Part VI
การออกแบบและสร้างระบบสร้างภาพแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริงพร้อมซอฟท์แวร์ประมวลผล

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ Part VI

เนื้อหา **หน้า**

1. บทนำ 4
2. การออกแบบและพัฒนาระบบการสร้างภาพแบบจำลองในรูปแบบสามมิติภายในถ้ำ 7
   - 2.1 การใช้แสงเชิงโครงสร้าง 7
   - 2.2 การสำรวจด้วยภาพถ่าย 8
   - 2.3 การใช้ Lidar 9
3. ระบบสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ (3D Laser Scanner) 12
   - 3.1 หลักการทำงานและวิธีการใช้งานเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ 14
   - 3.2 ขั้นตอนการใช้งานเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ ขั้นพื้นฐาน 15
4. ขั้นตอนการสำรวจและวิธีเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในถ้ำด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ 19
   - 4.1 โพรงถ้ำที่เป็นแนวเส้นตรง 20
   - 4.2 โพรงถ้ำที่เป็นแนวโค้งหรือหรือบริเวณที่เป็นทางแยก 21
   - 4.3 โพรงถ้ำที่มีความซับซ้อนมีหินงอกหินย้อยและก้อนหินวางกีดขวาง 22
   - 4.4 โพรงถ้ำที่มีระดับความสูงของพื้นถ้ำแตกต่างกัน 22
   - 4.5 โพรงถ้ำขนาดเล็กหรือเป็นช่องลอดผ่านขนาดเล็ก 23
   - 4.6 สรุปผลขั้นตอนการสำรวจและวิธีเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในถ้ำด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ (3D) 24
5. ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลและสร้างภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำ 25
   - 5.1 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม Cyclone REGISTER360 (BLK Edition) 25
   - 5.2 ผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำเชียงดาว 29
   - 5.3 ผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ 30
   - 5.4 การแสดงรายละเอียดผลการสำรวจ 31
   - 5.5 การแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ 33
   - 5.6 การบันทึกข้อมูล Point Cloud 42
   - 5.7 สรุปผลการทดลอง 42
6. แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริง 43
   - 6.1 การพัฒนาซอฟต์แวร์แสดงผลแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริง 43
   - 6.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ point cloud viewer 46
   - 6.3 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว 61
   - 6.4 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์ 64
   - 6.5 การแสดงผลพิกัด GPS ภายในถ้ำบน Google Map 65
7. สรุป 66
   - 7.1 สรุปผลการวิจัย 66
   - 7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย 67
   - 7.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคต 67
8. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม 67

สารบัญ Part VI (ต่อ)

เนื้อหา **หน้า**

ภาคผนวก ก. รายงานผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ เชียงดาว **69**
ภาคผนวก ข. รายงานผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ **77**
ภาคผนวก ค. ต้นรหัสซอฟต์แวร์แสดงผลแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริง **86**

การออกแบบและสร้างระบบสร้างภาพแบบจำลองภายในถ้ำ รูปแบบสามมิติเสมือนจริงพร้อมซอฟท์แวร์ประมวลผล

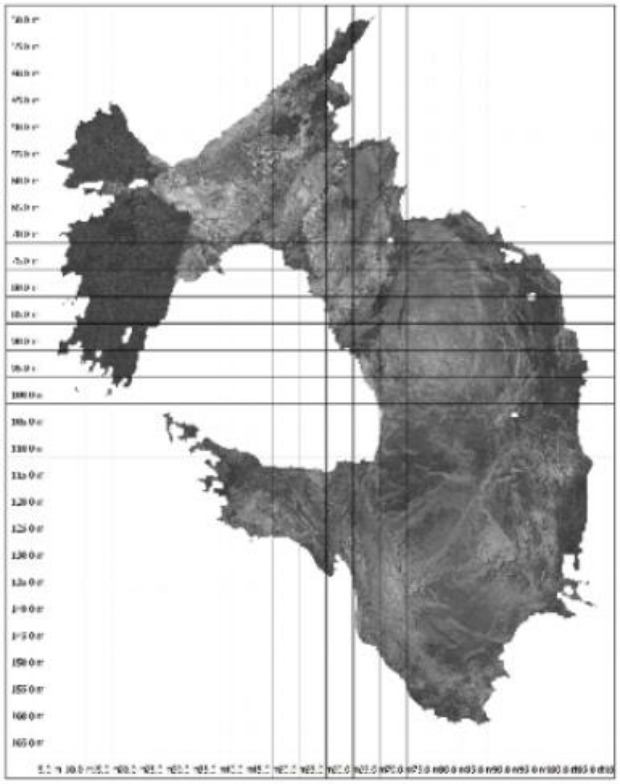
1. บทนำ

การจำลองภาพสามมิติภายในถ้ำในปัจจุบันสามารถดำเนินการได้ด้วยเทคโนโลยีการสแกนแบบเลเซอร์ 3 มิติ (3D laser scanning) ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ทำให้สามารถทำการสแกนและสร้างภาพจำลอง 3 มิติของถ้ำได้ด้วยความละเอียดและประสิทธิภาพสูง ตัวสแกนเลเซอร์ 3 มิติดังกล่าวเป็นที่รู้จักในชื่อของ LiDAR หรือ Light Detection And Ranging [1] เป็นวิธีการสำรวจด้วยการวัดระยะทางของวัตถุเป้าหมายด้วยการฉายแสงเลเซอร์ แล้วทำการวัดการสะท้อนกลับของแสง ความแตกต่างของเวลาและความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับของแสงเลเซอร์สามารถใช้ในการสร้างข้อมูล 3 มิติในรูปแบบดิจิตอลของวัตถุเป้าหมายได้ และด้วยความเข้มและแคบของลำแสงเลเซอร์ ทำให้การวัดระยะเป็นไปอย่างแม่นยำ นำไปสู่การประยุกต์ใช้ข้อมูล 3 มิติจาก LiDAR ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะการทำแผนที่ 3 มิติแบบความละเอียดสูง

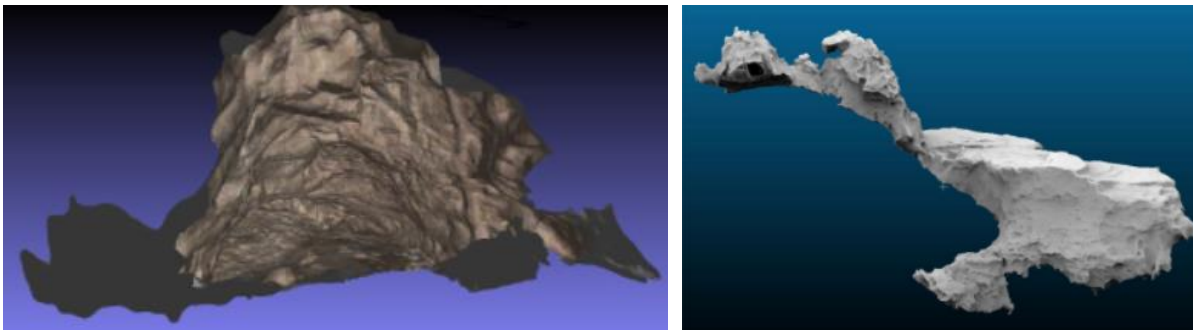
การทำแผนที่ด้วย LiDAR (LiDAR mapping) ใช้ระบบสแกนด้วยเลเซอร์ พร้อมด้วยหน่วยตรวจวัดความเฉื่อยหรือการเคลื่อนไหวภายใน (Inertial Measurement Unit หรือ IMU) และชุดรับ GNSS (Global Navigation Satellite System) เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย ที่ซึ่งสามารถอ้างอิงแบบสามมิติในพิกัด X, Y และ Z โครงสร้างภายในของ IMU ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์สำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหวของชุด LiDAR ในสามแนวได้แก่ Yaw, Pitch และ Roll ด้วยเซ็นเซอร์ 3 ชนิดคือ Accelerometer Gyroscope และ Magnetometer ปัจจุบันชุด IMU และ GNSS สามารถถูกพัฒนาสร้างร่วมกันได้ด้วยความแม่นยำสูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับชุดสแกนด้วยเลเซอร์แบบ 3 มิติ ทำให้ได้ชุดข้อมูลในพิกัด 3 มิติเรียกว่า point cloud ซึ่งอ้างอิงได้กับพิกัดโลก (georeferencing) และจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแผนที่หรือโมเดล 3 มิติของวัตถุหรือพื้นที่เป้าหมายภายในถ้ำได้ด้วยความละเอียดสูง ตัวอย่างงานวิจัยที่นำเอาเทคโนโลยี LiDAR มาใช้ในการสำรวจและสร้างแผนที่ 3 มิติภายในถ้ำดังแสดงใน [2] งานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจและสร้างแผนที่ 3 มิติภายในถ้ำ Arma Pollera ที่จังหวัด Savona ประเทศอิตาลี ด้วยเครื่องมือสแกนรุ่น Z+F IMAGER® 5010 ซึ่งมีระยะการวัดด้วยความละเอียดสูงที่ 187 เมตร พร้อมซอฟต์แวร์ประมวลผล point cloud รุ่น Z+F LaserControl® การสร้างแผนที่ 3 มิติดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ประเภท OpenSource ได้แก่ MeshLab และ CloudCompare ซึ่งใช้สำหรับประมวลผล cloud point ทั้งการนำเข้าข้อมูล (import) แสดงผล (visualize) นำออกข้อมูล (export) ในรูป point cloud และ mesh (เมชหรือโครงตาข่าย) การทำ filter จุดข้อมูลและเมช การสร้างเมช การทำสีและพื้นผิวเมช จัดวางและลงทะเบียนประมวลผล cloud point (เพื่อคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างจุดข้อมูลในรูปแบบจำลอง 3 มิติ) ตัวอย่างผลการสแกนถ้ำแสดงในรูปที่ 1 และ 2 งานวิจัยใน [3] ใช้เทคโนโลยีเลเซอร์สแกน 3 มิติ ทำการสร้างแผนที่ภายในถ้ำ Domica ประเทศสโลวาเกีย เครื่องมือสแกนที่ใช้คือ FARO Focus 3D Scanner โดยทำการสแกนระยะทางรวม 1,500 เมตรจากการวางตำแหน่งเครื่องสแกนเนอร์ทั้งหมด 328 ตำแหน่ง พร้อมการประมวลผลข้อมูล point cloud ทั้งสิ้นกว่า 12 พันล้านจุดด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะชื่อ SCENE ของบริษัท FARO เอง ความละเอียดจากการลงทะเบียนประมวลผล point cloud อยู่ที่ 4-5 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับการอ้างอิงพิกัดโลก (georeferencing) ได้ความละเอียดอยู่ที่ 12 มิลลิเมตร ตัวอย่างผลการสแกนแสดงในรูปที่ 3 และ 4 งานวิจัยใน [4] ใช้การสแกนเลเซอร์ 3 มิติทำการสร้างแผนที่ 3 มิติของถ้ำ Wonderwerk ในประเทศแอฟริกาใต้ ด้วยเครื่องมือสแกนรุ่น Leica HDS 3000 พร้อมการประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ Cyclone เครื่องมือสแกนดังกล่าวทำงานสแกนแบบ 360 องศา

รอบทิศด้วยความละเอียดขนาด 6 มิลลิเมตรและระยะทำการที่ 80-100 เมตร ตัวอย่างผลการสแกนถ้ำแสดงในรูปที่ 5

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในการทำเลเซอร์สแกนแบบ 3 มิติ การสร้างแผนที่ 3 มิติภายในถ้ำสามารถดำเนินการได้ที่ความละเอียดและแม่นยำสูง นอกไปจากนั้นแล้วด้วยรูปแบบข้อมูลดิจิตอล ทำให้ข้อมูลแผนที่ 3 มิติดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะการสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ

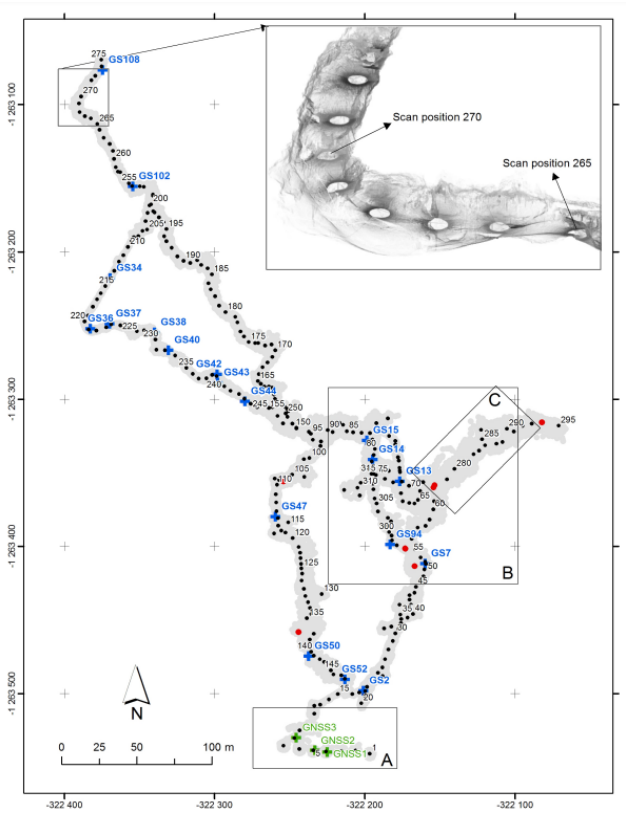


รูปที่ 1 ตัวอย่างการจำลองมุมมองภาพถ่ายทางอากาศ (orthophoto) จาก Z+F LaserControl (reprint จาก [2])

