

## การพัฒนาต้นแบบเครื่องวัดมิติอุโมงค์รถไฟด้วยเลเซอร์วัดระยะและความคม ด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์

### A Prototype of Laser Range Finder for measuring railway tunnel cross-section

ยศธร สุวรรณวรวิกิจ<sup>1\*</sup> และ กิติเดช สันติชัยอนันต์<sup>2</sup>

Yose-sathorn Suwanworawikit<sup>1\*</sup> and Kitidech Santichaianant<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

<sup>1,2</sup>Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

Received : 2024-09-09 Revised : 2024-10-09 Accepted : 2024-10-29

#### บทคัดย่อ

ในปี พ.ศ. 2559 การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ได้มีการสร้างเครื่องวัดมิติอุโมงค์รถไฟด้วยเลเซอร์รุ่นที่ 1 เพื่อเป็นการใช้งานภายในในการวัดเขตโครงสร้าง ในอุโมงค์ทางรถไฟ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์แบบมือถือร่วมกับแผ่นจานองศา ต่อมาในปี พ.ศ. 2563 เครื่องดังกล่าวรุ่นที่ 2 ได้ถูกพัฒนาต่อยอดโดยนำเครื่องวัดระยะที่มีฟังก์ชันการแสดงผลค่ามุมภายในบนตัวเครื่องมาทดแทนการใช้แผ่นจานองศาซึ่งมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากออก แต่เครื่องทั้ง 2 รุ่นก็ยังต้องใช้ผู้ควบคุมในการหมุนไปตามมุมมองต่าง ๆ จัดค่าระยะด้วยมือ และใช้เวลานาน ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาเครื่องวัดมิติอุโมงค์ต่อยอดจากเครื่องรุ่นเดิมทั้งสอง โดยเพิ่มความสามารถในการทำงานและเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติ บันทึกข้อมูลลงในหน่วยบันทึกความจำขนาดเล็ก (SD Card) เพื่อสะดวกในการถ่ายโอนข้อมูลสู่คอมพิวเตอร์ภายหลัง ขั้นตอนการศึกษา เริ่มจาก การออกแบบ การสร้างและประกอบเครื่อง การออกแบบและควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การสอบเทียบกับเครื่องมือวัดพื้นฐานประเภทต่าง ๆ และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการวัดทดสอบอุโมงค์จริงในภาคสนามผลการศึกษาพบว่า 1) จากการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดพื้นฐานประเภทต่าง ๆ นั้นคือ กล้องประมวลผลรวม (Total Station) เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบ

มือถือ และเทปวัดระยะ ค่าระยะที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้น มีเพียงบางตำแหน่งการวัดตามมุมมองค่าที่มีค่าแตกต่างกัน และแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 2$  มิลลิเมตร 2) จากการทดสอบโดยการวัดมิติอุโมงค์จำลอง (โถงทางเดินและโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะคล้ายอุโมงค์) เปรียบเทียบกับกล้องประมวลผลรวม (Total Station) เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ และเทปวัดระยะ ค่าระยะที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้น มีเพียงบางตำแหน่งการวัดตามมุมมองค่าที่มีค่าแตกต่างกัน และแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 3$  มิลลิเมตร ทั้งนี้ การวัดใช้เวลา 6 - 7 นาทีต่อการวัดมิติอุโมงค์รถไฟ 1 หน้าที่ตัด และ 3) จากการทดสอบโดยการวัดมิติอุโมงค์จริงเปรียบเทียบกับกล้องประมวลผลรวม (Total Station) และเครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ ค่าระยะที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้น มีเพียงบางตำแหน่งการวัดตามมุมมองค่าที่มีค่าแตกต่างกัน และแตกต่างกันไม่เกิน  $\pm 3$  มิลลิเมตร ดังนั้น ค่าที่นำเช็ถือนี้ถูกบันทึกเก็บโดยอัตโนมัติในหน่วยความจำ SD Card และนำมาขึ้นรูปหน้าตัดของอุโมงค์ภายหลังโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ และสามารถแสดงหน้าตัดของอุโมงค์รถไฟที่จำลองขอบเขตมิติของผนังอุโมงค์ได้อย่างถูกต้อง สามารถนำมาอ้างอิงเปรียบเทียบกับเขตโครงสร้างและเขตบรรทุกได้อย่างมีประสิทธิภาพน่าเชื่อถือเพื่อการดูแลรักษาอุโมงค์และการเดินรถไฟที่ปลอดภัยต่อไป

\*ยศธร สุวรรณวรวิกิจ

E-mail address: yotesathon@gmail.com

**คำสำคัญ :** อุโมงค์รถไฟ, เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์, รูปหน้าตัด, เขตโครงสร้าง, ไมโครคอนโทรลเลอร์

### Abstract

In 2016, State Railway of Thailand (SRT) developed a prototype of laser range finder for measuring railway tunnel cross-section by using laser range finder together with angle protractor. After that, the laser distance meter had been further developed into a new model in 2020. This new model used the handheld laser range finder which has its own build-in angle displayed functions. Therefore, the new model design, the big and heavy steel angle protractor had been removed which made it easy to be operated and transported. However, these two developed models still require operator for manually adjusting the angle of measurement and still need time to be operated. Thus, the purpose of this research was to develop the next generation of the device capable of automatic operating as well as automatic data collection stored in a small SD card for easily data transferring to a computer. The study method was started from, structural design, built and assembly, design of electronic devices and assembly, calibration with standard measuring devices and finally measuring the real tunnel at Khao Pang Hei tunnel located at the northeast railway route of Thailand. The study results showed that 1) the measuring results between the developed device compared with other basic and standard devices, i.e., the total station, handheld laser range finder and measuring tapes were similar. There were only some angles that showed differences not more than  $\pm 2$  millimeters, 2) The measuring results on tunnel models (building hallway and similar structures) compared to those standard devices were similar with differences not more than  $\pm 3$  millimeters. In addition, the measuring time used for each

measurement was only 6-7 minutes for a cross-section and 3) The measuring results of the real tunnel comparing with the total station, handheld laser distance meter, and measuring tapes were similar. There were only some angles that showed the differences not more than  $\pm 3$  millimeters. Then, these accepted measured data were used to generate the tunnel cross section in a computer drawing program. The drawing was capable to be reliably utilized as a reference and precisely compared to the railway structural and loading gauges. Consequently, the new prototype of laser range finder for measuring railway tunnel cross-section can be used effectively for measuring the tunnel cross-section dimension for railway and can be used further by SRT to evaluate all safety and maintenances in railway tunnels nationwide.

