทาง รฟท., โปรแกรมเขียนแบบพื้นฐาน
Total Station (วัดระยะแบบไม่ใช้เป้าสะท้อนแสง)	±2	200,000-300,000	วัดหน้าตัด ณ STA ต่างๆ ตามองศา หรือ วัดวงรอบแบบโยงยึด พร้อมการปรับแก้	อาจจะมีการใช้เป้าสะท้อนแสงเพิ่มเติม กรณีใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อความแม่นยำที่สูงขึ้น
Laser Scanning	±4	300,000-500,000	ระบุมิติโดยใช้ระบบ Point Cloud	ใช้โปรแกรมเฉพาะของผู้ผลิตเครื่องมือในการแสดงผลหน้าตัดอุโมงค์
Photogrammetry	±3-10	200,000-300,000*	ระบุมิติโดยใช้ระบบการซ้อนภาพถ่ายความละเอียดสูง	ใช้โปรแกรมเฉพาะของผู้ผลิตเครื่องมือในการแสดงผลหน้าตัดอุโมงค์

** รวมชุดไฟส่องสว่างและกล้อง 2-3 ตัวพร้อมเลนส์คุณภาพสูง*

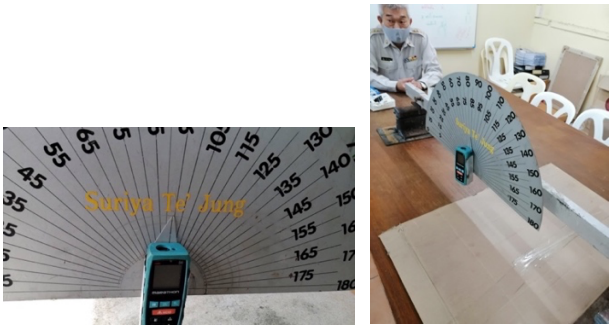
6.2 ผลการประกอบ ติดตั้งอุปกรณ์ และออกแบบวิธีการวัด

ผู้วิจัยได้ประยุกต์ออกแบบชุดเครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ทางรถไฟด้วยเลเซอร์วัดระยะ จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่นแรกทดลองติดตั้งเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือบนจานองศา ดังรูป 9 โดยแผ่น

จานองศาทำจากแผ่นโลหะขนาดใหญ่มีสเกลทุกๆ 5 องศา ออกแบบและพิมพ์จากคอมพิวเตอร์เพื่อความแม่ยำ ถูกติดตั้งให้มีจุดหมุนอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นการวัดระยะ และอยู่ที่จุดศูนย์กลางอ้างอิงระหว่างราง โดยอาศัยการติดตั้งและประกอบกับเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัย

รุ่นที่สอง ใช้เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือ ที่สามารถวัดมุมองศาเทียบกับแนวระดับได้ด้วยตนเอง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีแผ่นจานองศาซึ่งมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ยากต่อการขนย้ายและเก็บรักษา ดังรูป 10 คุณสมบัติเบื้องต้นของเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือทั้ง 2 รุ่น ถูกแสดงดังตารางที่ 2

เครื่องวัดรุ่นที่สองนี้ใช้เทคโนโลยี MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) ซึ่งภายในบรรจุไมโครชิพที่สามารถตรวจวัดความเร่ง (On-chip accelerometer sensors) ซึ่งสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และนำมาคำนวณหาค่ามุมเอียงจากแนวระดับได้



รูปที่ 9 เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือรุ่นแรก แบบมีจานองศา

รูปที่ 10 เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือรุ่นที่สอง วัดมุมได้ด้วยตนเอง โดยไม่มีจานองศา

ตารางที่ 2 สรุปคุณสมบัติเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือทั้ง 2 รุ่น

รุ่น	ความแม่นยำทั่วไป* (มม.)	ความละเอียดในการแสดงผล (ม.)	ระยะวัดสูงสุด (ม.)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ความแม่นยำในการวัดมุม (องศา)
MARATHON รุ่น S6	±1.5	0.001	60	635	ไม่มี
LOMVUM รุ่น 77U	±2	0.001	60	630-670	0.1 (0-90°)