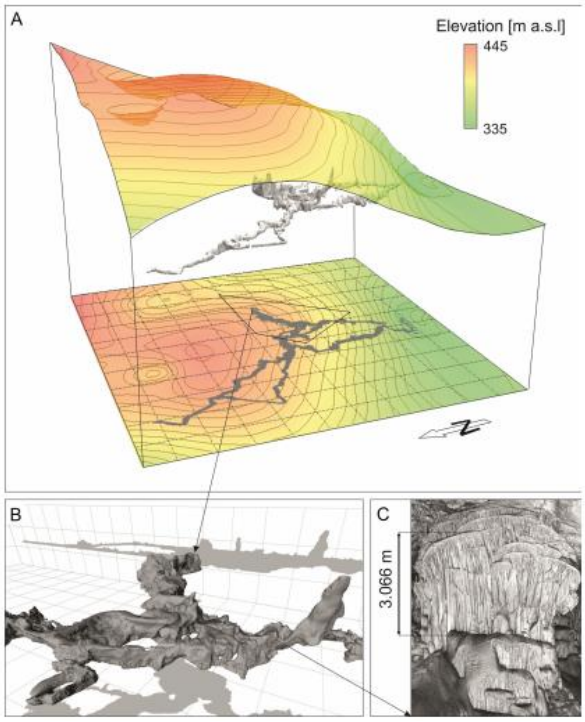


(ก) (ข)

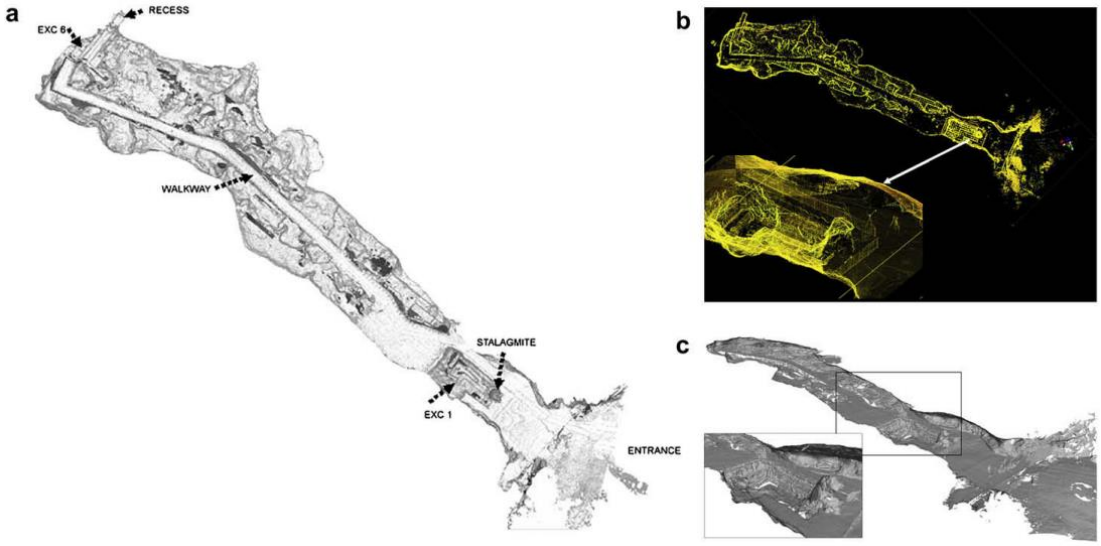
รูปที่ 2 ตัวอย่างโครงตาข่าย 3 มิติของถ้ำ (ก) ปากถ้ำ (ข) ตัวถ้ำ (reprint จาก [2])



รูปที่ 3 ตัวอย่างการจำลองมุมมองภาพถ่ายทางอากาศจากชุดข้อมูล point cloud (reprint จาก [3])



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพจำลอง 3 มิติของถ้ำ (reprint จาก [3])



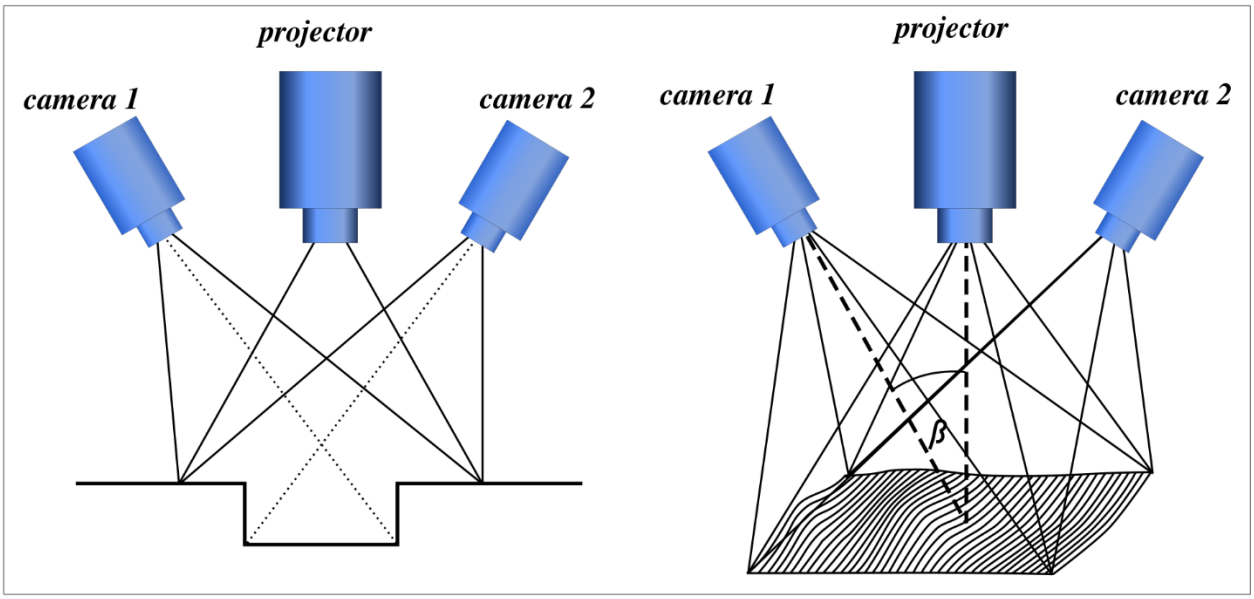
รูปที่ 5 ตัวอย่างภาพจำลอง 3 มิติของถ้ำ Wonderwerk (a) ภาพจำลองมุมมองภาพถ่ายทางอากาศ (b) ข้อมูล point cloud จากเครื่องสแกน 3D (c) พื้นผิวแบบจำลองของถ้ำ (reprint จาก [4])

2. การออกแบบและพัฒนาระบบการสร้างภาพแบบจำลองในรูปแบบสามมิติภายในถ้ำ

การสแกนและสร้างภาพแบบจำลองในรูปสามมิติ (3D) เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหลาย ๆ อย่างเข้าด้วยกัน จึงสามารถทำได้หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับงบประมาณและขนาดของวัตถุหรือชิ้นงานที่ต้องการสแกน โดยทั่วไปแล้ว เทคโนโลยีการสแกนวัตถุเพื่อสร้างแบบจำลอง 3D มีที่นิยมใช้อยู่ 3 แบบได้แก่

2.1 การใช้แสงเชิงโครงสร้าง (structured light) เป็นการใช้คลื่นแสงในการสแกนวัตถุหรือฉาย (project) ไปบนวัตถุ การฉายดังกล่าวเป็นการสร้างลายเส้นหลาย ๆ เส้นบนวัตถุนั้น ๆ ซึ่งลายเส้นเหล่านี้จะถูกตรวจจับอย่างพร้อมเพรียงกันด้วยกล้อง (หนึ่งตัวหรือหลาย ๆ ตัว) หลักการของการสแกน 3D ด้วยแสงเชิงโครงสร้างนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลายทศวรรษแล้ว ในขณะที่ปัจจุบันนี้ ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และกล้องถ่ายรูป ทำให้การสแกน 3D ด้วยแสงเชิงโครงสร้างนี้สามารถถูกนำมาใช้งานได้จริงในงานประยุกต์หลาย ๆ อย่าง ทั้งในเชิงวิจัยและเชิงพาณิชย์

การสแกน 3D ด้วยแสงเชิงโครงสร้างใช้หลักการของสามเหลี่ยมหรือ triangulation เหมือนกับเทคโนโลยีการสแกน 3D ด้วยวิธีอื่น ๆ โดยการฉายลำแสงไปยังจุดบนวัตถุ แล้วทำการตรวจวัดและคำนวณหาระยะทาง พร้อมทั้งมุม เพื่อหาตำแหน่งในโลกจริงของจุดบนวัตถุนั้น หลักการของสามเหลี่ยมนี้เป็นการสแกน 3D โดยที่แหล่งกำเนิดแสงอยู่กับที่ การตรวจหาจุดบนวัตถุที่เกิดขึ้นจากลำแสงสามารถทำได้โดยการใช้กล้องตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การฉายแสงจาก projector ไปยังวัตถุที่ต้องการสแกนแล้วใช้กล้อง 2 ตัวตรวจหาตำแหน่งของจุดบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อคำนวณหาตำแหน่ง 3D ในโลกจริง [5]

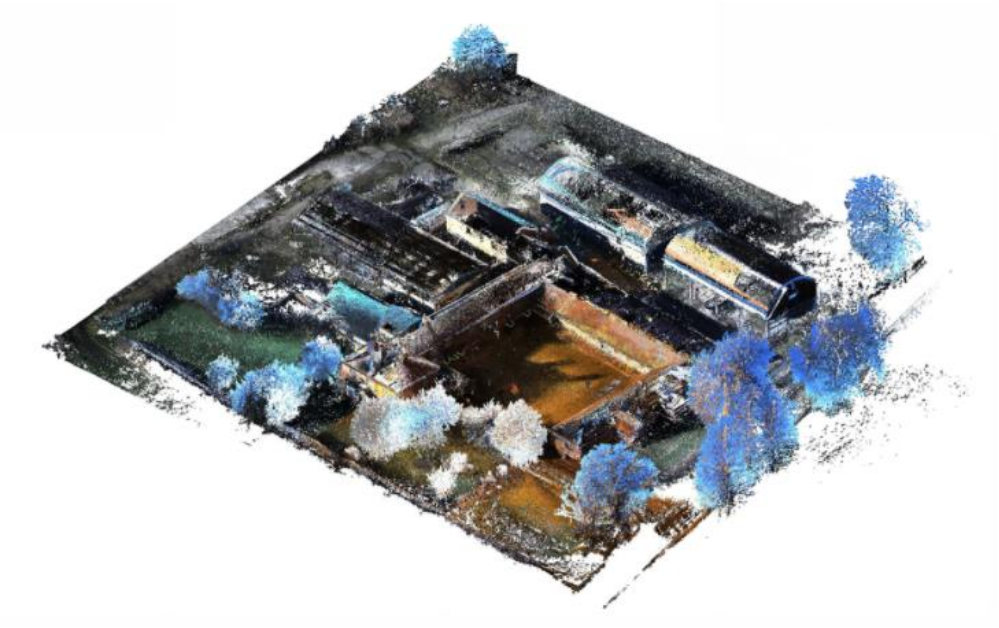
การใช้แสงเชิงโครงสร้างเป็นวิธีการสแกน 3D ที่ได้รับความนิยมใช้งาน ทั้งในเชิงพาณิชย์และทั่วไป อันเนื่องมาจากหลักการทำงานที่ง่ายเมื่อเทียบกับคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้ เมื่อพิจารณาจากความเร็วในการทำงานเทียบกับการสแกนด้วยเลเซอร์แบบลำแสงเดียว (single beam) การสแกนด้วยแสงเชิงโครงสร้างจะทำงานได้เร็วกว่า เครื่องสแกนด้วยแสงเชิงโครงสร้างยังสามารถถูกสร้างให้มีขนาดเล็กแบบมือถือได้ (handheld) ซึ่งมีความจำเป็นในการใช้งานในสภาพพื้นที่ที่จำกัดหรือไม่สะดวกต่อการตั้งสถานีทำงาน เช่นการสแกนถ้ำ เป็นต้น อย่างไรก็ดี การสแกน 3D ด้วยแสงเชิงโครงสร้างยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการใช้เซ็นเซอร์กล้องในการสแกนภาพ ซึ่งสภาวะแสงและเงาต่าง ๆ จะมีผลต่อคุณภาพของภาพที่ได้จากกล้อง และด้วยหลักการสะท้อนแสงที่ใช้ ทำให้มีการสูญเสียรายละเอียดเมื่อนำไปใช้ในการสแกนวัตถุที่มีพื้นผิวโปร่งแสงหรือกึ่งโปร่งแสง รวมไปถึงการใช้งานกับพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงได้ อาจจะทำให้มีการสะท้อนแสงออกไปจากทิศทางของกล้องที่ต้องใช้รับข้อมูล นอกไปจากนั้นแล้ว เทคนิคการใช้แสงเชิงโครงสร้าง ยังไม่สามารถใช้งานกับวัตถุที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ เช่นตึกอาคาร บ้าน ฯลฯ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงไม่สามารถที่จะฉายแสงไปยังพื้นผิวในระยะไกล ๆ ได้ เทคโนโลยีการสแกน 3D อื่น ๆ จึงอาจมีความเหมาะสมกว่า โดยเฉพาะงานการสแกนโครงสร้างภายในถ้ำ ซึ่งมีระยะผนังและเพดานที่ไกลได้หลายสิบเมตรถึงร้อยเมตร