**Keywords :** railway tunnel, laser range finder, cross section, structural gauge, microcontroller

### 1. บทนำ

การรถไฟแห่งประเทศไทย ได้มีการเดินรถไฟตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ครอบคลุมทั้งหมด 47 จังหวัดทั่วประเทศ เพื่อให้ประชาชนสามารถเดินทางกลับภูมิลำเนา และขนส่งสินค้า และอื่น ๆ ได้อย่างสะดวกและปลอดภัย ดังนั้นการเดินรถไฟจะต้องเดินรถไฟผ่านเส้นทางต่าง ๆ ตามสภาพภูมิประเทศ เช่น การเดินรถไฟผ่านทางราบ ทางโค้ง ข้ามแม่น้ำลำคลอง และภูเขา โดยสภาพภูมิประเทศบางพื้นที่ มีเนินเขาหรือภูเขาสูงปกคลุม จึงมีความจำเป็นจะต้องดำเนินการขุดเจาะอุโมงค์ในภูเขาสูง เพื่อให้สะดวกและลดเวลาในการเดินทาง

ในปัจจุบัน การรถไฟแห่งประเทศไทยได้มีขบวนรถโดยสารใหม่ ๆ และมีตู้สินค้าคอนเทนเนอร์ (ไฮคิว) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าในอดีต ดังนั้นการรถไฟแห่งประเทศไทยจำเป็นต้องตรวจสอบเขตโครงสร้างทางรถไฟภายในอุโมงค์ต่าง ๆ แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีใช้ในปัจจุบันที่มีราคาสูง และการใช้งานยังไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานของการตรวจสอบเขตโครงสร้างทางรถไฟเท่าที่ควร ในปี พ.ศ. 2559 การรถไฟแห่งประเทศไทย โดย

นายสุริยา พิทักษ์กุล วิศวกรงานเทคนิคบำรุงทาง [1] จึงได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดระยะขอบเขตทางในอุโมงค์รถไฟขึ้นมาใหม่ โดยใช้เครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ร่วมกับแผ่นจานองศา ใช้หลักการการทำงานโดยการปรับมุมองศาของเครื่องเลเซอร์วัดระยะให้ตรงกับแผ่นจานองศา ดังรูปที่ 1 เพื่อให้สามารถวัดระยะตามองศาที่ต้องการและเก็บข้อมูล แล้วนำมาเขียนรูปในโปรแกรมเขียนแบบ จำลองหน้าตัดที่อ้างอิงระหว่างผนังของอุโมงค์กับทางรถไฟ เพื่อเปรียบเทียบกับเขตบรรทุก และเขตโครงสร้างทาง



รูปที่ 1 เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รุ่นที่ 1 โดยนายสุริยา พิทักษ์กุล วิศวกรงานเทคนิคบำรุงทาง กองบำรุงทางขอนแก่น [1]

ในปี พ.ศ. 2563 ได้มีการจัดทำหลักสูตรอบรมระยะสั้นฐานสมรรถนะ อาชีพช่างเทคนิคซ่อมบำรุงโครงสร้างรองรับทางรถไฟ ชั้น 3 จัดโดยสถาบันคุณวุฒิวิชาชีพและการรถไฟแห่งประเทศไทย จากเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ในรุ่นที่ 1 ผศ.ดร.กิติเดช สันติชัยอนันต์ [2] ได้นำมาพัฒนาต่อยอด โดยมีความเห็นว่าควรนำเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์มาปรับปรุงและนำมาใช้ฝึกอบรมในหลักสูตรการซ่อมบำรุงอุโมงค์ เนื่องจากเครื่องดังกล่าวสามารถที่จะวัดมิติของอุโมงค์และตรวจสอบความผิดปกติของผนังอุโมงค์ได้ จึงมีการพัฒนาต่อยอดเป็นเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ในรุ่นที่ 2 โดยสามารถระบุมุมเปิดที่ตัวเครื่องได้เอง ดังรูปที่ 2 ดังนั้นจึงสามารถลดการใช้แผ่นเหล็กที่ระบุมุมองศาขนาดใหญ่ออกจากเครื่องต้นแบบรุ่นแรกได้ ทั้งนี้ยังได้ออกแบบระบบจุดหมุนและระบบยึดเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ใหม่ให้มีขนาดเล็ก เบา และมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3 แต่ก็ยังต้องใช้ผู้ควบคุมการหมุนตามองศาอยู่



รูปที่ 2 เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ รุ่นที่ 2 โดย กิติเดช สันติชัยอนันต์ [2] เทียบกับเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ รุ่นที่ 1



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ รุ่นที่ 2 เมื่อนำมาติดตั้งยึดกับเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของการรถไฟฯ [2]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ต้นแบบในรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 มาพัฒนาต่อยอด โดยนำชุดอุปกรณ์ในรุ่นที่ 2 มาทำการพัฒนาให้มีการทำงานและเก็บข้อมูลด้วยระบบอัตโนมัติ และนำข้อมูลที่ไต่ไปบันทึกไว้ในหน่วยบันทึกความจำขนาดเล็ก (SD Card) เพื่อสะดวกในการส่งข้อมูลที่ไต่ไปแสดงผลในโปรแกรมสเปรดชีต หรือขึ้นรูปในโปรแกรมเขียนแบบคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบจำลองขอบเขตของผนังอุโมงค์ต่อไป

## 2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์และวิธีการวัดมิติอุโมงค์ ต่อยอดจากรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 ให้มีการทำงานและเก็บข้อมูลด้วยระบบอัตโนมัติ และนำข้อมูลที่ไต่ไปบันทึกไว้ในหน่วยบันทึกความจำขนาดเล็ก (SD Card) และตรวจสอบคุณภาพความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์กับเครื่องมือวัดระยะพื้นฐานอื่น ๆ

### 3.ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยมีขอบเขต ในการออกแบบเครื่องมือนวัตกรรมด้วยเทคโนโลยี 3D Printing ร่วมกับคานหลัก โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของ รพท. หัววัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ มีความละเอียดของการวัดตามคุณสมบัติของผู้ผลิต อยู่ที่  $\pm 1$  มม. สำหรับระยะไม่เกิน 10 ม. ทำงานและเก็บข้อมูลด้วยระบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ บันทึกข้อมูลลงในหน่วยบันทึกความจำขนาดเล็ก (SD Card) และสามารถนำไปตรวจสอบมิติของโมเดลเก่าของการรถไฟแห่งประเทศไทยได้

### 4.ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 4.1.เทคนิคการวัดมิติของโมเดลโดยเครื่องมือต่าง ๆ

การวัดมิติของโมเดลรถไฟโดยการวัดหน้าตัดภายในของโมเดล มีความสำคัญทั้งขณะทำการก่อสร้างโมเดลและขณะกำลังใช้งานโมเดล โดยเฉพาะโมเดลที่มีขนาดใหญ่ที่ใช้ในงานด้านการขนส่งที่ต้องตรวจสอบความปลอดภัยจากการเบียดชนต่าง ๆ ระหว่างโครงสร้างของโมเดลและขบวนรถไฟในขณะที่ใช้งาน ดังนั้นการวัดมิติด้านในของโมเดลรถไฟ จึงมีเทคนิคที่สำคัญ และมีความหลากหลายวิธีดังต่อไปนี้

1) การใช้กล้อง Total Station (Total Station Survey) เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการวัดตำแหน่งพิกัดเชิงหน้าตัดของผนังของโมเดล โดยส่วนใหญ่จะทำการสำรวจโยงยึดกันเป็นวงรอบ และเป็นช่วง ๆ ตามแนวของโมเดล มีทั้งแบบใช้และไม่ใช้เป้าสะท้อนแสง (Optical Reflector Target) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดระยะ ดังรูปที่ 4 วิธีนี้สามารถระบุตำแหน่งบนผนังของโมเดลได้แม่นยำสูง โดยทั่วไปภายในระยะโยงยึดไม่เกิน 100 ม. ตามแนวของโมเดล ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเป้าตามแนวตำแหน่งตามยาวต่าง ๆ ของโมเดลจะอยู่ในช่วง  $\pm 2$  มม. และ อาจจะละเอียดสูงถึงระดับไม่เกิน  $\pm 1$  มม. สำหรับกรณีที่มีการโยงยึดปรับแก้และมีการติดตั้งอุปกรณ์และเป้าสะท้อนที่มีคุณภาพ [3]

2) การใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ (Laser Scanner) เป็นวิธีที่เริ่มแพร่หลายมากขึ้น เพราะเทคโนโลยีพัฒนาไปมากด้านนี้และใช้งานได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และแม่นยำระดับหนึ่ง ดังรูปที่ 5 เครื่องสแกนสามารถติดตั้งบนฐานที่เคลื่อนที่ เช่น พาหนะเคลื่อนที่ไปบนรางซ้า ๆ วิธีนี้จะใช้หัวเลเซอร์สแกนแบบพร้อมกันทุกทิศทางเพื่อจับระยะกระจายเชิงจุด (Point Cloud) จำนวนมากอย่างรวดเร็ว (อาจจะถึงระดับล้านจุดต่อ

วินาที) ซึ่งสามารถสร้างพื้นผิวสามมิติของผนังของโมเดลได้อย่างรวดเร็วครอบคลุมพื้นที่ได้มาก สามารถสแกนเก็บข้อมูลขณะเคลื่อนที่ได้ สามารถศึกษาเพิ่มเติมการใช้ประโยชน์ของวิธีนี้ สำหรับการวัดมิติของโมเดลได้จาก [4]

โดยทั่วไปแล้วจะมีความแม่นยำระดับ  $\pm 4$  มม. ในกรณีที่เครื่องสแกนไม่มีการเคลื่อนที่ และ อาจจะมี ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น กรณีที่เครื่องสแกนมีการเคลื่อนที่เช่นติดตั้งบนพาหนะ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนก็จะขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมในโมเดลด้วย เช่น ปริมาณฝุ่น ความชื้น และละอองน้ำ สามารถศึกษารายละเอียดการเปรียบเทียบวิธีการวัดนี้กับวิธีการวัดโดยใช้กล้อง Total Station ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังของโมเดลสำหรับโครงการก่อสร้างรถไฟได้จาก [5]

3) การใช้ภาพซ้อนความละเอียดสูง (Photogrammetry) วิธีนี้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพความละเอียดสูงด้วยกล้องดิจิทัลในโมเดล ณ ตำแหน่งของการตั้งกล้องหลาย ๆ ตำแหน่ง และมักต้องใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะในการประมวลผล ดังรูปที่ 6 เพื่อสร้างภาพจำลองสามมิติของโมเดล มีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้องกับความแม่นยำของวิธีนี้ เช่น ความละเอียดและคุณภาพของกล้องและภาพ ขนาดของวัตถุ จำนวนภาพที่ใช้มิติความซับซ้อนของวัตถุ เป็นต้น [6] โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 3-10$  มม. แต่สามารถเพิ่มขีดความสามารถให้เกิดคลาดเคลื่อนได้น้อยมากในระดับ  $\pm 0.5$  มม. [7]

4) การวัดระยะด้วยลำแสงเลเซอร์ ใช้หลักการตรวจจับเวลาของการเดินทางแสง (Time of Flight Principle) โดยจะใช้นาฬิกาอิเล็กทรอนิกส์ในการจับเวลาตั้งแต่เริ่มปล่อยแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดจนกระทั่งแสงเลเซอร์สะท้อนกลับมายังตัวรับ ซึ่งเวลาที่ได้นี้จะเป็นเวลาในการเดินทางของแสงตั้งแต่จากอุปกรณ์วัดระยะทางไปยังเป้าหมายจนกลับมาถึงอุปกรณ์อีกครั้ง

ในการวัดระยะด้วยเครื่องวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์เป็นการวัดระยะเส้นตรงหรือเชิงเส้น (Linear Distance) เครื่องวัดระยะชนิดแสงเลเซอร์จะส่งลำแสงเลเซอร์ในลักษณะของสัญญาณพัลส์ (Pulse) ไปยังจุดที่ต้องการวัดและตรวจจับเวลาที่สัญญาณพัลส์ส่งไปกระทบเป้าแล้วสะท้อนกลับมาเพื่อคำนวณเป็นระยะทาง ดังสมการนี้  $R = C ( T/2 )$  เมื่อ  $R =$  ระยะทาง  $C =$  ความเร็วแสง  $T =$  เวลาที่แสงเดินทางไปกลับระหว่างเครื่องวัดและเป้าหมาย [8] การวัดด้วยวิธีนี้

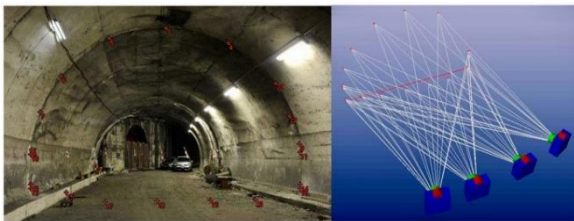
จำเป็นต้องวางแผนการวัดในทิศทางที่ต้องการอย่างแม่นยำ ดังนั้นการควบคุมการหมุนหรือสายไปในทิศทางต่าง ๆ ต้องใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่มีความละเอียดแม่นยำสูง



รูปที่ 4 กล้อง Total Station และเป้าสะท้อนแสง



รูปที่ 5 Laser Scanner



รูปที่ 6 เทคนิค Photogrammetry [6]

#### 4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

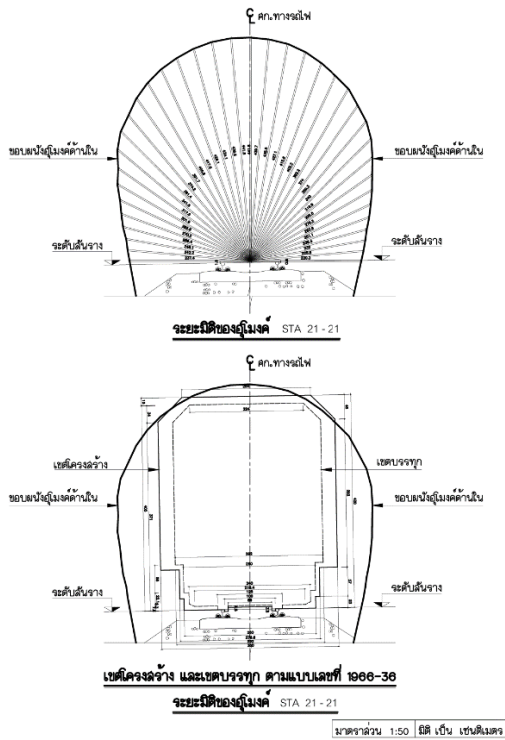
สุริยา พิทักษ์กุล วิศวกรงานเทคนิคบำรุงทาง กองบำรุงทางขอนแก่น การรถไฟแห่งประเทศไทย [1] ได้ทำการศึกษา ทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้องและออกแบบเครื่องมือวัดมิติ อุโมงค์และวิธีการวัดมิติอุโมงค์ โดยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. งานองศาเครื่องวงกลม พร้อมถอดติดตั้งเครื่องเลเซอร์วัดระยะ แบบมือถือ และ 2. เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของการรถไฟฯ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รุ่นที่ 1 ประกอบด้วยงานองศา เครื่องวงกลม เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือติดตั้งบน เครื่องวัดขนาดทางที่ทันสมัยของการรถไฟฯ [1]