** ในระยะไม่เกิน 10 ม.*

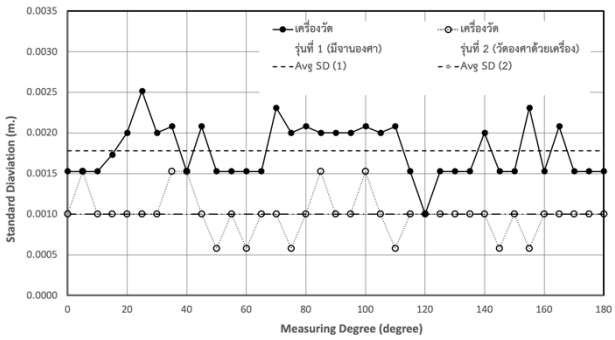
6.3 ผลการทดลองใช้ อุปกรณ์และเครื่องมือวัดในอุโมงค์เป้าหมาย

ผู้วิจัยนำต้นแบบเครื่องมือวัดทั้งสองรุ่นเข้าทดลองใช้กับอุโมงค์เป้าหมายที่เกิดปัญหาการเบียดชนระหว่างผนังอุโมงค์และขบวนรถไฟ นั่นคือ อุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีวิธีการวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ที่ไม่ซับซ้อน ผู้ใช้ทั่วไปสามารถทำได้ แต่ต้องอาศัยความสามารถในติดตั้งและใช้กับเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของ รฟท. ผู้ใช้ยังคงต้องมีความละเอียดในการวัดเพื่อให้ได้ค่าที่สมบูรณ์ และคลาดเคลื่อนน้อย โดยมีวิธีการวัดระยะออกจากจุด ศูนย์กลางอ้างอิงถึงผนังอุโมงค์ โดยเครื่องวัด ณ ตำแหน่งมุม 0 องศาต้องอยู่ที่แนวราบสมบูรณ์ และทราบความสูงของจุดศูนย์กลางอ้างอิงการหมุนจากระดับสันรางด้านที่สูงกว่า ขั้นตอนวิธีการวัดมิติอุโมงค์มีดังนี้

1. ดำเนินการแบ่ง STA. ของอุโมงค์ช่องเขา ทุกระยะ 5.00 เมตร (โดยความยาวของอุโมงค์เท่ากับ 235.90 เมตรและมีรัศมีโค้งของทางรถไฟในอุโมงค์ เท่ากับ 350 เมตร) ได้จำนวน 48 STA. และทุก STA จะต้องดำเนินการวัดระยะตามตำแหน่งมุมของจานองศาตั้งแต่ 0 - 180 องศา วัดทุกๆ 5 องศา จำนวน 37 ค่า ต่อ STA. โดย ที่ 0 และ 180 องศา หมายถึงเครื่องวัดจะอยู่แนวราบ ซึ่งปรับตั้งแนวราบได้จากเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของ รฟท. บันทึกระยะความสูงของจุดหมุนหรือศูนย์กลางอ้างอิงกับสันรางด้านที่สูงกว่า
2. เฉพาะ STA. ที่ 20 ผู้วิจัยใช้เครื่องวัดรุ่นแรก (แบบมีจานองศา) และ เครื่องวัดรุ่นที่ 2 (วัดองศาด้วยเครื่อง) วัดเปรียบเทียบกัน เครื่องละ 3 ครั้งๆ ละ 37 ค่า โดยผู้ใช้คนเดิม บันทึกเวลาที่ใช้ของเครื่องวัดทั้งสองรุ่น
3. เลือกรุ่นที่สะดวกและเหมาะสมในการวัดมากกว่าและขยายผลไปยัง STA. ต่างๆ โดยผู้ใช้คนเดิม
4. นำค่าที่ได้จากการวัดมิติอุโมงค์ แต่ละ STA. มาขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟ พร้อมดำเนินการจำลองรูปตัดเขตบรรทุกในแต่ละช่วงขบวน การขึ้นรูปจำลองใช้โปรแกรมเขียนแบบพื้นฐาน โดยให้มีอัตราส่วนที่ถูกต้อง และหาจุดตำแหน่งวิกฤติหรือจุดที่คาดว่าขบวนรถเบียดชนกับผนังอุโมงค์