2.2 การสำรวจด้วยภาพถ่าย (photogrammetry) เป็นการใช้ภาพถ่ายแทนการใช้แหล่งกำเนิดแสงในการทำสามเหลี่ยม (triangulation) สำหรับหาระยะทางและความลึกของพื้นผิววัตถุ เพื่อสร้างการสแกน 3D ของวัตถุจากข้อมูลดังกล่าว คุณภาพของข้อมูลที่ได้ขึ้นอยู่กับภาพถ่ายและกล้องที่ใช้ ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายจุดข้อมูลในพิกัด 3D ได้มาจากจุดบนภาพถ่ายจากกล้องมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป (หรือถ่ายจากกล้องตัวเดียวแต่ถ่ายจากมุมกล้องที่ต่างกัน) โดยจะต้องทราบพารามิเตอร์ภายในกล้องที่ใช้ในการฉายภาพ 3D เป็น 2D รวมไปถึงตำแหน่งของกล้องในระบบทั้งหมด เทคโนโลยีการประมวลผลภาพถ่ายถูกใช้ในการจับคู่จุดของพื้นผิววัตถุบนภาพที่เกิดจากกล้องทั้งหมด ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีดังกล่าวทำให้การสำรวจด้วยภาพถ่ายสามารถใช้งานได้จริงและมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายจึงต้องใช้คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลเฉพาะในการสร้างแบบจำลอง 3D จากข้อมูลในระบบทั้งหมด

จุดเด่นของการใช้การสำรวจด้วยภาพถ่ายคือการสร้างแบบจำลองวัตถุด้วยข้อมูลสีและพื้นผิวที่เหมือนจริง เนื่องมาจากการใช้ข้อมูลภาพถ่ายเป็นหลักในการประมวลผล นอกไปจากนั้นแล้ว อุปกรณ์ในระบบยังสามารถหาใช้งานได้ง่าย ไม่ว่าจะเป็นกล้องหรือซอฟต์แวร์ในการประมวลผล กล่าวคือกล้องถ่ายรูปดิจิตอลทั่ว ๆ ไปสามารถนำมาใช้งานในการสำรวจด้วยภาพถ่ายได้ ที่ซึ่งสามารถเลือกคุณภาพของกล้องได้ตามงบประมาณที่มี ค่าใช้จ่ายส่วนอื่น ๆ จึงมีเพียงการอัพเกรดซอฟต์แวร์ประมวลผลเท่านั้น อย่างไรก็ดี หากทำการสำรวจด้วยภาพถ่ายด้วยกล้องเพียงตัวเดียว อาจจะต้องใช้เวลาในการทำงานที่มาก ที่ซึ่งเราต้องทำการหมุนกล้องเพื่อให้ได้มุมกล้องต่าง ๆ รอบ ๆ วัตถุที่ต้องการสแกน นอกไปจากนี้แล้ว การบันทึกข้อมูลภาพที่มุมกล้องต่าง ๆ นี้ จำเป็นจะต้องจัดมุมให้ได้ภาพที่เพียงพอต่อการประมวลผล (ภาพต้องมีความความต่อเนื่องในระดับที่ซอฟต์แวร์สามารถคำนวณการเชื่อมต่อภาพได้) เนื่องจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายไม่ได้ดำเนินการแบบในเวลาจริง (real-time) การประมวลผลภาพถ่ายจะกระทำได้เมื่อมีการถ่ายภาพครบเรียบร้อยแล้ว ทำให้ในระหว่างการถ่ายภาพเก็บข้อมูล เราจะไม่มีทางทราบก่อนได้เลยว่าภาพถ่ายที่ได้นั้นมีมุมกล้องหรือข้อมูลภาพที่ขาดหายหรือไม่เพียงพอ อาจจะต้องเสียเวลาในการกลับไปเก็บข้อมูลภาพถ่ายในส่วนที่ขาดหายไปนั้นอีกครั้ง

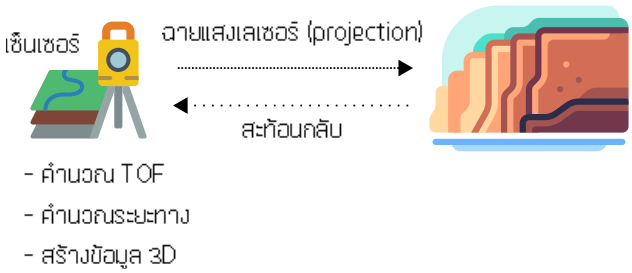
การสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้น นอกจากคุณภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับกล้องที่ใช้ ซึ่งจะต้องมีความละเอียดที่สูงเพียงพอต่องานที่ต้องการสแกน รวมไปถึงการสอบเทียบ (calibrate) กล้อง ทำให้มีความแม่นยำที่น้อยกว่าการสแกน 3D ด้วยเลเซอร์ ที่ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ถูกสร้างขึ้นและสอบเทียบให้ผลการสแกนมีความแม่นยำสูง แต่มีราคาสูงขึ้นด้วยเช่นกัน การสำรวจด้วยภาพถ่ายยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลด้วย ซึ่งซอฟต์แวร์ต่าง ๆ มีอัลกอริทึมในการประมวลผลที่แตกต่างกัน ทำให้ผลลัพธ์การสแกนมีความแตกต่างกันด้วย

2.3 การใช้ LiDAR หรือ **Li**ght **D**etection **A**nd **R**anging [6] เป็นวิธีการสำรวจด้วยการวัดระยะทางของวัตถุเป้าหมายด้วยการฉายแสงเลเซอร์ แล้วทำการวัดการสะท้อนกลับของแสง ความแตกต่างของเวลาและความยาวคลื่นที่สะท้อนกลับของแสงเลเซอร์สามารถใช้ในการสร้างข้อมูล 3 มิติในรูปแบบดิจิตอลของวัตถุเป้าหมายได้ และด้วยความเข้มและแคบของลำแสงเลเซอร์ ทำให้การวัดระยะเป็นไปอย่างแม่นยำ และครอบคลุมระยะทางที่ไกล นำไปสู่การประยุกต์ใช้ข้อมูล 3 มิติจาก LiDAR ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะการทำแผนที่ 3 มิติแบบความละเอียดสูง จุดบนพื้นผิววัตถุที่วัดได้จาก LiDAR สามารถนำมาคำนวณสร้างเป็นกลุ่มเมฆจุด (point clouds) ซึ่งเป็นกลุ่มข้อมูลที่ใช้แทนรูปทรง 3D แต่ละจุดจะมีพิกัด X Y และ Z กลุ่มจุดต่าง ๆ จุดต่าง ๆ เหล่านี้เมื่อนำมาพล็อตรวมกันจะแสดงเป็นรูปทรงต่าง ๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 7 ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะทำการสแกนโครงสร้างภายในถ้ำ ที่ซึ่งมีพื้นผิวที่หลากหลาย มีแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่เพียงพอ (และ/หรืออาจจะไม่มีแสงเลยในบางพื้นที่) รวมไปถึงโครงสร้างภายในถ้ำที่สามารถมีระยะของผนังและเพดานที่ใหญ่มากกว่าร้อยเมตร นอกจากนี้แล้ว การดำเนินการสแกนภายในถ้ำยังจำเป็นจะต้องทำให้ได้ในเวลาจริง เนื่องจากความไม่สะดวกในการตั้งสถานีหากต้องมีการประมวลผลหลังการเดินสแกนเก็บข้อมูล ในงานวิจัยนี้ การเลือกใช้เทคโนโลยีสแกน 3D ด้วย LiDAR จึงมีความเหมาะสมในงานดังกล่าว

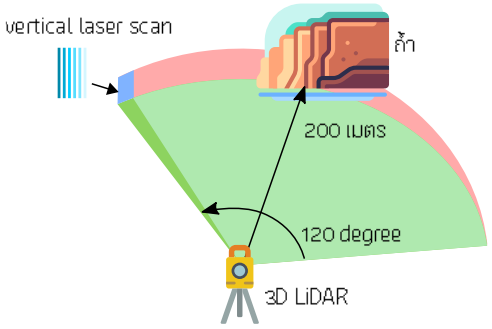


รูปที่ 7 ตัวอย่าง point clouds จากการสแกนกลุ่มอาคาร [7]

เครื่องสแกน 3D แบบ LiDAR จะทำการยิงแสงเลเซอร์ไปยังพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการสแกน และทำการวัดระยะทางไปยังพื้นผิวนั้น ๆ ด้วยหลักการ TOF หรือ Time Of Flight ซึ่งได้แก่เวลาที่ใช้ของเลเซอร์ที่ฉายไปยังพื้นผิวและสะท้อนกลับมายังเซ็นเซอร์เพื่อรับค่า กระบวนการนี้สามารถกระทำได้แบบเวลาจริงด้วยความเร็วไม่ต่ำกว่า 10 fps (เฟรมต่อวินาที) ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกบันทึกไว้รวมทั้งความเข้มของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมายังเซ็นเซอร์ กระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การคำนวณ TOF และการวัดระยะทางของพื้นผิววัตถุเป้าหมายด้วย LiDAR



รูปที่ 9 การสแกน 3D ด้วย LiDAR

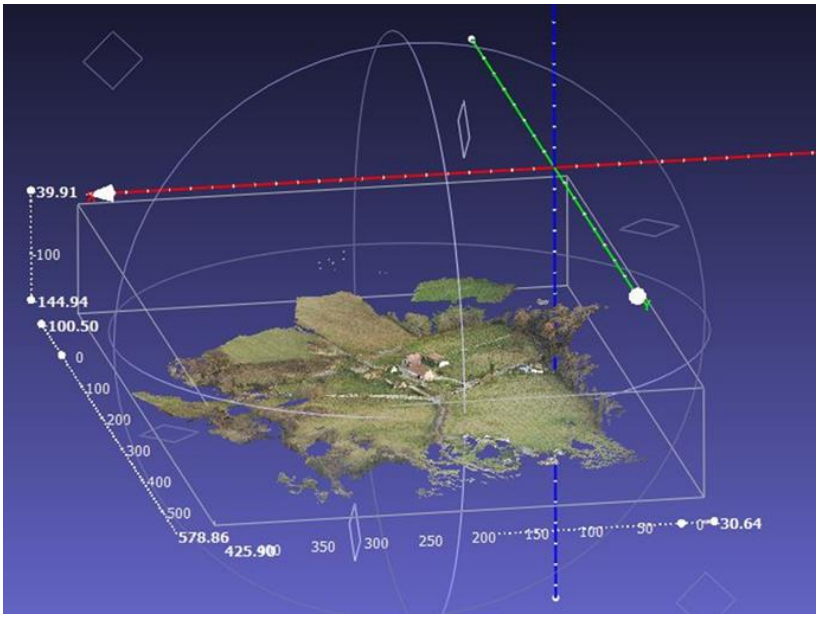
ด้วยเทคโนโลยีการฉายแสงเลเซอร์และเซ็นเซอร์รับแสง รวมถึงเทคโนโลยีการสแกนพื้นที่กว้าง ทำให้สามารถวัดพื้นผิวในการสแกนแต่ละครั้งได้มากกว่า 120 องศารอบทิศ ตัวสแกนเลเซอร์แนวตั้งสามารถสแกนแนวตั้งได้มากกว่า 24 แถว ทำให้ไม่มีการสูญเสียพื้นที่ในการสแกน เทคโนโลยีการสแกนพื้นที่กว้างด้วยเลเซอร์ทำให้สามารถสแกนพื้นที่ได้ไกลและไม่เกิดจุดบอด (blind spot) ในการสแกน การสแกนครอบคลุมระยะทางประมาณ 50 เมตรสำหรับวัตถุขนาดเท่ากับบุคคล ระยะทาง 100 เมตรสำหรับวัตถุขนาดรถยนต์ และมีระยะทางสแกนได้ไกลมากสุดถึง 200 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 9 การใช้แสงระดับเลเซอร์ทำให้สามารถสแกนได้ที่ความละเอียดสูง ตัวอย่างของชุดสแกน 3D แบบ LiDAR เช่น PX-80 ของบริษัท Paracosm [7] เป็นอุปกรณ์สแกนแบบมือถือ ความละเอียด ±2-3 cm ที่ความเร็วในการสแกนสูงสุด 50 fps ด้วยขนาดความละเอียดข้อมูลประมาณ 320 เมกะพิกเซลต่อวินาที ครอบคลุมมุมสแกน 250 องศารอบทิศ ระยะทางสูงสุด 80 เมตร ประมวลผล point clouds ความละเอียดสูงและเป็นแบบสี (full color) ที่ 300,000 จุดต่อวินาที การประมวลผลสามารถทำได้บน iPad ซึ่งทำให้การสแกนแบบเวลาจริงในพื้นที่ภายในถ้ำสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเราสามารถดูผลการสแกนบนจอ iPad ได้เลย ดังแสดงในรูปที่ 10

รูปที่ 10 การสแกน 3D ด้วยเครื่องสแกน LiDAR แบบมือถือรุ่น PX-80 จากบริษัท Paracosm [7]

ข้อมูล point clouds จากการสแกนภายในถ้ำเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองถ้ำแบบ 3D จุดข้อมูลแต่ละจุดสามารถถูกนำมาประมวลผลในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างง่ายดาย ซึ่งซอฟต์แวร์แบบ open source สามารถใช้งานในส่วนนี้ได้เป็นอย่างดี ข้อมูลจาก point clouds ยังใช้ในการวัดมิติของถ้ำ โดยไม่จำเป็นจะต้องมีการสัมผัสส่วนใด ๆ ของถ้ำ เป็นการป้องกันการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการสำรวจถ้ำได้ ตัวข้อมูล point clouds เองยังสามารถบันทึกเก็บในไฟล์ได้หลายรูปแบบ ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานต่อยอดในด้านอื่น ๆ ได้ การนำเอา point clouds ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ทำให้ตัว point cloud เองไม่ได้ถูกจำกัดหรือกำหนดรูปแบบโดยบริษัทหรือองค์กรใดองค์กรหนึ่ง ในการนี้ เว็บไซต์ Point Cloud Library (PCL) [8] จึงถูกจัดตั้งขึ้นเพื่อรองรับงานทางด้านประมวลผลภาพ 2D/3D และ point clouds ที่ซึ่งมีชุดคำสั่ง (library) ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผล point clouds ให้ใช้งานอย่างหลากหลาย เช่นการกรอง (filtering) การประมาณคุณลักษณะ (feature estimation) การบูรณะพื้นผิว (surface reconstruction) การลงทะเบียนจุดภาพ (registration) การทำแบบจำลอง (model fitting) และการตัดแยก (segmentation) เป็นต้น PCL เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดรหัส (open source) จึงสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายทั้งใน