การคิดค้นเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์มีวัตถุประสงค์ในการ เก็บข้อมูลมิติของอุโมงค์ จากการวัดระยะทางตามองศา ที่ต้องการ และติดตั้งกับเครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยของการรถไฟฯ สามารถใช้วัดขนาดทาง และวัดระดับตามขวางของรางรถไฟได้ แนวความคิดในการออกแบบมี 2 ส่วนดังนี้ 1. วัดระยะผนังอุโมงค์โดยใช้แนวกึ่งกลางของทางรถไฟเป็นจุดอ้างอิง โดยเก็บข้อมูลการวัดระยะทาง ตามองศาที่ต้องการ, การวัดขนาดทาง และการวัดระดับตามขวางของทาง เพื่อทราบระยะยกของทางรถไฟในโค้งแต่ละตำแหน่งที่กำหนด 2. ยึดความสัมพันธ์ระหว่างทางรถไฟในอุโมงค์ และขบวนรถไฟ โดยเก็บข้อมูล รัศมีโค้งของทางรถไฟ และรายละเอียดของขบวนรถ เช่น ความยาวของขบวนรถ และความยาวระหว่างเพลาถึงเพลา

การวัดมิติอุโมงค์มีวิธีการวัดระยะ โดยวัดระยะทางออก จากจุดกึ่งกลางของทางรถไฟถึงผนังอุโมงค์ เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์จะต้องถูกติดตั้งอยู่แนวราบ วัดระยะทางตามมุมตั้งแต่ 0-180 องศา (วัดระยะทาง ทุก ๆ 5 องศา ในระนาบหน้าตัดขวางตั้งฉากกับแนวทางรถไฟ) โดยแบ่งเป็นระยะ (STA.) ทุก 5.00 เมตร และนำค่าที่ได้ ในแต่ละช่วงมาขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์กับทางรถไฟในอุโมงค์ ด้วยโปรแกรมเขียนแบบพร้อมจำลองรูปหน้าตัดเขตบรรทุกในแต่ละช่วงของขบวน ดังรูปที่ 8



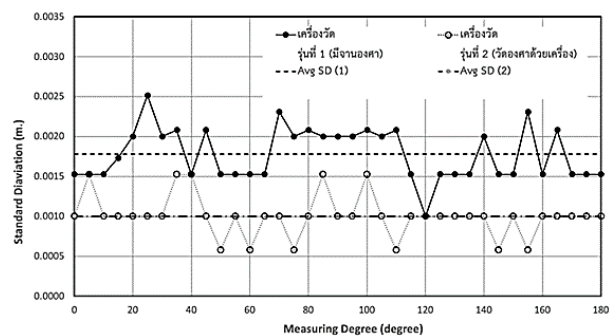
รูปที่ 8 ระยะมิติของอุโมงค์ แสดงถึงเขตโครงสร้าง และเขตบรรทุก [1]

กิติเดช สันติชัยอนันต์ และ สุริยา พิทักษ์กุล [7] ได้พัฒนาต้นแบบเครื่องมือวัดมิติตามขวางอุโมงค์รถไฟด้วย เลเซอร์วัดระยะต่อจากรุ่นที่ 1 โดยพัฒนาให้มีขนาดกะทัดรัด ขนย้ายสะดวก และง่ายต่อการบำรุงรักษาโดยการใช้ เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ ที่ตัวเครื่องวัดสามารถวัดมุม องศาเทียบกับแนวระดับได้ด้วยตนเอง ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องวัดมิติตามขวางอุโมงค์รถไฟรุ่นที่ 2 ซึ่งนำจากรุ่นที่ 1 ออกและสามารถวัดมุมได้ด้วยตนเอง [7]

ผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบเครื่องมือวัดประเภทต่าง ๆ ที่มีต้นทุนด้านราคาต่ำ มีความแม่นยำในการวัดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จึงมีการใช้เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือมาประยุกต์ร่วมกับการใช้เครื่องวัดขนาดทางแบบทันสมัยที่มีใช้อยู่แล้วใน รฟท. มากำหนดตำแหน่งศูนย์กลางอ้างอิง ให้ผลตามวัตถุประสงค์ของการวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ได้ ซึ่งมีต้นทุนในการจัดซื้อต่ำ เทคนิคการวัดไม่ซับซ้อน แสงเลเซอร์ทำงานได้ดีในอุโมงค์ที่มีแสงน้อย ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และการประมวลผลเปรียบเทียบทำได้ง่าย ในการทดลองใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ ทั้ง 2 รุ่นทดสอบเปรียบเทียบกัน ผู้วิจัยได้เลือกอุโมงค์เป้าหมายที่เกิดปัญหาการเบียดชนระหว่างผนังอุโมงค์และขบวนรถไฟ นั่นคือ อุโมงค์ช่องเขา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีวิธีการวัดมิติตามขวางของอุโมงค์ที่ไม่ซับซ้อน ผลปรากฏว่าค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกตำแหน่งองศาของเครื่องวัดรุ่นแรกแบบมีจานองศา มีค่า 1.8 มม. ซึ่งสูงกว่าของเครื่องวัดรุ่นที่ 2 แบบวัดองศาด้วยตัวเองที่มีค่า 1 มม. ดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นผล ที่คาดการณ์ได้เนื่องจาก ผู้ใช้เครื่องวัดรุ่นแรกมีโอกาสหมุนเครื่องวัดด้วยมือไปตามแต่ละตำแหน่งมุมบนแผ่นจานองศา ที่อาจจะคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไปเล็กน้อยในแต่ละรอบการวัด เพราะการมองด้วยสายตาในแต่ละชดองศาบนแผ่นจานอาจไม่แม่นยำ จึงทำซ้ำได้ยากกว่าการใช้เครื่องมือวัดรุ่นที่ 2 แบบวัดองศาด้วยตัวเอง (ความละเอียด 0.1 องศา) ดังนั้นเครื่องวัดรุ่นที่ 2 นี้จึงแสดงค่าเบี่ยงเบนที่น้อยกว่าแต่โดยรวมเครื่องทั้งสองรุ่นใช้เวลาในการวัดใกล้เคียงกันประมาณ 15-20 นาที ต่อหนึ่งหน้าตัด



รูปที่ 10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของแต่ละองศาการวัด [7]

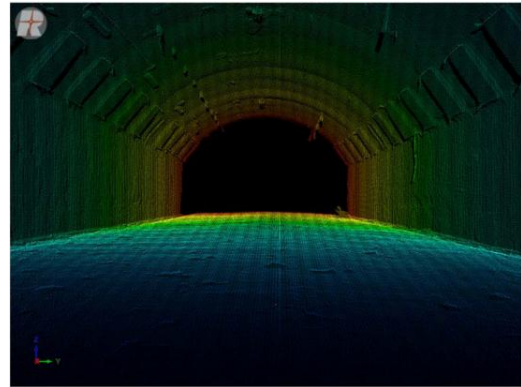
Ramón Argüelles-Fraga และคณะ [9] ได้ทำการศึกษารวบรวมการวัดวงรอบหน้าตัดอุโมงค์ด้วยการใช้เลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน การสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) เป็นเทคโนโลยีการวัดที่ช่วยให้สามารถนำเสนอข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ในรูปแบบของ point cloud แสดงพื้นผิว 3 มิติของวัตถุในระยะทางตั้งแต่สิบเมตรถึงหลายร้อยเมตร ขึ้นอยู่กับประเภทและลักษณะทางเทคนิคของเครื่องสแกนที่ใช้ ดังนั้นการใช้เครื่องสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวางแผนที่ดีเพื่อให้คุ้มค่ากับงบประมาณในโครงการก่อสร้าง