รูปที่ 11 แสดงผลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของแต่ละองศาการวัด เฉพาะที่ตำแหน่งของ STA. ที่ 20 เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากเครื่องวัดทั้งสองรุ่น ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกตำแหน่งองศาของเครื่องวัดรุ่นแรกแบบมีจานองศามีค่า 1.8 มม. ซึ่งสูงกว่าของเครื่องวัดรุ่นที่สองแบบวัดองศาด้วยตัวเองที่มีค่า 1

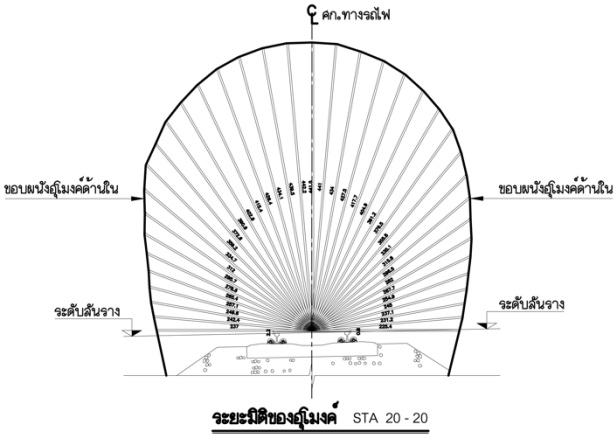
มม. ซึ่งเป็นผลที่คาดการณ์ได้เนื่องจาก ผู้ใช้เครื่องวัดรุ่นแรกมีโอกาสหมุนเครื่องวัดด้วยมือไปตามแต่ละตำแหน่งมุมบนแผ่นจานองศา ที่อาจจะคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไปเล็กน้อยในแต่ระรอบการวัด เพราะการมองด้วยสายตาอาจไม่แม่นยำ จึงทำซ้ำได้ยากกว่าการใช้เครื่องมือวัดรุ่นที่สองแบบวัดองศาด้วยตัวเอง ซึ่งผู้ใช้เห็นค่ามุมแสดงบนหน้าปัดเครื่องวัดเป็นตัวเลขดิจิตัลความละเอียด 0.1 องศา ได้โดยตรง นอกจากนี้การวัดในแต่ละครั้งอาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว เช่น จากการสะท้อนแสงของพื้นผิวผนังอุโมงค์ในการวัดแต่ละครั้งที่แตกต่างกัน รวมถึงสภาวะความชื้นและฝุ่น ณ ขณะทำการวัด แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของเครื่องวัดรุ่นที่สองแสดงค่าเบี่ยงเบนที่น้อยกว่า แต่โดยรวมเครื่องทั้งสองรุ่นยังใช้เวลาในการวัดใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นการทวนสอบความน่าเชื่อถือเฉพาะตำแหน่ง STA. ที่ 20 ที่ตำแหน่งมุม 0, 20, 40, 140, 160 และ 180 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งความสูงที่สามารถดึงเทปวัดได้สะดวก ค่าการวัดเฉลี่ย 3 ครั้งของทุกมุมดังกล่าว สูงกว่าค่าการวัดจากเครื่องวัดด้วยเลเซอร์วัดระยะประมาณ 1-1.5 มม. ซึ่งมีแนวโน้มที่เป็นไปได้เนื่องจากการดึงเทปอาจจะมีแนวการดึงที่ไม่ได้เป็นเส้นตรงเหมือนกับลำแสงเลเซอร์



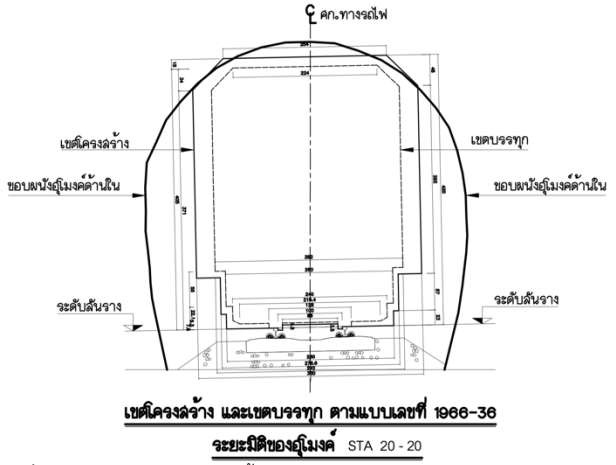
รูปที่ 11 แสดงผลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของแต่ละองศาการวัด