เชิงพาณิชย์หรือเชิงงานวิจัย รวมไปถึงการใช้งานได้ในหลากหลายแพลตฟอร์ม ทั้ง Linux, MacOS, Windows หรือบนระบบมือถือ Android/iOS อย่างไรก็ดี การประมวลผลข้อมูล point clouds ใช้เวลาในการประมวลผลที่นานมาก

จุดข้อมูล point clouds เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3D ด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะ เช่น MeshLab [9] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดรหัส (open source) สำหรับประมวลผล ปรับแต่ง แก้ไข ซ่อมแซม ตรวจสอบ ข้อมูลโครงข่าย (mesh) แบบ 3D จากข้อมูล point clouds ดังตัวอย่างในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวอย่างแบบจำลอง 3D ที่สร้างด้วย MeshLab [9]

3. ระบบสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ (3D Laser Scanner)

เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ หรืออีกชื่อที่นิยมเรียกกันก็คือ เลเซอร์สแกนเนอร์ มีส่วนประกอบดังนี้ โดยส่วนหลักก็คือตัวสแกนเนอร์ จะหมุนได้ 360 องศารอบแกน มีการทำงานด้วยระบบเก็บข้อมูลความเร็วสูง สามารถสแกนข้อมูลพร้อมถ่ายภาพคมชัดระดับ HDR โดยช่องเปิดด้านบนจะเป็นช่องยิงแสงเลเซอร์ น้ำหนักเบา และใช้แหล่งพลังงานแบตเตอรี่ สามารถทำงานภาคสนามได้อย่างสะดวก โดยวัตถุประสงค์ของเครื่องก็เหมือนเครื่องสแกนเนอร์ คือการเก็บข้อมูลและนำไปแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล โดยสแกนเนอร์ 3 มิติจะเก็บข้อมูลไปเป็นโมเดล 3 มิติ ในคอมพิวเตอร์มีลักษณะเป็นจุดพิกัดที่เรียกว่า พอยต์คลาวด์ (point cloud) สแกนเนอร์ 3 มิติ เป็นอุปกรณ์การวัดที่มีค่าความผิดพลาด +/- 2mm

หลักการทำงานของเครื่อง คือกล้องจะยิงแสงเลเซอร์ออกมาเมื่อเลเซอร์พบวัตถุ แสงเลเซอร์ก็จะสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกล้อง กล้องก็จะคำนวณหาระยะห่างของกล้องกับวัตถุจากระยะเวลาเดินทางของเลเซอร์กับความเร็วของเลเซอร์ เสร็จแล้วอุปกรณ์ภายในกล้องก็จะหมุนและยิงแสงเลเซอร์ลำอื่นออกไปเรื่อยๆ โดยในหนึ่งวินาทีนี้ก็ยิงได้แสนจุดหรือมากถึงเก้าแสนจุดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเครื่องแต่ละรุ่น พอยิงครบตามที่กำหนดไว้ ข้อมูลก็ถูกโอนถ่ายไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป โดยความเร็วของการสแกนเก็บข้อมูล จะขึ้นอยู่กับความละเอียดหรือความหนาแน่นของจำนวนกลุ่มข้อมูลหรือจุดพิกัดที่เราต้องการ กล่าวคือการสแกนเก็บข้อมูลเร็ว 3 – 5 นาทีต่อครั้ง ข้อมูลจุดพิกัดที่ได้ก็จะหนาแน่นระดับปานกลาง ถ้าการสแกนเก็บ

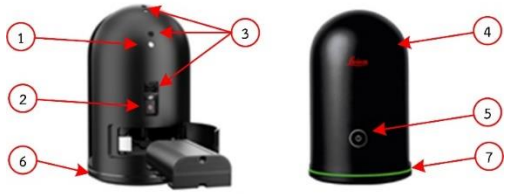
ข้อมูลเร็ว 10 – 15 นาทีต่อครั้ง ข้อมูลจุดพิกัดที่ได้ก็จะหนาแน่นระดับละเอียดมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยทั่วการใช้งานเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ เหมาะสำหรับงานประเภทต่าง ๆ เช่น งานโยธา ก่อสร้าง งานด้านการวัดทางวิศวกรรมของอาคารขนาดกลางและขนาดใหญ่ งานสำรวจ และยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ อีกหลายด้าน

รูปที่ 12 เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ ยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360

เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ และอุปกรณ์ ประกอบด้วยหมายเลข 1) ตัวเครื่องสแกน รุ่น BLK 360 มีชุดฝาครอบและฐานรอง 2) แบตเตอรี่และอุปกรณ์ชาร์จ จำนวน 5 ชุด 3) คู่มือการใช้งาน 4) กระเป๋ากันกระแทก 5) ขาตั้งเครื่องสแกนแบบ 3 ขา 6) ตัวแปลงขาตั้งเครื่องสแกน (รูปที่ 13) และในส่วนของระบบควบคุมการทำงานของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ ประกอบด้วย 1) เครื่องประมวลผลข้อมูล 3 มิติในภาคสนามเป็นแท็บเล็ตระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เชื่อมต่อแบบไร้สาย 2) เครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผลข้อมูล 3 มิติในสำนักงาน 3) โปรแกรมประมวลผลข้อมูล 3 มิติ (โปรแกรม REGISTER 360 BLK Edition) และ 4) แอปพลิเคชัน Leica Cyclone FIELD 360 ในเครื่องประมวลผลแบบพกพา

รูปที่ 13 องค์ประกอบหลักของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ (3D Laser Scanner)

ส่วนประกอบของเครื่องและลักษณะจำเพาะของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ รุ่น BLK 360 ประกอบด้วย หมายเลข 1) ไฟแฟลชสำหรับการถ่ายภาพ HDR 2) กล้องถ่ายภาพความร้อน 3) กล้องถ่าย HDR จำนวน 3 จุด 4) เลเซอร์สแกนเนอร์ 360 องศา 5) ปุ่มเปิด/ปิดเครื่อง 6) เสาอากาศ WLAN 360 องศา 7) ไฟแสดงสถานะการทำงาน (รูปที่ 14) และลักษณะจำเพาะของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ (รูปที่ 15)



รูปที่ 14 ส่วนประกอบของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ ยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360

6 Technical Data

6.1 General Technical Data of the Product

Storage and Communication

Internal storage:
32 GB, enough for > 100 setups.

Communication:
Integrated 802.11 b/g/n WLAN with MIMO.

Internal HDR cameras

The Leica BLK360 has three integrated HDR digital cameras.

Camera data	Value
Type	Colour sensor, fixed focal length
Single image	2592 x 1944 pixels, 60° x 45° (V x Hz)
Full dome	30 images, automatically spatially rectified, 150Mpx, 360° x 300°
White balancing	Automatic
HDR	Automatic
Flash	LED for continuous illumination
Minimum range	0.6 m

Internal thermal camera (available in special product variant)

The Leica BLK360 has an integrated thermal camera.

Camera data	Value
Type	Infrared
Single image	160 x 120 pixels, 71° x 56° (V x Hz)
Full dome	10 images, 360° x 70°
Temperature range	-10 °C to 65 °C
Thermal sensitivity	<0.05 °C
Spectral range	8 to 14 µm
Minimum range	0.6 m

6.2 System Performance

System performance and accuracy

☞ All ± accuracy specifications are one sigma (1σ) under Leica Geosystems standard test conditions unless otherwise noted.

Accuracy of single measurement (at 78% albedo)	Value
Angle (horizontal/vertical)	40"/40"
3D point accuracy	6 mm at 10 m, 8 mm at 20 m

6.3 Laser System Performance

Laser scanning system data

☞ The scanning system is a high speed time-of-flight unit, enhanced by Waveform Digitising (WFD) technology with a maximum scan rate of 360.000 points/second.

Laser unit:

Scanning laser	Value
Classification	Laser Class 1 (in accordance with IEC 60825-1 (2014-05))
Wavelength	830 nm (invisible)

Range:

Scanning data	Value
Beam divergence	0.4 mrad (FWHM, full angle)
Beam diameter at front window	2.25 mm (FWHM)
Minimum range	0.6 m
Maximum range	60 m @ 78% albedo
Range accuracy	4 mm at 10 m and 7 mm at 20 m

Field-of-View (per scan):

Field-of-View	Value
Selection	Always full dome.
Horizontal	360°
Vertical	300°
Scanning optics	Vertically rotating mirror on horizontally rotating base.

Scan duration for 3 settings:

Point density mode	Resolution [mm @ 10m]	Estimated scan duration [MM:SS] for a full dome scan
Fast	20	00:40
Standard	10	01:50
High density	5	03:40

Image capturing time:

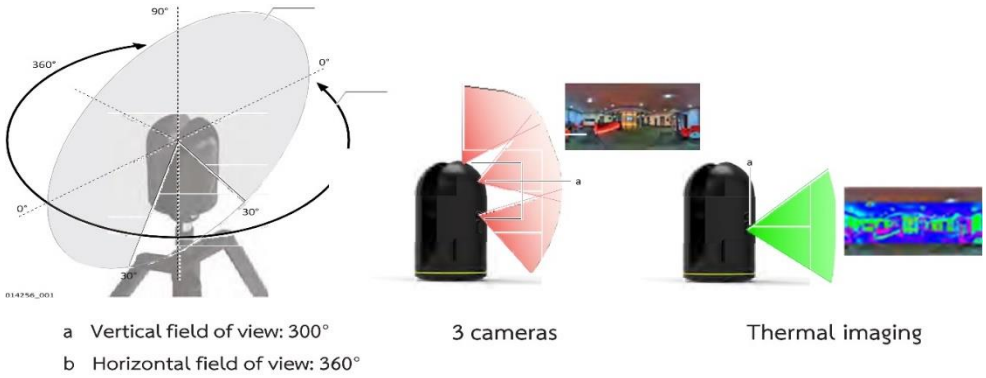
Camera type	Estimated image duration [MM:SS]
Non HDR	01:00
HDR	02:30
Thermal *	00:30

รูปที่ 15 ลักษณะจำเพาะของเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ ยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360

3.1 หลักการทำงานและวิธีการใช้งานเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ

การสำรวจด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ การสำรวจด้วยเทคนิควิธีนี้ นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน มีหลักการทำงานและลักษณะจำเพาะในเบื้องต้น คือ ตัวเครื่องจะเป็นตัวกำเนิดแสงเลเซอร์ (LIDAR) ยิงแสงไปยังวัตถุเป้าหมายและสะท้อนกลับยังตัวกล้อง แล้วแปลงข้อมูลในรูปแบบของกลุ่มข้อมูล ที่เรียกว่าจุดพิกัด point cloud (x, y, z) มีลักษณะมุมมองภาพแนวนอน 360 องศา และแนวตั้ง 300 องศา มีระยะการสแกนในช่วง 6 - 60 เมตร สามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายสีแบบรอบทิศ (panorama) โดยใช้ระบบการถ่ายภาพจากกล้อง 3 ตัว และภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดได้ (รูปที่ 16) และวิธีใช้งานเบื้องต้นจะต้องทำการเชื่อมต่อเครื่องสแกนกับอุปกรณ์แท็บเลต เพื่อทำการตั้งค่าและจัดการรูปแบบข้อมูลการสแกนผ่านแอปพลิเคชัน Cyclone REGISTER360 (รูปที่ 17) และแสดงผลการเชื่อมต่อจุดพิกัดของกลุ่มข้อมูล เพื่อ

ใช้ตรวจสอบและพิจารณารายละเอียดรูปทรงของวัตถุที่สแกนในเบื้องต้น ก่อนที่จะทำการถ่ายโอนข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลข้อมูล 3 มิติ และบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลของจุดพิกัด point cloud ได้แก่ นามสกุล E57 LAS PTX และ PTS



รูปที่ 16 หลักการทำงานและคุณสมบัติเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ

รูปที่ 17 แอปพลิเคชัน Cyclone REGISTER360

3.2 ขั้นตอนการใช้งานเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ ขั้นพื้นฐาน

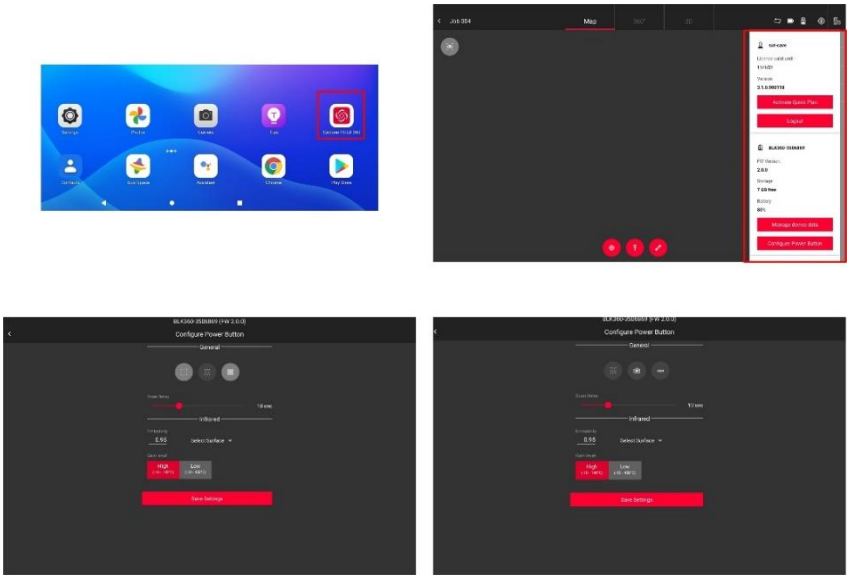
(1) ติดตั้งอุปกรณ์เครื่องสแกน 3 มิติกับขาตั้ง ติดตั้งแบตเตอรี่ และทำการเปิดเครื่องด้วยการกดปุ่มค้างไว้ให้เวลาน้อยกว่า 0.5 วินาที รอจนกระทั่งไฟแสดงสถานะสีเขียวขึ้นมาหมายถึงเครื่องพร้อมใช้งาน และเมื่อต้องการปิดเครื่องทำได้โดยกดปุ่มค้างไว้ให้เวลามากกว่า 2 วินาที รอสัญญาณไฟกระพริบแล้วดับลง (รูปที่ 18)