งานวิจัยนี้คณะวิจัยได้ศึกษา หลักการที่สำคัญในการวางแผนการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินที่สำคัญไว้ 3 ประการด้วยกันคือ 1) ขนาดของเลเซอร์ที่ทำการสแกน 2) มุมและระยะ 3) ความหนาแน่นของการสแกน โดยปัจจัยทั้ง 3 ประการนั้น จะทำหน้าที่สร้างความหนาแน่นของ Point Cloud ออกมา ซึ่งในการสแกนแต่ละครั้งแนวสแกนไม่ควรจะซ้ำรอยกัน ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดมุมและความกว้างของลำแสงเลเซอร์ให้ชัดเจนเพื่อที่จะได้ความหนาแน่นของภาพหน้าตัดอุโมงค์ที่แม่นยำ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการคำนวณหาความเหมาะสมของความละเอียดเชิงมุมและระยะของการสแกนที่แตกต่างเพื่อหาค่าความเหมาะสมและแม่นยำที่สุด

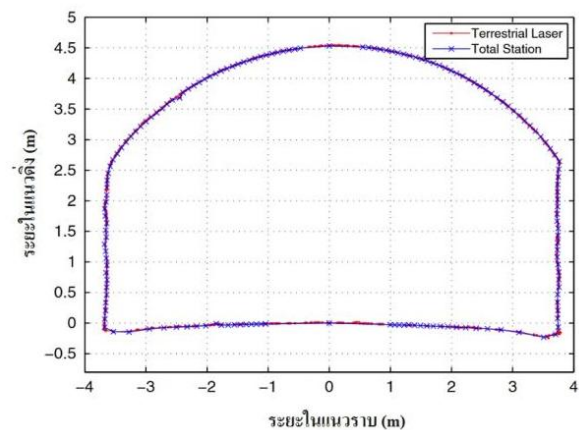
เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ คณะวิจัยได้วัดอุโมงค์ที่มีลักษณะคล้ายวงกลม ตั้งอยู่ใกล้กับวิทยาลัย Oviedo School of Mieres ซึ่งเป็นเมืองเหมืองถ่านหินดั้งเดิมทางตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศสเปน อุโมงค์นี้มีความยาวประมาณ 105 ม. และมีรัศมีภายในประมาณ 4.3 ม. รูปที่ 2.38 และ รูปที่ 2.39 แสดงรูปทรงของอุโมงค์จาก Point Cloud ที่สแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ภาคพื้นดิน (TLS) วิธีการทำงานคือติดตั้งเครื่องสแกน RIEGL LMS-Z390i ไว้ที่ทางเข้าอุโมงค์ตามแนวระนาบ แล้วจึงเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลชุดโปรไฟล์หน้าตัดที่สร้างขึ้นโดยใช้กล้องสำรวจแบบ Total Station รุ่น Leica TCRM 1103 ที่มีความแม่นยำสูงในการวัดระยะและกำหนดค่ามุม

นอกจากนี้ ในการวางตำแหน่งการวัดระยะ (STA.) แต่ละโปรไฟล์ ความเอียงของมุมและองศาการสแกนถูกย่อให้เล็กสุด ช่วงเชิงมุมคือ 0.03 องศา เพื่อประเมินอิทธิพลของมุมตกกระทบและขนาดของแนวสแกน และเปรียบเทียบผลดังรูปที่ 12

การใช้ TLS เพื่อวัดรูปทรงของอุโมงค์ต้องมีการวางแผนอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ เชื่อถือได้ และคุ้มค่า ซึ่งจะต้องคำนึงถึง ความหนาแน่นของการสแกน มุมตกกระทบ และแนวสแกน เป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการวัด ทั้งนี้เพราะเมื่อระยะห่างมากขึ้น มุมตกกระทบก็จะขยายไปถึงจุดที่ส่งผลเสียต่อความแม่นยำของการวัดตำแหน่ง



รูปที่ 11 รูปทรงของอุโมงค์จาก Point Cloud ที่สแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ภาคพื้นดิน (TLS) [9]



รูปที่ 12 ภาพซ้อนทับวงรอบหน้าตัดอุโมงค์ (Leica TPS) และข้อมูล TLS ในตำแหน่งที่ PK18 แสดงให้เห็นค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดทั้ง 2 ชนิดซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.01 m. ในระยะไม่เกิน 10.00 m. โดยมีตำแหน่งการวัดช่วงเชิงมุมคือ 0.03 องศา [9]

## 5.วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

### 5.1ออกแบบ ประกอบ และติดตั้งเครื่องมือวัดมิติอัตโนมัติ

ผู้วิจัยได้แบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน 1) ชิ้นส่วนโครงสร้าง ประกอบไปด้วย คานขวาง ชุดจับยึดเลเซอร์วัดระยะ และโครงรองรับ และ 2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับควบคุมการหมุนของเลเซอร์วัดระยะ การประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ทั้ง 2 ส่วน จำเป็นต้องมีความมั่นคงและให้เกิดแนวระนาบการหมุนลำแสงเลเซอร์ที่ขนานกับคานขวางให้มากที่สุด

### 5.2สอบเทียบและทดลองเครื่องมือ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของเครื่องวัดมิติอัตโนมัติโดยการจำลองอุโมงค์แบบต่าง ๆ เช่น ซุ้มประตู, โถงทางเดิน, โถงบันได และแบบจำลองอุโมงค์ย่อยส่วน เป็นต้น แล้วนำระยะที่ได้บางมุมมองมาสอบเทียบกับเครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ, เทปวัดระยะและกล้องประมวลผลรวม (Total Station) พร้อมทั้งทำซ้ำโดยการยกออกและติดตั้งใหม่บนรางรถไฟจำลองในตำแหน่งเดิมและเปลี่ยนบุคคลในการทำการทดสอบ

### 5.3เก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย

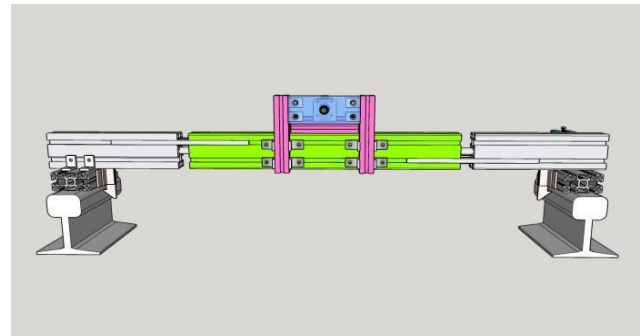
ผู้วิจัยตรวจสอบเครื่องวัดมิติอัตโนมัติในภาคสนามด้วยการวัดมิติอุโมงค์เขาพังเหย จ. ลพบุรี เพื่อทดสอบคุณภาพและความน่าเชื่อถือ พร้อมกับหาข้อมูลสอบเทียบกับเครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ เทปวัดระยะ และกล้องประมวลผลรวม (Total Station) พร้อมทั้งทำซ้ำโดยการยกออกและติดตั้งใหม่บนรางรถไฟในตำแหน่งเดิมและเปลี่ยนบุคคลในการทำการทดสอบ