รูปที่ 12 และ 13 แสดงผลตัวอย่างการขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ของ STA. ที่ 20 จากทั้งหมด 47 STA. สำหรับ STA. ที่ 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 38, 39, 40, 41, 42, และ 48 เขตบรรทุกมีระยะใกล้กับผนังหรือโครงสร้างของอุโมงค์ (ยังไม่เบียดชน) ตำแหน่งที่เขตบรรทุกที่มีการเบียดชนกับผนังหรือโครงสร้างภายในของอุโมงค์ คือ STA. 17 เท่านั้น ทั้งนี้สำหรับ STA. อื่นๆ ผนังอุโมงค์มีขนาดใหญ่กว่าเขตบรรทุกและเขตโครงสร้าง

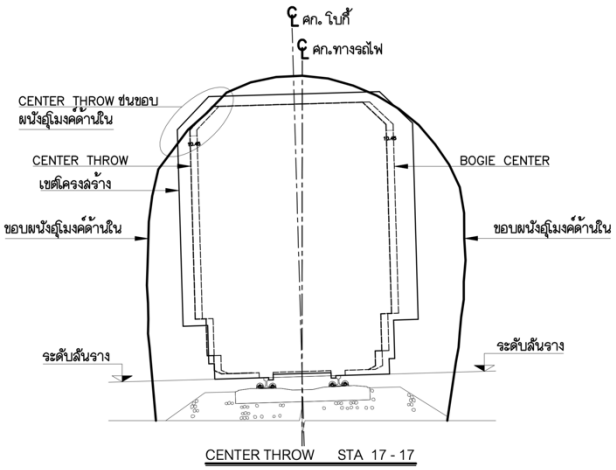
รูปที่ 14 แสดงผลตัวอย่างการขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ของ STA. ที่ 17 ที่เป็นเพียงตำแหน่งเดียวที่เขตบรรทุกที่กึ่งกลางรถ (Center Throw) เบียดชนกับผนังหรือโครงสร้างภายในของอุโมงค์ ณ ตำแหน่งมุมบนด้านซ้ายของขบวนรถ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่รายงานโดยคณะทำงานตรวจสอบโครงสร้างทางในเส้นทางรถไฟในอุโมงค์ช่องเขาของ รฟท.



รูปที่ 12 แสดงผลตัวอย่างการขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ของ STA. ที่ 20



รูปที่ 13 แสดงผลตัวอย่างการขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ของ STA. ที่ 20



รูปที่ 14 แสดงผลตัวอย่างการขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ของ STA. ที่ 17 ที่เขตบรรทุก (Center Throw) มีระยะทับกับโครงสร้างภายในของอุโมงค์

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือในงานวิจัยนี้ถือว่าเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ตามวัตถุประสงค์ด้านการวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ เพื่อวัตถุประสงค์การตรวจสอบการเบียดชนของขบวนรถไฟ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติเพียงพอและยอมรับได้ในระดับหนึ่งด้านความคลาดเคลื่อนของการวัด

แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องวัดประเภทอื่นๆที่ใช้เทคนิคแสงเลเซอร์ ความหลากหลายการสะท้อนแสงของพื้นผิวผนังอุโมงค์ สภาวะความชื้นและฝุ่นของอุโมงค์จะมีผลต่อการตรวจวัดด้วย ดังนั้นการวัดในแต่ละครั้งอาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนเป็นพื้นฐานอยู่แล้ว

นอกจากนี้ราคาต้นทุนของเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือมีราคาต่ำ มีความทนทานระดับหนึ่ง และน้ำหนักรวมของเครื่องวัดแบบวัดองศาด้วยตนเองเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยถือว่าเหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายและดูแลเก็บรักษา ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ของเจ้าหน้าที่ผู้ใช้ตามแขวงหรือเขตทางต่างๆ ของ รฟท. ที่ไม่ต้องการมีภาระในการดูแลครุภัณฑ์ที่มีราคาสูง และการใช้งานเครื่องวัดที่ไม่ซับซ้อนตรงไปตรงมา เครื่องวัดมิติตามขวางของอุโมงค์รุ่นที่สองแบบวัดองศาด้วยตนเองจึงมีความเหมาะสมและให้ค่าที่คลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบที่มีจานองศา