รูปที่ 18 วิธีการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ

(2) วิธีการเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน Cyclone REGISTER360 ผ่านระบบ WIFI ใส่ชื่อเครือข่ายและรหัสผ่าน โดยรหัสผ่านจะติดอยู่ที่ฝาหลังของตัวเครื่องสแกน แล้วทำการเชื่อมต่อและตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อรหว่างเครื่องสแกนและแอปพลิเคชัน (รูปที่ 19)

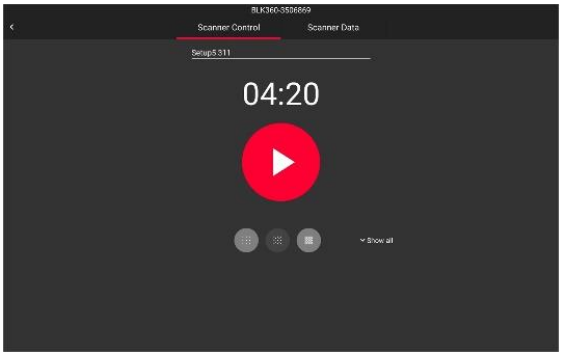
รูปที่ 19 วิธีการเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน Cyclone REGISTER360 ผ่านระบบ WIFI

(3) วิธีการใช้งานแอปพลิเคชัน Cyclone REGISTER360 เพื่อทำการตั้งค่าและจัดการรูปแบบข้อมูลการสแกน ในขั้นตอนแรกให้ตรวจสอบสถานะเบื้องต้นของการเชื่อมต่อแอปพลิเคชันผ่านระบบ WIFI ว่าเชื่อมต่อสมบูรณ์หรือไม่ ขั้นตอนที่สองทำการตั้งค่าความละเอียดของภาพถ่ายและการสแกน โดยระดับความละเอียดของภาพถ่ายมีให้เลือก 2 ระดับ ได้แก่ LDR และ HDR และความละเอียดในการสแกนจุดพิกัด Point cloud โดยบ่งบอกถึงคุณสมบัติความหนาแน่นของกลุ่มข้อมูลมีความละเอียด (Resolution) ให้เลือก 3 ระดับ ได้แก่ Low, Medium และ High โดยความละเอียดขึ้นกับวัตถุประสงค์การนำไปใช้งานหรือลักษณะของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะงานสำรวจถ้ำครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ความละเอียดระดับ Medium ซึ่งเป็นข้อมูลที่เหมาะสำหรับการนำไปพัฒนาโปรแกรมสร้างแบบจำลองภาพ 3 มิติ ในลำดับต่อไป และสิ่งที่สำคัญการเริ่มต้นการใช้งานเครื่องสแกนที่ตำแหน่งแรก จะต้องทำการตั้งค่าและตรวจสอบสถานะทุกครั้งก่อนเริ่มทำการสแกนวัตถุ เพื่อลดความผิดพลาดของรูปแบบข้อมูลการสแกนที่แตกต่างกัน (รูปที่ 20)



รูปที่ 20 ขั้นตอนการตั้งค่าแอปพลิเคชันและตรวจสอบสถานะเบื้องต้น

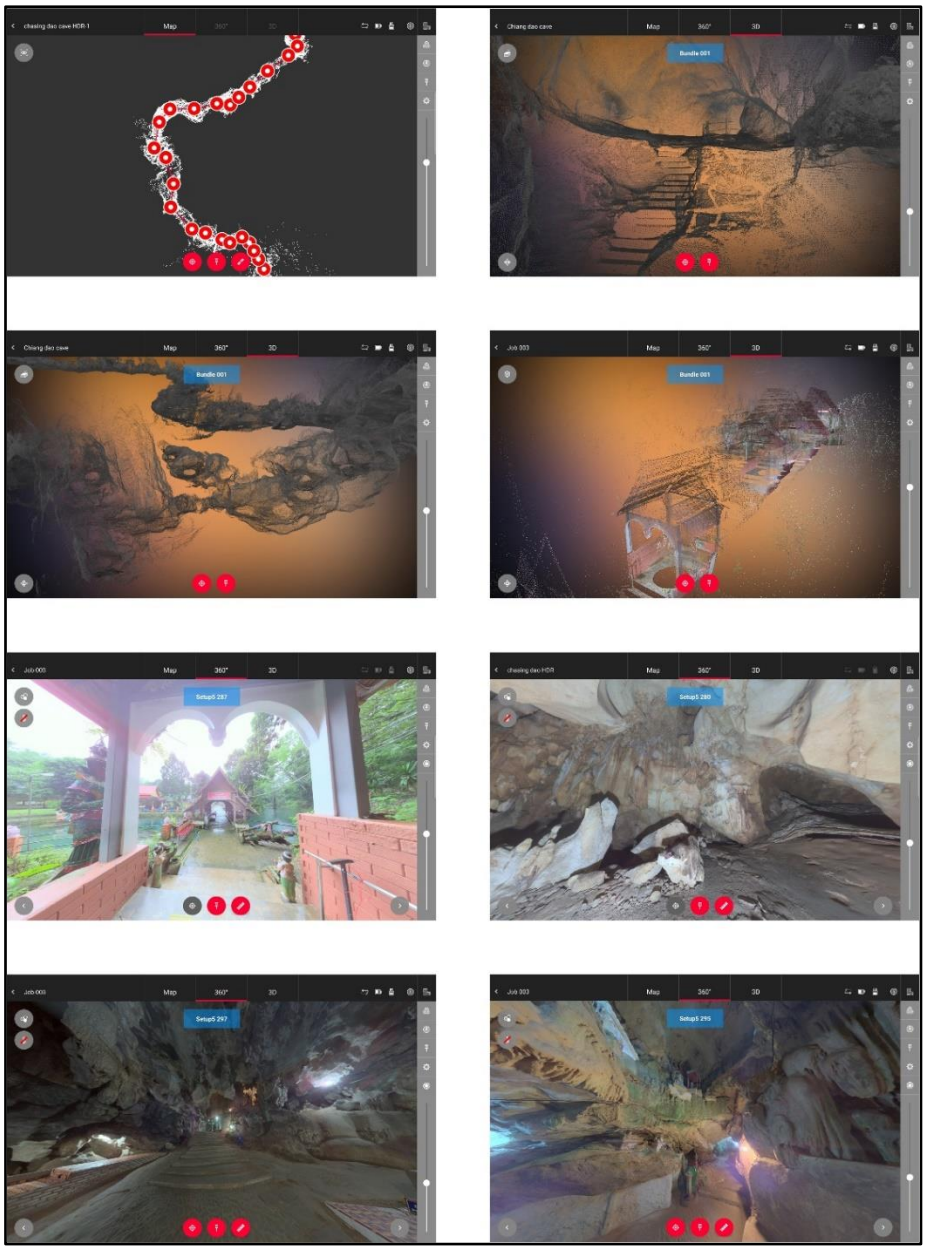
(4) วิธีการควบคุมและสั่งงานเครื่องสแกน 3 มิติ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ กดปุ่มสั่งงานผ่านแอปพลิเคชันและการกดที่ปุ่มพาวเวอร์ (Power) บนตัวเครื่องสแกนภาพสามมิติ (รูปที่ 21) เครื่องก็จะเริ่มทำการสแกนภาพทันที เป็นวิธีที่สะดวกต่อการใช้งานและเหมาะกับการสแกนภาพแบบต่อเนื่องหลายจุดข้อมูล



รูปที่ 21 วิธีการสั่งงานผ่านแอปพลิเคชัน (ซ้าย) และวิธีการกดปุ่ม Power สั่งงานผ่านตัวเครื่องสแกน (ขวา)

(5) วิธีการตรวจสอบข้อมูลภาพ 3 มิติเบื้องต้นผ่านแอปพลิเคชัน ขั้นตอนแรกจะต้องทำการนำเข้าข้อมูลพิกัดในแต่ละจุดที่ทำการสแกน ในขณะที่เครื่องกำลังสแกนวัตถุสามารถทำการโอนถ่ายข้อมูลพร้อมกับการสแกนแบบต่อเนื่องได้ สิ่งที่สำคัญจะต้องทำการตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นในทุกครั้งที่ทำการสแกนภาพเสร็จสิ้นในแต่ละจุด เพื่อลดความผิดพลาดในสแกนและได้ข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ ถ้าเกิดความผิดพลาดจะไม่สามารถนำข้อมูลพิกัดที่ได้ไปเชื่อมต่อกับข้อมูลจุดอื่น ๆ ได้ รูปที่ 22 เป็นการแสดงภาพตัวอย่าง การนำเข้าข้อมูลภาพ 3 มิติ และทำการต่อจุดข้อมูลแต่ละจุด เพื่อแสดงผลภาพถ่ายในรูปแบบพาโนรามาด้วยการซ้อนทับของจุดพิกัด

(6) วิธีการใช้งานแบตเตอรี่และอุปกรณ์ชาร์จ เป็นอุปกรณ์จ่ายไฟสำหรับเครื่องสแกน 3 มิติ ประกอบด้วย แบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ จำนวน 5 ชุด จากผลการทดสอบการใช้งานเครื่องสแกน 3 มิติ ในงานสำรวจถ้ำ โดยค่าเฉลี่ยในการใช้งานแบตเตอรี่จำนวน 1 ก้อน ในการสแกนวัตถุที่มีลักษณะการใช้งานแบบต่อเนื่อง มีระยะเวลาในทำงานประมาณ 2–3 ชั่วโมง โดยความจุของแบตเตอรี่จะแสดงสถานะค่าพลัง ที่เครื่องสามารถทำงานได้ปกติช่วง 100% - 15% ส่วนระยะเวลาในการใช้งานมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิขณะใช้งาน จากผลการทดสอบสำหรับการใช้งานจริงการสำรวจถ้ำในเวลา 1 วัน ตั้งแต่เวลา 9.00 - 17.00 น. แบบต่อเนื่อง จำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้งานไม่เกิน 3 ก้อน และยังเหลือแบตเตอรี่สำรองอีกจำนวน 2 ชุด ส่วนระยะเวลาในการชาร์ตแบตเตอรี่ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงต่อ 1 ก้อน สรุปได้ว่าแบตเตอรี่และเครื่องชาร์จ จำนวน 5 ชุด เพียงพอต่อการปฏิบัติงานและยังมีแบตเตอรี่สำรองเมื่อเกิดกรณีเกิดการสูญหายหรือชำรุด



รูปที่ 22 ภาพหน้าจอตัวอย่างจากเครื่องสแกน 3 มิติ แสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน

4. ขั้นตอนการสำรวจและวิธีเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในถ้ำด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ

ขั้นตอนวิธีการสำรวจและเก็บข้อมูลในส่วนนี้เป็นวิธีการเก็บข้อมูลสำหรับจำลองภาพเสมือนจริงภายในถ้ำโดยใช้เครื่องสแกนแบบ 3 มิติ (3D) ยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360 เก็บข้อมูลลักษณะภูมิประเทศตั้งแต่บริเวณจุดเริ่มต้นของถ้ำหรือบริเวณหน้าถ้ำซึ่งเป็นจุดที่สามารถมองเห็นสภาพแวดล้อมจริงบริเวณภายนอกถ้ำเพื่อเชื่อมโยงเข้ามายังด้านในของโพรงถ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 23 จากนั้นให้เลื่อนตำแหน่งโดยยึดแนวเส้นกึ่งกลางทางเดินหรือโพรงถ้ำไปจนถึงจุดสุดท้ายของการเก็บข้อมูลพื้นที่ โดยยินยอมให้มีการเลื่อนตำแหน่งได้ตามสภาพแวดล้อมจริงโดยต้องไม่ห่างจากระยะที่กำหนดมากเกินไป เนื่องจากสภาพภูมิประเทศภายในโพรงถ้ำมีลักษณะที่มีความแตกต่างอย่างหลากหลายซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์จากการเก็บข้อมูล จึงต้องกำหนดวิธีการเก็บข้อมูลพื้นที่เพื่อเป็นแนวในการปฏิบัติต่อไป

รูปที่ 23 จุดเริ่มต้นเก็บข้อมูลพื้นที่บริเวณหน้าถ้ำเชียงดาว

ในขั้นต้นจะได้อธิบายถึงรายละเอียดเรื่องการติดตั้งไฟส่องสว่างขณะทำการสำรวจและเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในโพรงถ้ำ (รูปที่ 24 และรูปที่ 25) โดยที่ความจำเป็นของการติดตั้งไฟส่องสว่างก็เพื่อต้องการเก็บข้อมูลที่เป็นภาพถ่ายเพื่อให้เห็นถึงรายละเอียดของพื้นผิวผนังถ้ำหรือรายละเอียดอื่นๆ ที่มีความแตกต่างกันในเชิงสีสันของวัตถุ ทั้งนี้ความสว่างของแสงไฟควรเหมาะสมและเพียงพอสำหรับโพรงถ้ำเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ในแต่ละตำแหน่งที่ตั้งเครื่องสแกนเก็บข้อมูล เพราะแสงสว่างมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของข้อมูลภาพถ่าย โดยวิธีการติดตั้งชุดไฟส่องสว่างจะทำการติดตั้งอยู่ที่บริเวณใต้ฐานเครื่องสแกนซึ่งเป็นบริเวณจุดบอดของการเก็บข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง ฉะนั้นจะไม่เป็นการบดบังรายละเอียดของข้อมูลพื้นที่ภูมิประเทศภายในโพรงถ้ำแต่อย่างใด