## 6.ผลการวิจัย

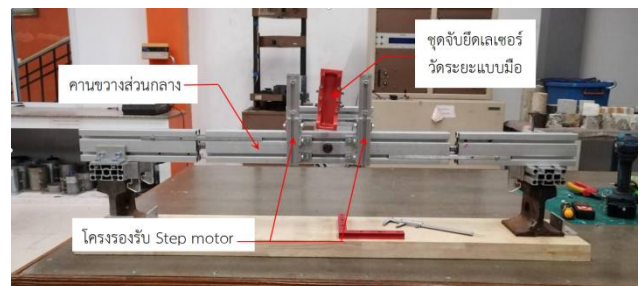
ผลการวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

### 6.1ผลการออกแบบ ประกอบ และติดตั้งเครื่องมือวัดมิติอัตโนมัติ

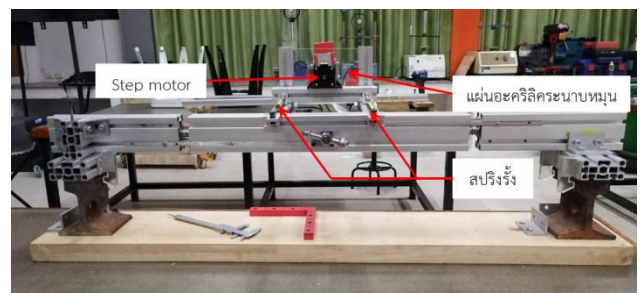
ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างโดยออกแบบเป็นภาพ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมออกแบบในคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 13 แล้ววางแผนในการจัดเตรียมและประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง ดังรูปที่ 14 และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 15 หลังจากนั้นประกอบอุปกรณ์ทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 16



รูปที่ 13 ภาพการออกแบบโครงสร้างต่างๆของเครื่องวัดมิติอัตโนมัติ



ก) ภาพด้านหน้า

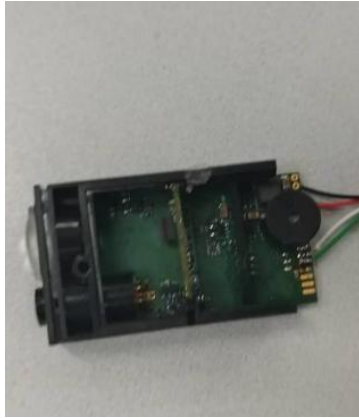


ข) ภาพด้านหลัง

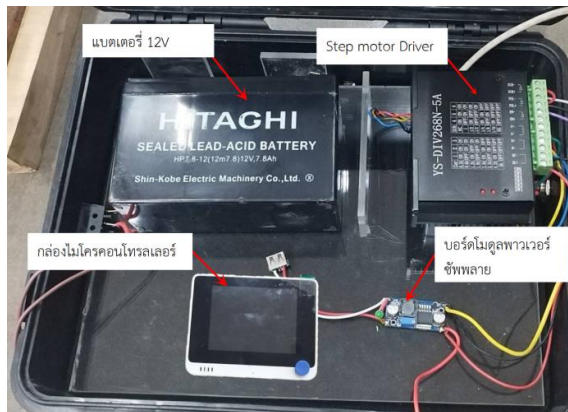


ค) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 14 ผลการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง

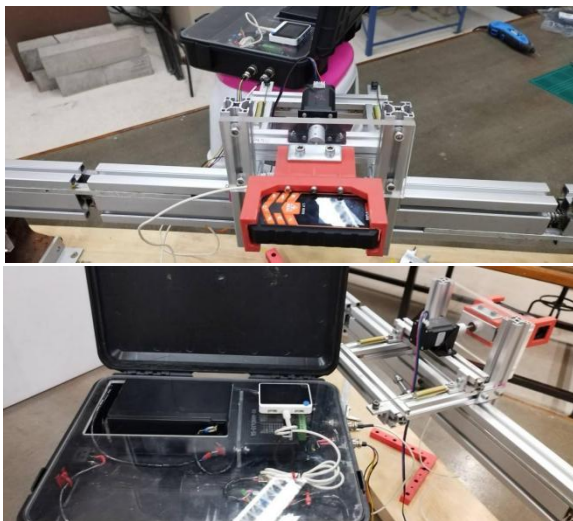


ก) โมดูลเลเซอร์วัดระยะ



ข) ชุดโมดูลไมโครคอนโทรลเลอร์ และกล่องกันกระแทก

รูปที่ 15 ผลการประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดโมดูลคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 16 ผลการประกอบชิ้นส่วนโครงสร้างและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการพัฒนาเครื่องวัดมิติอุโมงค์ รุ่นที่1 รุ่นที่2 และรุ่นที่ 3

เครื่องมือ	รุ่นที่ 1	รุ่นที่2	รุ่นที่ 3
คุณสมบัติ			
การวัดองศา	ใช้มือหมุน	ใช้มือหมุน	อัตโนมัติ
การเก็บข้อมูล	จดบันทึก	จดบันทึก	บันทึกอัตโนมัติ ใน (SD Card)
ความเร็ว/1 รอบการวัด	15-20 นาที	15-20 นาที	6 นาที
การรายงานผล	ตารางรายงาน	ตารางรายงาน	โปรแกรมสเปรตชีต

## 6.2 ผลการสอบเทียบและทดลองเครื่องมือ

ในการสอบเทียบเครื่องมือผู้วิจัยจะทดสอบเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของเครื่องวัดมิติอุโมงค์ 2 รูปแบบดังนี้

1) ผลการสอบเทียบเครื่องวัดมิติอุโมงค์กับเครื่องวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ และอุโมงค์จำลองแบบต่าง ๆ เช่น โถงทางเดินและโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะคล้ายอุโมงค์ ทั้งนี้ มุมตัวแทนการวัดจะกำหนดไว้เพียง 5 มุมครอบคลุมมุมทั้งหมด 180 องศา เพื่อสะดวกในการวัดสอบเทียบโดยเครื่องมือพื้นฐาน

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์กับเครื่องวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือ	เครื่องวัดมิติอุโมงค์ (ม.)	เลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ (ม.)	เทปวัดระยะ (ม.)	กล้องประมวลผลรวม (ม.)
มุม 0	0.678	0.678	0.675	0.676
มุม 45	0.906	0.906	*	*

**ตารางที่ 2** ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติ อุโมงค์กับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ใน ห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

เครื่องมือ มม	เครื่องมือ มิติ อุโมงค์ (ม.)	เลเซอร์วัด ระยะแบบ มือถือ (ม.)	เทปวัด ระยะ (ม.)	กล้อง ประมวล ผลรวม (ม.)
90	1.963	1.963	*	1.961
135	1.060	1.060	*	*
180	0.749	0.749	0.752	0.752

\* ไม่สามารถวัดระยะในมุมนี้ได้ และคาดว่าจะมีความคลาดเคลื่อนสูง

**ตารางที่ 3** ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติ อุโมงค์ กับเครื่องมือวัดระยะ ชนิดต่าง ๆ ในอุโมงค์จำลอง 1