จากการทดลองใช้ในภาคสนาม สำหรับอุโมงค์เป้าหมาย คือ อุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีรายงานการเบียดชนจากคณะทำงานตรวจสอบโครงสร้างทางในเส้นทางรถไฟในอุโมงค์ช่องเขา ของ รฟท. มาก่อนหน้านี้ เครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ทางรถไฟด้วยเลเซอร์จากงานวิจัยนี้สามารถระบุตำแหน่งการชนในอุโมงค์ได้แม่นยำ ใกล้เคียงกับตำแหน่งโดยประมาณตามรายงานที่เคยแจ้งไว้ ซึ่ง ณ ขณะนั้นยังไม่ทราบตำแหน่งในอุโมงค์ที่แท้จริง เพียงแต่ทราบตำแหน่งการชนที่รถจำลองเขตบรรทุก (Mock up car) ดังนั้นทำให้การแก้ไขปัญหาการเบียดชนสามารถทำได้โดยการแก้ไขเฉพาะจุดหรือช่วงในอุโมงค์ที่มีปัญหาได้อย่างแม่นยำ ทั้งที่ขบวนรถ โครงสร้างทาง และ โครงสร้างอุโมงค์ และสุดท้ายส่งผลต่อการประหยัดงบประมาณ

แต่ทั้งนี้เครื่องมือวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ที่พัฒนาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีจุดที่ควรพัฒนาต่อยอด เช่น ควรลดความผิดพลาดของผู้ใช้ในการปรับมุมองศาด้วยตนเอง โดยควรพัฒนาให้เครื่องวัดสามารถปรับมุมหมุนได้อัตโนมัติ ภายใต้ความคลาดเคลื่อนของการหมุนที่ยอมให้ และมีการจดบันทึกค่าลงในหน่วยความจำแทนการจดด้วยมือ การปรับปรุงทั้งสองประเด็นจะสามารถช่วยให้ใช้จำนวนผู้วัดน้อยลง (จาก 2 คน เหลือเพียง 1 คน) การวัดในแต่ละ STA. จะใช้เวลาน้อยลง ลดเวลาการทำงานในอุโมงค์ทั้งหมดลง ซึ่งจะเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้วัดมากขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากการสนับสนุนงบประมาณและการอนุญาตเข้าพื้นที่อุโมงค์เป้าหมาย จากการรถไฟแห่งประเทศไทย ตลอดจนการสนับสนุนจาก นาย มุติทัต รัตนวรรณ์ วิศวกรกำกับการกองผลิตและซ่อมสร้างสะพาน ศูนย์สะพาน ฝ่ายการช่างโยธา คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Michael, J.K. (2005). Monitoring ground deformation in tunnelling: Current practice in transportation. *Engineering Geology*, 79(1), pp93-113.

[2] Yanbin L., Jianxun C., Weizheng X., Pengyu Z., Xiong Q., Xianghui D., and Qin L. (2016). Analysis of tunnel displacement accuracy with total station. *Measurement*, 83, pp.29–37.

[3] Weixing W., Weisen Z., Lingxiao H., Vivian V., and Zhiwei W. (2014). Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition), 1(5), pp.325–337.

[4] Cheng L., Xiaoping L., Ningning Z., Yao L., Yongbin W., and Guo-qing L. (2015). Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points. *Acta Geodaetica et Cartograph- ica Sinica*, 44(9), pp.1056–1062.

[5] Geodetic Systems Inc. *Basics of photogrammetry* (https://www.geodetic.com/basics-of- photogrammetry/).

[6] Scaioni M., Barazzetti L., Giussani A., Previtali M., Roncoroni F., and Alba M.I. (2014). Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation. *Earth Science Informatics*, 7(2), pp.83–95.

[7] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) (2561). *คู่มือการบำรุงรักษาโครงสร้างทางรถไฟ*. สนข. , หน้า 2-8 ถึง 2-15.

[8] การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) (2549). *ข้อบังคับและระเบียบการเดินรถ*. รฟท.