รูปที่ 24 ตัวอย่างการติดตั้งไฟส่องสว่างขณะทำการสแกนเก็บข้อมูล ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

รูปที่ 25 ตัวอย่างการติดตั้งไฟส่องสว่างขณะทำการสแกนเก็บข้อมูล ณ ถ้ำเชียงดาว

รายละเอียดในการปฏิบัติการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นที่แบ่งตามลักษณะภูมิประเทศภายในถ้ำอธิบายในหัวข้อต่อไปดังนี้

4.1 โพรงถ้ำที่เป็นแนวเส้นตรง

กรณีที่โพรงถ้ำมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 26 ให้ตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่ในตำแหน่งแนวเส้นกึ่งกลางทางเดิน โดยกำหนดระยะห่างของการเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่งอยู่ระหว่าง 5 เมตร ถึง 10 เมตร แต่หากโพรงถ้ำนั้นมีลักษณะเป็นโถงกว้างขนาดใหญ่ ให้ตั้งเครื่องสแกน 3 มิติในลักษณะสลับฟันปลาด้วยระยะห่างระหว่างตำแหน่ง 5 เมตร ถึง 10 เมตรเช่นกัน

รูปที่ 26 โพรงถ้ำที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรง

4.2 โพรงถ้ำที่เป็นแนวโค้งหรือหรือบริเวณที่เป็นทางแยก

ในกรณีโพรงถ้ำที่ต้องการสแกนภาพมีลักษณะของผนังถ้ำเป็นแนวโค้ง (รูปที่ 27) วิธีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเพื่อเก็บข้อมูลพื้นที่ตามแนวโค้งของโพรงถ้ำให้อยู่ในแนวเส้นกึ่งกลางทางเดินและระยะห่างของการเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่งอยู่ระหว่าง 5 เมตร ถึง 10 เมตรเช่นเดียวกับกรณีที่โพรงถ้ำเป็นแนวเส้นตรง แต่ตำแหน่งของการตั้งเครื่องสแกน 3 มิติแต่ละตำแหน่งในแนวโค้งนั้น ต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นตำแหน่งที่เก็บข้อมูลตำแหน่งก่อนหน้าหรือตำแหน่งถัดไปได้อย่างชัดเจน และในกรณีที่ตำแหน่งของโพรงถ้ำเป็นทางแยก จะต้องตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่ในบริเวณกึ่งกลางของโพรงถ้ำที่บริเวณทางแยกนั้นๆ โดยยินยอมให้เลื่อนตำแหน่งได้ตามสภาพแวดล้อมจริงโดยต้องไม่ห่างจากระยะที่กำหนดมากเกินไป

รูปที่ 27 ภาพโพรงถ้ำที่มีลักษณะเป็นแนวโค้ง

4.3 โพรงถ้ำที่มีความซับซ้อนมีหินงอกหินย้อยและก้อนหินวางกีดขวาง

โพรงถ้ำที่มีความซับซ้อนของโครงสร้างภายในถ้ำ เช่น ในบริเวณที่มีหินงอกหินย้อยเกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมีก้อนหินขนาดใหญ่กีดขวางเส้นทางเดิน ดังแสดงในรูปที่ 28 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดการบดบังรายละเอียดของผนังถ้ำในด้านอื่นๆ ได้ หลักการสำคัญที่สุด ก็คือ ให้ผู้ปฏิบัติพิจารณาจากการสังเกตด้วยสายตาจากตำแหน่งที่ตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่ในขณะนั้น หากพบว่ามีหินงอกหินย้อยหรือก้อนหินบดบังผนังถ้ำในด้านอื่นๆ ให้ทำการเก็บข้อมูลพื้นที่เพิ่มเติมในตำแหน่งที่ถูกบดบังนั้นเพิ่มเติม เพื่อให้ได้รายละเอียดของผนังถ้ำอย่างครบถ้วน โดยยึดหลักการเช่นเดิม คือ ที่ตำแหน่งของการตั้งเครื่องสแกน 3 มิติในแต่ละตำแหน่งต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นตำแหน่งที่เก็บข้อมูลตำแหน่งก่อนหน้าหรือตำแหน่งถัดไปได้ชัดเจน

รูปที่ 28 ลักษณะโพรงถ้ำที่มีความซับซ้อนมีหินงอกหินย้อยและก้อนหินวางกีดขวาง

4.4 โพรงถ้ำที่มีระดับความสูงของพื้นถ้ำแตกต่างกัน

โพรงถ้ำในบริเวณที่มีลักษณะภูมิประเทศเป็นเนินหิน เนินดิน หรือพื้นที่ลาดชันที่มีระดับความสูงแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 29 หากเป็นโพรงถ้ำในลักษณะนี้ให้ผู้ปฏิบัติพิจารณาจากตำแหน่งที่ตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลในขณะนั้น หากพบว่าตำแหน่งถัดไปมีพื้นที่ต่างระดับที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าระดับของตำแหน่งเก็บข้อมูลปัจจุบันและเป็นบริเวณจุดอับสายตาจากเครื่องสแกน 3 มิติ ให้ทำการเก็บข้อมูลพื้นที่เพิ่มเติมในตำแหน่งนั้นเพื่อให้ได้รายละเอียดของพื้นที่อย่างครบถ้วน โดยที่ตำแหน่งของการตั้งเครื่องสแกน 3 มิติในแต่ละตำแหน่ง ต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นตำแหน่งที่เก็บข้อมูลตำแหน่งก่อนหน้าหรือตำแหน่งถัดไปได้ชัดเจน

รูปที่ 29 ภาพแสดงลักษณะโพรงถ้ำที่มีระดับความสูงแตกต่างกัน

4.5 โพรงถ้ำขนาดเล็กหรือเป็นช่องลอดผ่านขนาดเล็ก

ในส่วนของโพรงถ้ำที่เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างโพรงถ้ำขนาดใหญ่อาจมีลักษณะเป็นช่องลอดผ่านขนาดเล็กซึ่งมีขนาดแค่พอดีตัวมนุษย์ที่สามารถผ่านเข้าไปได้ เช่น บริเวณโพรงถ้ำม้าที่อยู่ในถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่นั้น ดังแสดงในรูปที่ 30 เริ่มต้นโดยให้ผู้ปฏิบัติตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่ที่บริเวณปากช่องลอดผ่านในระดับความสูงกึ่งกลางช่องลอดนั้น เพื่อให้มองเห็นรายละเอียดด้านในของช่องลอดผ่าน หากช่องลอดผ่านมีระยะสั้นและเป็นแนวตรงสามารถตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลในตำแหน่งถัดไปได้ที่ตำแหน่งปากช่องลอดผ่านอีกด้านได้ แต่หากช่องลอดผ่านมีระยะยาวและมีลักษณะเป็นแนวโค้งหรือมีความลาดชันภายในช่องลอดผ่านนั้น ให้ผู้ปฏิบัติตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่เพิ่มเติมในตำแหน่งแนวโค้งหรือตำแหน่งเปลี่ยนระดับลาดเอียงภายในช่องลอดผ่าน เพื่อให้ได้จุดข้อมูลที่มากพอสำหรับนำมาเชื่อมต่อกันเป็นข้อมูลพื้นที่ได้อย่างสมบูรณ์

รูปที่ 30 ภาพแสดงลักษณะโพรงถ้ำที่เป็นช่องลอดผ่านขนาดเล็ก

4.6 สรุปผลขั้นตอนการสำรวจและวิธีเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในถ้ำด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ (3D)

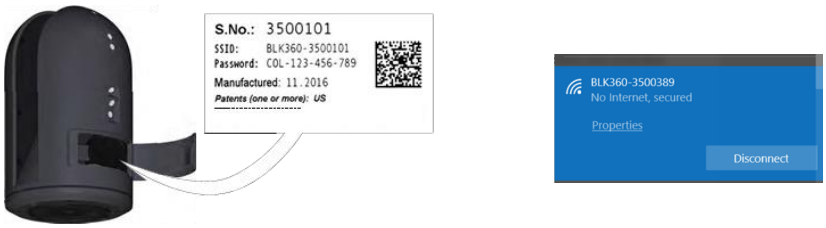
ในขั้นตอนการสำรวจและเก็บข้อมูลภาพเสมือนจริงภายในโพรงถ้ำด้วยเครื่องสแกนแบบ 3 มิติ มีเป้าหมายหลักคือ การได้มาซึ่งจุดข้อมูลของพื้นที่ที่มีรายละเอียดที่มากเพียงพอสำหรับนำมาเชื่อมต่อกันเป็นข้อมูลพื้นที่แบบ 3 มิติได้อย่างสมบูรณ์และครบถ้วน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการเข้าสำรวจพื้นที่ของถ้ำล่วงหน้าก่อนในแต่ละช่วงเพื่อทำการประเมินภูมิประเทศภายในโพรงถ้ำ แล้ววางแผนกำหนดแนวปฏิบัติสำหรับการตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บข้อมูลพื้นที่ โดยปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมตามสภาพภูมิประเทศของโพรงถ้ำในแต่ละช่วงที่ได้อธิบายไปแล้ว ซึ่งในบางช่วงของโพรงถ้ำคณะผู้วิจัยจำเป็นต้องปีนเนินหินสูงหรือก้อนหินขนาดใหญ่ ทั้งนี้เพื่อต้องการตั้งเครื่องสแกน 3 มิติให้อยู่ในตำแหน่งที่มีมุมมองครอบคลุมในบริเวณที่ต้องการเก็บข้อมูลพื้นที่ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามหลักการสำคัญในการตั้งเครื่องสแกนแบบสามมิติก็คือ ต้องวางในตำแหน่งแนวเส้นกึ่งกลางทางเดิน โดยกำหนดระยะห่างของการเก็บข้อมูลแต่ละตำแหน่งอยู่ระหว่าง 5 เมตร ถึง 10 เมตร และหากตำแหน่งถัดไปเป็นจุดที่อับสายตาต้องตั้งเครื่องสแกน 3 มิติเก็บภาพบริเวณนั้นเพิ่มเติมให้ครบถ้วนโดยตำแหน่งถัดไปหรือตำแหน่งที่เพิ่มเติมขึ้นมาต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถมองเห็นตำแหน่งที่เก็บข้อมูลตำแหน่งก่อนหน้าหรือตำแหน่งถัดไปได้อย่างชัดเจน หรืออาจกล่าวได้ว่ากล้องเปรียบเสมือนดวงตาของผู้ปฏิบัติการสำรวจ เมื่อดวงตามองเห็นภาพเช่นใดกล้องก็สามารถตรวจจับข้อมูลพื้นที่และวัตถุได้เช่นนั้น

5. ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลและสร้างภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำ

ซอฟต์แวร์ Leica Cyclone REGISTER 360 เป็นโปรแกรมเฉพาะสำหรับเครื่องสแกนเนอร์ 3 มิติ ที่ใช้สำหรับการลงทะเบียน (Registration) หรือต่อจุดข้อมูลสแกน point cloud สามารถต่อข้อมูลสแกนได้ทั้งแบบใช้เป้า (target) หรือต่อข้อมูลแบบอัตโนมัติ (cloud to cloud) พร้อมทั้งตรวจสอบความแม่นยำของการต่อข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงผลข้อมูลแบบ 3 มิติ วัดระยะทาง พื้นที่หรือแสดงค่าพิกัด (x, y, z) เป็นต้น โปรแกรมนี้มีหลักการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน ในส่วนของขั้นตอนการทำงานมาพร้อมกับคำแนะนำจึงช่วยประหยัดเวลาและทำงานได้รวดเร็วขึ้น โดยมีหลักการทำงานดังนี้ หลังจากผ่านขั้นตอนการสำรวจและเก็บข้อมูลเสร็จสิ้น จุดพิกัดทั้งหมดจะถูกถ่ายโอนข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 (pc version) เพื่อทำการประมวลผล การใช้งานโปรแกรม Leica Cyclone REGISTER 360 มีรูปแบบการใช้งาน 4 ขั้นตอนหลัก คือ 1) การนำเข้า (import) 2) การตรวจสอบและปรับค่าข้อมูล (review and optimize) 3) การสรุปและจัดรูปแบบข้อมูล (finalize) 4) การรายงานผล (report) และบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลของข้อมูลแบบ 3 มิติ

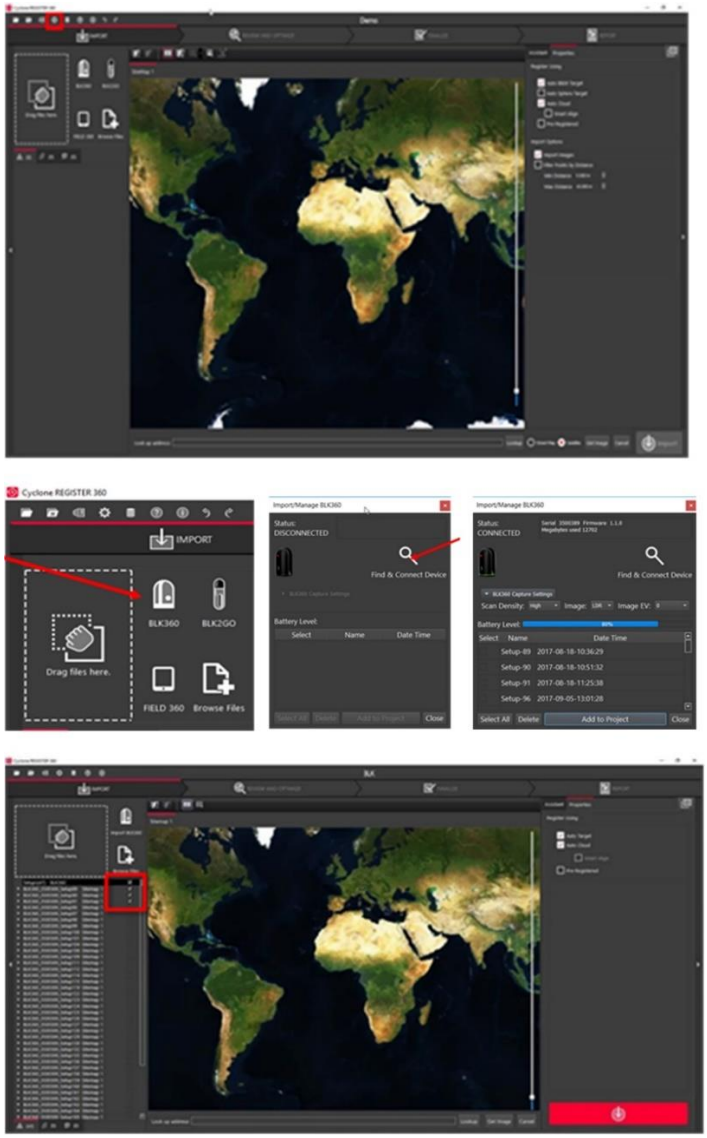
5.1 ขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition)