เครื่องมือ มม	เครื่องมือ มิติ อุโมงค์ (ม.)	เลเซอร์วัด ระยะแบบ มือถือ (ม.)	เทปวัด ระยะ (ม.)	กล้อง ประมวล ผลรวม (ม.)
0	1.669	1.669	1.667	1.670
45	2.358	2.357	*	*
90	2.455	2.455	*	2.455
135	2.085	2.084	*	*
180	1.452	1.452	1.454	1.453

\* ไม่สามารถวัดระยะในมุมนี้ได้ และคาดว่าจะมีความคลาดเคลื่อนสูง

**ตารางที่ 4** ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ กับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในอุโมงค์จำลอง 2

เครื่องมือ มม	เครื่องมือ มิติอุโมงค์ (ม.)	เลเซอร์วัด ระยะแบบ มือถือ (ม.)	เทปวัด ระยะ (ม.)	กล้อง ประมวล ผลรวม (ม.)
0	0.790	0.790	0.787	0.789
45	1.172	1.171	*	*

**ตารางที่ 4** ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ กับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในอุโมงค์จำลอง 2

เครื่องมือ มม	เครื่องมือ มิติอุโมงค์ (ม.)	เลเซอร์วัด ระยะแบบ มือถือ (ม.)	เทปวัด ระยะ (ม.)	กล้อง ประมวล ผลรวม (ม.)
90	1.903	1.903	*	1.901
135	1.133	1.132	*	*
180	0.773	0.773	0.775	0.772

\* ไม่สามารถวัดระยะในมุมนี้ได้ และคาดว่าจะมีความคลาดเคลื่อนสูง

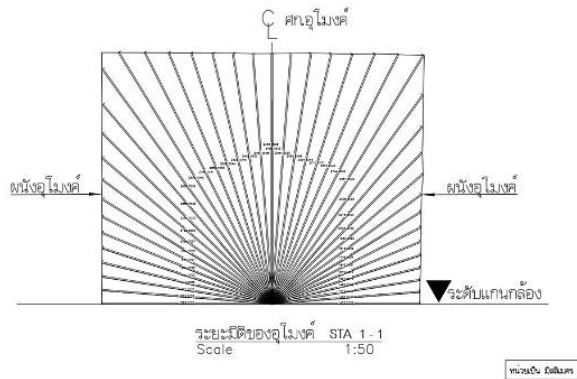
ผลการสอบเทียบการวัดระยะเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รถไฟกับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ และอุโมงค์จำลอง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการ และอุโมงค์จำลองแบบต่าง ๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนต่างจากเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ไม่เกิน  $\pm 0.003$  ม. โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ถึง มากที่สุด คือ เครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ กล้องประมวลผลรวม และเทปวัดระยะตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยตั้งใจออกแบบให้มีเครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถืออีก 1 เครื่องยึดติดกับแกนหมุน และหมุนไปพร้อมกับโมดูลเลเซอร์วัดระยะ เพื่อให้เป็นอุปกรณ์สำรองเพื่อตรวจสอบการใช้งานเครื่องวัดมิติอุโมงค์ในอนาคต กล้องประมวลผลรวมตรวจวัดโดยการตั้งกล้องห่างออกมาจากตำแหน่งวัดประมาณ 3-5 ม. และใช้เป้าสะท้อนแสงในการเล็งเป้าตามมุมต่าง ๆ ตรงกับตำแหน่งที่จุดแสงเลเซอร์ของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์แสดงบนผนังอุโมงค์จำลอง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนระดับหนึ่ง การใช้เทปวัดระยะให้ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด เนื่องมาจาก ความผิดพลาดจากผู้ทดสอบ (User error) จากการดึงเทปที่ดึงหรือหย่อนมากเกินไป และดึงปลายเทปวัดไปที่ผนังอุโมงค์จำลองอาจจะมีคลาดเคลื่อน

2) ผลการสอบเทียบการวัดระยะของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์โดยเปลี่ยนบุคคลทำการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ และในอุโมงค์จำลองแบบต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ โดยการยกออกและติดตั้งใหม่บนรางรถไฟจำลองในตำแหน่งเดิมและ

เปลี่ยนบุคคลในการทำการทดสอบ ได้ค่าจากการวัดมิติที่ใกล้เคียงกัน อุโมงค์จำลอง 1 และอุโมงค์จำลอง 2 จากการวัดระยะของบุคคลที่ 1 และบุคคลที่ 2 มีค่าเฉลี่ยความแตกต่างไม่เกิน  $\pm 0.002$  ม. และ  $\pm 0.001$  ม. ตามลำดับ

เมื่อทำการวัดมิติอุโมงค์จำลองเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำค่ามุมและระยะที่วัดได้จากบริเวณกลางรางรถไฟจำลองถึงผนังอุโมงค์จำลอง สร้างรูปจำลองในโปรแกรมเขียนแบบได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงการนำข้อมูลจากการวัดมิติด้วยเครื่องวัดมิติอุโมงค์รถไฟมาเขียนรูปหน้าตัดอุโมงค์จำลอง

### 6.3 ผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย

ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม ผู้วิจัยทดสอบเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ ได้ผลดังนี้

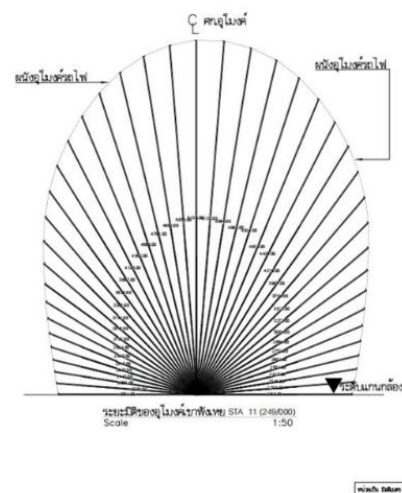
1) ผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย ดังรูปที่ 18 โดยสอบเทียบกับเครื่องเลเซอร์วัดระยะแบบมือถือ, เทปวัดระยะ และกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ในตำแหน่งการวัดรูปหน้าตัดที่ 1 และตำแหน่งการวัดรูปหน้าตัดที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์กับเทปวัดระยะ และกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ไม่เกิน  $\pm 0.003$  ม. และ  $\pm 0.002$  ม. ตามลำดับ

2) ผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย สอบเทียบการทำซ้ำในตำแหน่งเดิม โดยเปลี่ยนบุคคลในการทำการใช้เครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ ในตำแหน่งการวัดรูปหน้าตัดที่ 1 และตำแหน่งการวัดรูปหน้าตัดที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนการวัดระยะในการทำซ้ำและเปลี่ยนบุคคลไม่เกิน  $\pm 0.002$  ม. และ  $\pm 0.003$  ม. สำหรับทั้ง 2 รูปหน้าตัดตามลำดับ

3) ผลการเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย โดยจะแบ่งการวัดอุโมงค์ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง (3 รูปหน้าตัด) จากนั้นนำค่ามุมและระยะที่วัดได้ มาสร้างรูปจำลองในโปรแกรมเขียนแบบ โดยยึดจุดอ้างอิงที่ตำแหน่งแนวกลางรางรถไฟ ซึ่งผลการสร้างรูปจำลองรูปหน้าตัดอุโมงค์มีรูปหน้าตัดดังรูปที่ 19