(1) การเชื่อมต่ออุปกรณ์ ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับเครื่องสแกน 3 สามมิติ โดยการเปิดเครื่องและรอจนกว่าสถานะสัญญาณไฟสีเขียวจะสว่างขึ้นมา จากนั้นทำการตั้งค่าการเชื่อมต่อบนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ผ่านระบบไวไฟ ใส่ชื่อเครือข่ายและรหัสผ่านที่ฝาหลังของตัวเครื่องสแกน สถานะเครื่องพร้อมถ่ายโอนข้อมูล



รูปที่ 31 การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์กับเครื่องสแกน 3 มิติผ่านระบบไวไฟ

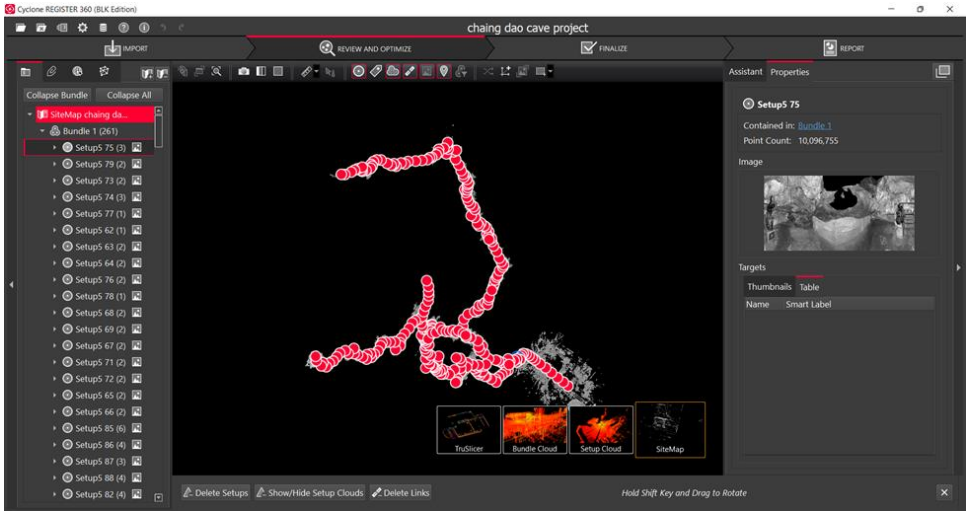
(2) การนำเข้า (import) หลังจากทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์เสร็จสิ้น จะต้องกำหนดค่าพื้นฐานของซอฟต์แวร์เมื่อเข้าโปรแกรม ให้ทำการตั้งค่าจากแถบเครื่องมือที่อยู่ด้านบนมุมซ้ายของหน้าจอ รูปที่ 5.2 โดยเลือกเครื่องสแกน รุ่น BLK 360 แล้วกดค้นหาเพื่อทำการเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติ หลังจากนั้นจะแสดงผลข้อมูลสแกนทั้งหมดที่หน้าต่างแสดงผลการนำเข้าข้อมูลของโปรแกรม Cyclone REGISTER 360 ให้ทำการตรวจสอบข้อมูลแล้วเลือกชุดข้อมูลตามลำดับแนวเส้นทางการสำรวจ เลือกรูปแบบการต่อข้อมูลแบบอัตโนมัติ (cloud to cloud) แล้วกดปุ่มนำเข้ามูล



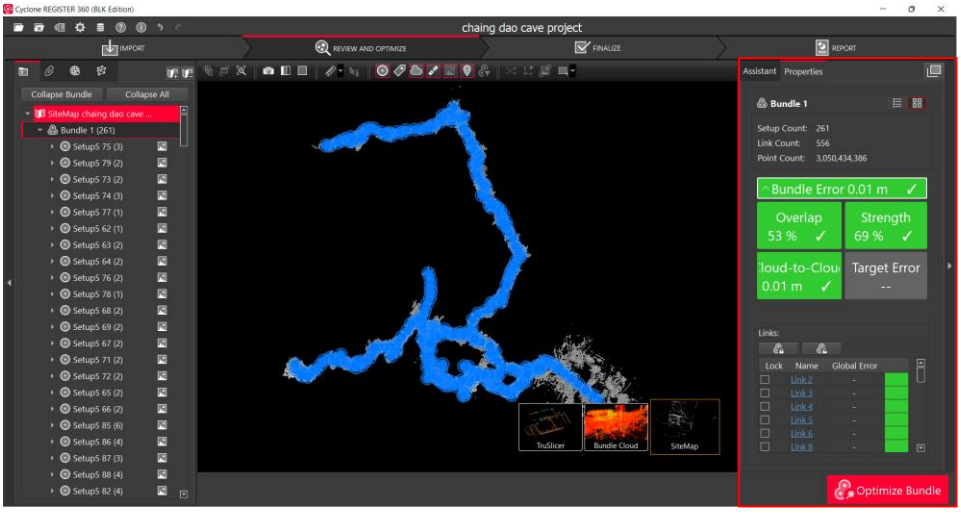
รูปที่ 32 ขั้นตอนการเชื่อมต่อและนำเข้าข้อมูลสแกนด้วยโปรแกรม Cyclone REGISTER 360

(3) การตรวจสอบและปรับค่าข้อมูล (review and optimize) ในขั้นตอนการตรวจสอบและปรับค่าการเชื่อมต่อจุดข้อมูล point cloud เมื่อโปรแกรมโอนถ่ายข้อมูลจากเครื่องสแกนและประมวลผลการเชื่อมข้อมูลแบบอัตโนมัติ แต่ในกรณีที่ไม่สามารถเชื่อมต่อข้อมูลได้ครบทุกจุดสแกน รูปที่ 33 ซึ่งมีสาเหตุจากข้อมูลบางจุดที่ทำการสแกนวัตถุ มีลักษณะสภาพพื้นที่ค่อนข้างซับซ้อน โปรแกรมจึงไม่สามารถประมวลผลในการเชื่อมต่อข้อมูลแบบอัตโนมัติได้ทุกจุด ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องเชื่อมต่อข้อมูลด้วยตนเองให้ครบทุกจุดข้อมูลที่ทำการสแกน รูปที่ 34 เมื่อการเชื่อมต่อข้อมูลสมบูรณ์ทุกจุดสแกน สามารถตรวจสอบรายละเอียดและคุณสมบัติการเชื่อมต่อเบื้องต้น เช่น จำนวนจุดติดตั้ง จำนวนเส้นการเชื่อมต่อ หรือจำนวนจุดพิกัดทั้งหมดก่อนที่จะทำการประมวลผลในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 33 ตัวอย่างผลการเชื่อมต่อจุดข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์

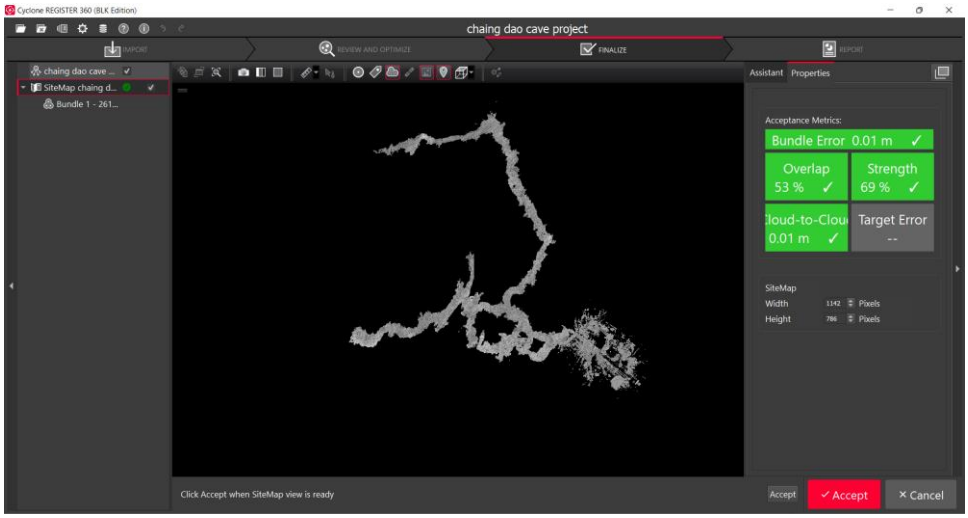


รูปที่ 34 ตัวอย่างผลการเชื่อมต่อจุดข้อมูลที่สมบูรณ์



รูปที่ 35 รายละเอียดกลุ่มของข้อมูลและการปรับค่าข้อมูล

(4) การสรุปและจัดรูปแบบข้อมูล (finalize) ในขั้นตอนการสรุปผลและจัดรูปแบบข้อมูลเป็นการตรวจสอบการรวมกลุ่มข้อมูล แสดงค่าความผิดพลาดโดยรวม การซ้อนทับของกลุ่มข้อมูลว่าผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบหรือไม่ โดยปกติแล้วสถานะการแสดงผลจากค่าความผิดพลาดจากน้อยไปหามากจะแสดงแถบสีเขียว เหลือง และแดง ตามลำดับความผิดพลาด เมื่อผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบจะสามารถกดยืนยันเพื่อไปยังกระบวนการรายงานผลในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 36 แสดงการสรุปและจัดรูปแบบข้อมูล

(5) การรายงานผล (report) ในขั้นตอนการรายผลงานจะเป็นเลือกแสดงคุณสมบัติของรายละเอียดข้อมูลสำหรับการรายงานผล และเลือกบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลของจุดพิกัด point cloud สำหรับการนำไปพัฒนาซอฟท์แวร์ระบบสร้างภาพแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริง ในขั้นตอนต่อไป

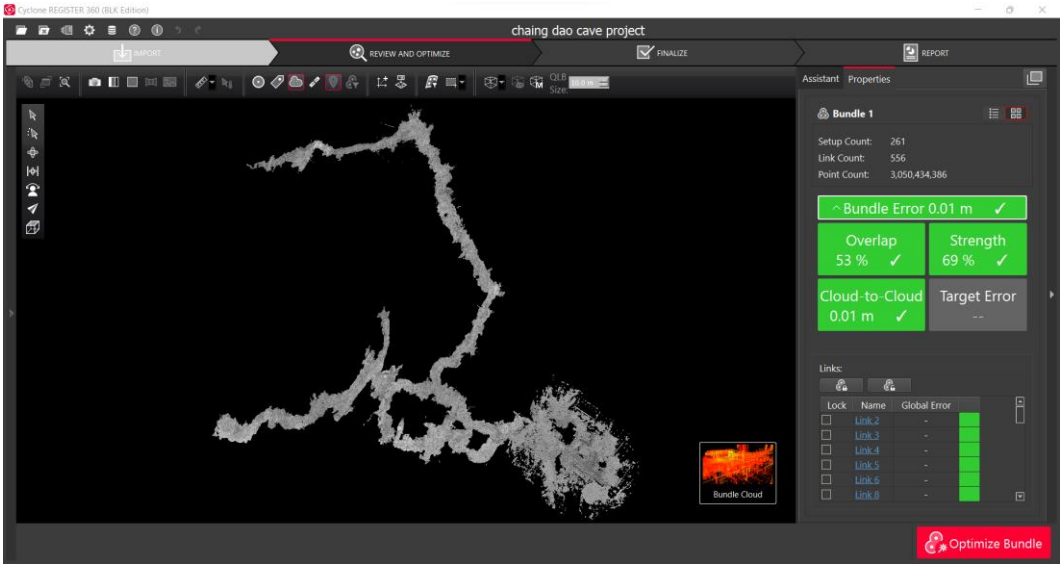
รูปที่ 37 การเลือกแสดงคุณสมบัติของรายละเอียดข้อมูลสำหรับการรายงานผล

รูปที่ 38 การเลือกบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลของจุดพิกัด Point Cloud

5.2 ผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำเชียงดาว

ผลการสำรวจและจัดทำแผนผังถ้ำแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ บริเวณถ้ำถ้ำเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ มีแนวเส้นทางในการสำรวจแบ่งออกเป็นจุดย่อยนะแต่ละเส้นทางดังนี้ ทางเข้าถ้ำจนถึงจุดแยก มีระยะทาง 100 เมตร เส้นทางถ้ำพระนอน - ถ้ำน้ำ มีระยะทาง 560 เมตร เส้นทางถ้ำม้า มีระยะทาง 500 เมตร และเส้นทางเชื่อมระหว่างปทางออกถ้ำแก้ว – ถ้ำพระนอน มีระยะทาง 100 เมตร สามารถดำเนินการได้ระยะทางรวมทั้งสิ้น 1,260 เมตร จากปากถ้ำถึงตลอดเส้นทางการสำรวจ ซึ่งสามารถนำข้อมูลออกมาแสดงผลได้หลายรูปแบบดังตัวอย่างใน ตารางที่ 1 โดยประกอบด้วยรายละเอียดข้อมูลดังนี้