รูปที่ 18 อุโมงค์เขาพังเหย จ. ลพบุรี



รูปที่ 19 แสดงการนำข้อมูลจากการวัดมิติด้วยเครื่องวัดมิติอุโมงค์รถไฟมาเขียนรูปหน้าตัดอุโมงค์รถไฟเขาพังเหย

## 7.สรุปผลการวิจัย

### 7.1การออกแบบ ประกอบ และติดตั้งเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์

จากผลการออกแบบผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ ทำให้การประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง และชุดจับยึดโมดูลเลเซอร์วัดระยะมีความถูกต้อง แม่นยำ สามารถสร้างระนาบการหมุนที่ขนานกับคานขวาง และตั้งฉากกับแนวราง ได้อย่างมั่นคง และ เกิดความแม่นยำในการหมุนซ้ำในแต่ละครั้ง เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยในการวัด และสุดท้ายชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดโมดูลคอนโทรลเลอร์ สามารถหมุนลำแสงเลเซอร์ไปในมุมต่าง ๆ ซ้ำที่เดิมทุก ๆ 4.5 องศา เป็นจุดแสงตำแหน่งเดิมบนผนังอุโมงค์ ทั้งขาไปและกลับของการวัด 1 รอบ

### 7.2การสอบเทียบเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์กับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ และอุโมงค์จำลอง

จากผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์ มีความสามารถในการวัดมิติอุโมงค์ได้ทุกมุมที่ตั้งค่าการวัดมิติไว้ และเมื่อสอบเทียบกับเครื่องมือวัดประเภทต่าง ๆ ก็ให้ผลการวัดมิติอุโมงค์ที่ตรงกันและมีค่าที่แตกต่างกันในบางมุม ไม่เกิน  $\pm 3$  มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับค่าความคลาดเคลื่อนของกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ที่สามารถทำการวัดระยะต่างๆในระนาบหน้าตัดขวางหนึ่ง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ที่ระดับ  $\pm 1 - 2$  มิลลิเมตร ซึ่งปัจจุบันถือเป็นเครื่องมือวัดหลักที่ใช้ในการวัดมิติอุโมงค์ ดังนั้นเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รถไฟด้วยเลเซอร์วัดระยะและควบคุมด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์จึงมีความสามารถนำไปใช้ทดแทนงานวัดมิติอุโมงค์รถไฟในสนามได้ โดยลักษณะการวัดของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รถไฟด้วยเลเซอร์จะมีความสะดวกในการหาขอบเขตผนังอุโมงค์ที่ตึกกว่า เนื่องจากมีการสร้างระนาบและศูนย์กลางการวัดที่อ้างอิงกับแนวกลางรางรถไฟที่ทำซ้ำได้ง่าย มั่นคงและน่าเชื่อถือกว่า

### 7.3การเก็บข้อมูลภาคสนาม ณ อุโมงค์เขาพังเหย

จากผลการสอบเทียบมีค่าความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางของเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์กับเครื่องมือวัดระยะชนิดต่าง ๆ ไม่เกิน  $\pm 3$  มิลลิเมตร ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนจากการวัดอุโมงค์จริงมีความเกี่ยวข้องโดยตรงต่อ สภาพผิวของอุโมงค์ ซึ่งบางตำแหน่งมีผิวอุโมงค์ที่อาจจะไม่สม่ำเสมอ หรือมีพีซหรือตะไคร่ปกคลุมผิวอุโมงค์ แต่อย่างไรก็ตามผลการวัดสามารถ

นำไปขึ้นรูปจำลองผนังอุโมงค์ด้วยโปรแกรมเขียนแบบ ซึ่งรูปหน้าตัดที่ได้มีความสอดคล้องกับลักษณะจริงของอุโมงค์ ดังนั้นเครื่องมือวัดมิติอุโมงค์รถไฟด้วยเลเซอร์วัดระยะและควบคุมด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปใช้ในงานวัดมิติอุโมงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สามารถนำไปใช้สร้างข้อมูลอ้างอิงเริ่มแรก (Initial Reference) ระหว่างผนังอุโมงค์ และทางรถไฟ เพื่อใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังอุโมงค์และรางจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดฝัน เช่น เกิดการระเบิดรุนแรงในอุโมงค์ เกิดอุบัติเหตุรถไฟตกรางในอุโมงค์ และเกิดแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการเดินรถไฟเข้าไปในอุโมงค์ เป็นต้น

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ขอขอบคุณ การรถไฟแห่งประเทศไทย ที่อนุญาตให้เข้าพื้นที่ ณ อุโมงค์เขาพังเหย ขอขอบพระคุณ นายสุริยา พิทักษ์กุล วิศวกรงานเทคนิคบำรุงทาง กองบำรุงเขตขอนแก่น ที่ให้คำปรึกษาในการออกแบบ และ อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานในการเข้าพื้นที่ภาคสนาม ขอขอบพระคุณ นายประเสริฐ แสงเดือน ครูชำนาญการพิเศษ แผนกวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบพระคุณ นายรุฒพงศ์ จุลชัยวรกุล ครูชำนาญการ แผนกวิชาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสร้างชิ้นส่วนประกอบกลไกต่าง ๆ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Suriya, "Transverse Measurement Tools for Railway Tunnels", Report on Structural Measurement Inside Chong Khao Tunnel, Bridge Department, Bridge Center, Civil Engineering Division, State Railway of Thailand, 2016. (In Thai)

- [2] S. Kittidech, "Competency Enhancement Program According to Occupational Standards and Professional Qualifications for Industries Related to Transportation System Development: High-Speed Rail and Rail System Professional Sector", Academic Service Project, Thailand Professional Qualification Institute (Public Organization), 2020. (In Thai)
- [3] L. Yanbin, C. Jianxun, X. Weizheng, Z. Pengyu, Q. Xiong, D. Xianghui, and L. Qin, 2016, "Analysis of tunnel displacement accuracy with total station", *Measurement*, Vol 83, pp. 29–37.
- [4] L. Cheng, L. Xiaoping, Z. Ningning Z., L. Yao, W. Yongbin, and L. Guo-qing, 2015, "Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points", *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(9), pp.1056–1062.
- [5] Geodetic Systems Inc., "Basics of photogrammetry", [Online]. <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/>.
- [6] M. Scaioni, L. Barazzetti, A. Giussani, M. Previtali, F. Roncoroni, and M.I. Alba, "Photogrammetric techniques for monitoring tunnel deformation", *Earth Science Informatics*, Vol 7(2), pp. 83–95, 2014.
- [7] S. Kittidech, and P. Suriya, "Measurement of Railway Tunnel Cross-section with Laser Range Finder", *The 28<sup>th</sup> National Convention on Civil Engineering*, Phuket, 24-26 May, pp. INF04-2, INF04-4, 2023. (In Thai)
- [8] Terabee, "Time-of-flight principle", [Online]. <https://www.terabee.com/time-of-flight-principle/>.
- [9] Ramón Argüelles-Fraga et al., "Measurement planning for circular cross-section tunnels using terrestrial laser scanning", *Automation in Construction*, Vol 31, pp. 1-9, 2013.