- จุดอ่านข้อมูลทั้งสิ้น 261 จุดในระยะทาง 1,260 เมตร
- เส้นเชื่อมจุดอ่านข้อมูลรวม 556 เส้น
- จำนวนค่าจุดแสดงข้อมูลรวมทั้งสิ้น 3,050,434,386 จุด (ระดับความละเอียดในการสแกนระดับกลาง)
- ค่าความคลาดเคลื่อนการเชื่อมต่อกลุ่มข้อมูล 0.01 เมตร
- การทับซ้อนของข้อมูล 53%
- ความแข็งแรงของข้อมูล 69%
- การเชื่อมต่อแต่ละจุดข้อมูล 0.01 เมตร
- ค่าความคลาดเคลื่อนของเป้าพิกัด (ไม่แสดงผลเพราะใช้การเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด)
- สามารถเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังได้ 5 รูปแบบ
- สามารถเลือกนำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติได้ หรือเป็นภาพตัดขวางได้ 3 แกน
- สามารถเลือกรูปแบบการเข้าถึงข้อมูลในแถบการนำทาง ในรูปแบบต่าง ๆ ได้
- สามารถนำเสนอในรูปแบบของรายงาน (ภาคผนวก ข)



รูปที่ 39 ตัวอย่างภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำตลอดแนวการสำรวจ ณ ถ้ำเชียงดาว

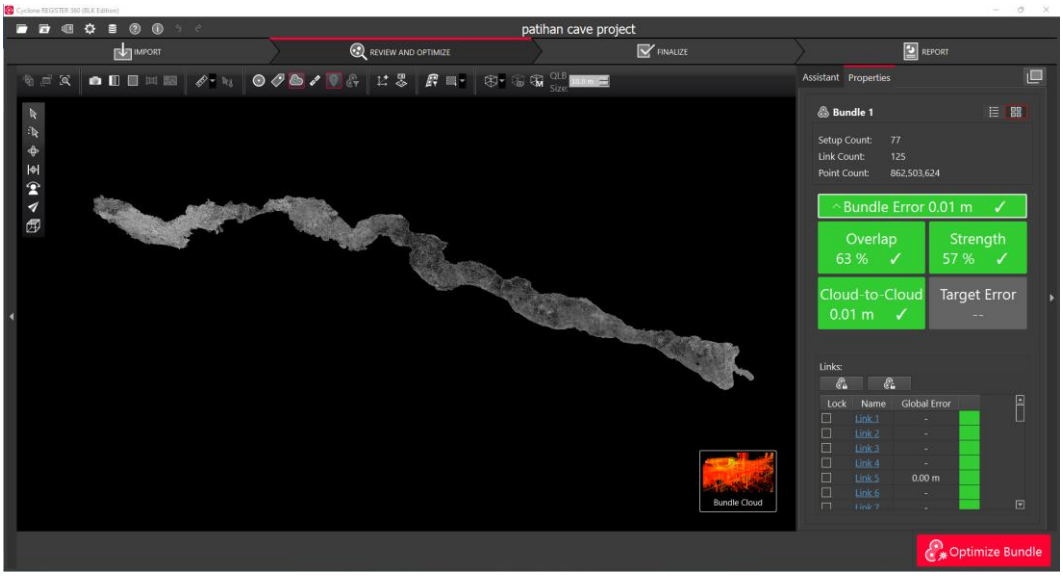
5.3 ผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

ผลการสำรวจและจัดทำแผนผังถ้ำแบบ 3 มิติ ด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ บริเวณถ้ำปาฏิหาริย์ อำเภอโขงเจียม อุบลราชธานี สามารถดำเนินการสำรวจได้ระยะทางรวมทั้งสิ้น 450 เมตร จากปากถ้ำถึงตลอดเส้นทางการสำรวจ ซึ่งสามารถนำข้อมูลออกมาแสดงผลได้หลายรูปแบบ โดยประกอบด้วยรายละเอียดข้อมูลดังนี้

- จุดอ่านข้อมูลทั้งสิ้น 77 จุดในระยะทาง 450 เมตร
- เส้นเชื่อมจุดอ่านข้อมูลรวม 125 เส้น
- จำนวนค่าจุดแสดงข้อมูลรวมทั้งสิ้น 862,503,624 จุด

(ระดับความละเอียดในการสแกนระดับกลาง)

- ค่าความคลาดเคลื่อนการเชื่อมต่อกลุ่มข้อมูล 0.01 เมตร
- การทับซ้อนของข้อมูล 63%
- ความแข็งแรงของข้อมูล 57%
- การเชื่อมต่อแต่ละจุดข้อมูล 0.01 เมตร
- ค่าความคลาดเคลื่อนของเป้าพิกัด (ไม่แสดงผลเพราะใช้การเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด)
- สามารถเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังได้ 5 รูปแบบ
- สามารถเลือกนำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติได้ หรือเป็นภาพตัดขวางได้ 3 แกน
- สามารถเลือกรูปแบบการเข้าถึงข้อมูลในแถบการนำทาง ในรูปแบบต่าง ๆ ได้
- สามารถนำเสนอในรูปแบบของรายงาน (ภาคผนวก ค)

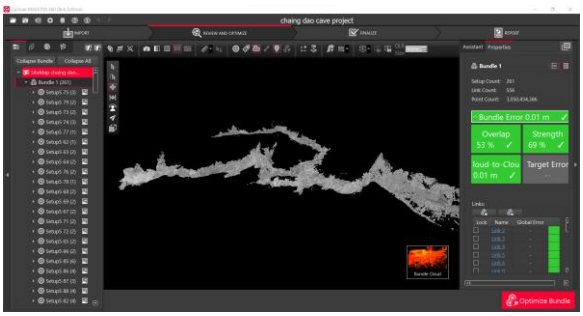
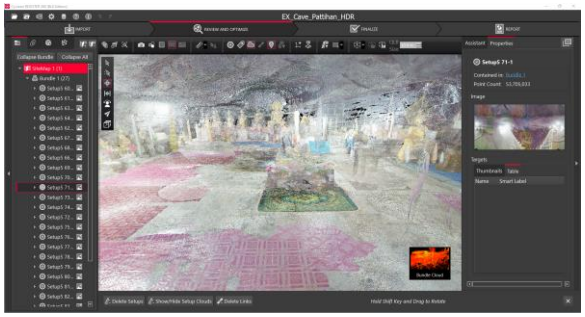
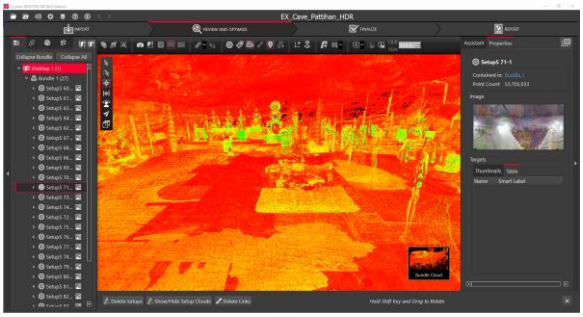


รูปที่ 40 แสดงภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำตลอดแนวการสำรวจ ณ ถ้ำเชียงดาว ถ้ำปาฏิหาริย์

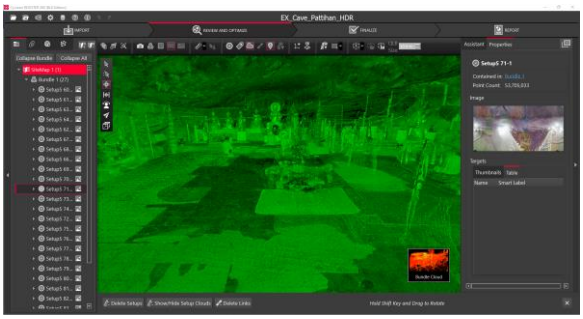
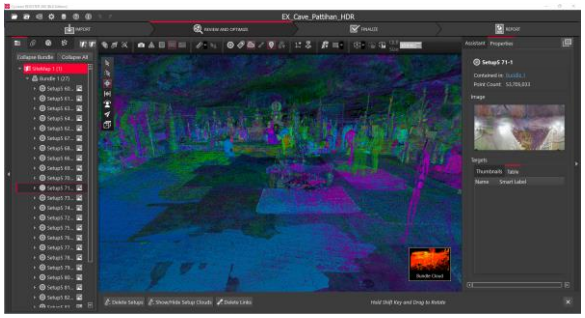
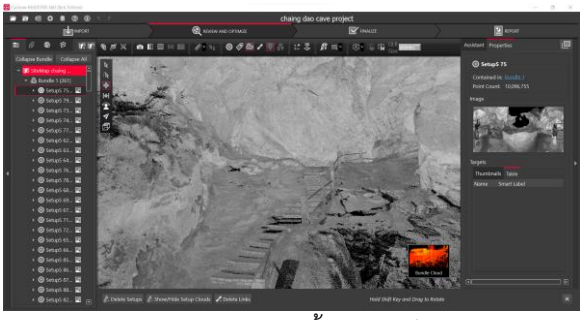
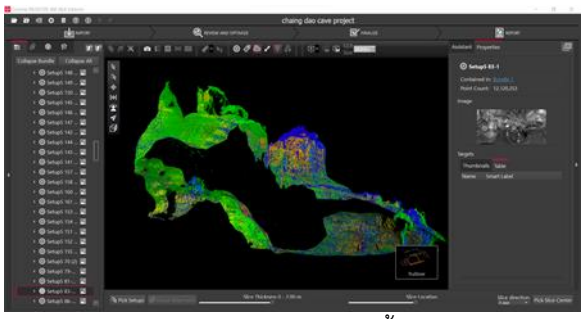
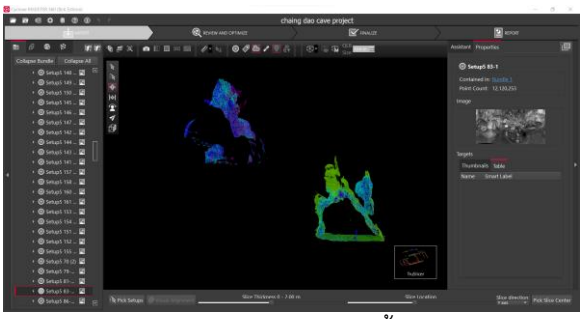
5.4 การแสดงรายละเอียดผลการสำรวจ

สามารถเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังถ้ำได้หลายรูปแบบ สามารถอธิบายตัวอย่างการนำเสนอดังตารางที่ 1

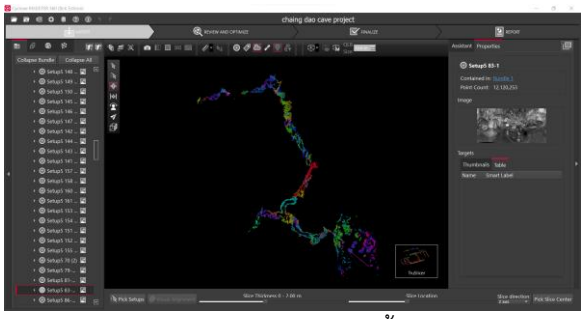
ตารางที่ 1 รายละเอียดผลการสำรวจ

1. สามารถแสดงจุดวางเครื่องอ่านข้อมูล	 2. สามารถปรับทิศทางการแสดงโครงสร้างผัง
 3. สามารถนำจุดอ่านข้อมูลออกและเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังรูปแบบ Color from Scanner	 4. สามารถนำจุดอ่านข้อมูลออกและเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังรูปแบบ Hue/Intensity Map

ตารางที่ 1 รายละเอียดผลการสำรวจ (ต่อ)

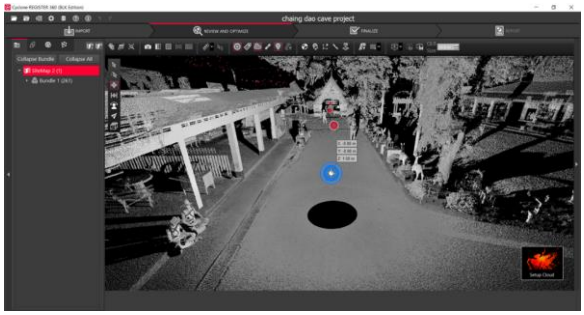
5. สามารถนำจุดอ่านข้อมูลออกและเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังรูปแบบ Gray Scale Intensity Map	 6. สามารถนำจุดอ่านข้อมูลออกและเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังรูปแบบ Color by Bundle
 6. สามารถนำจุดอ่านข้อมูลออกและเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังรูปแบบ Color by Setup	 7. สามารถดูรายละเอียดภายในถ้ำแต่ละจุดได้
9. สามารถตรวจสอบค่าพิกัดตามตำแหน่งที่ต้องการได้	10. สามารถตรวจสอบค่าความสูงภายในถ้ำในจุดที่ต้องการทราบค่าได้
 11. สามารถเลือกนำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติเป็นภาพตัดขวางในแนวแกน X	 12. สามารถเลือกนำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติเป็นภาพตัดขวางในแนวแกน Y

ตารางที่ 1 รายละเอียดผลการสำรวจ (ต่อ)

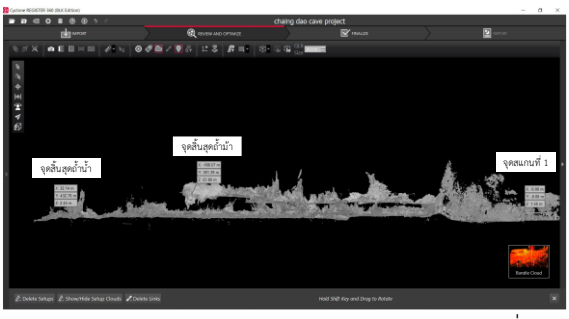


13. สามารถเลือกนำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติเป็นภาพตัดขวางในแนวแกน Z

14. นำเสนอในรูปแบบผังถ้ำแบบระบบนำทางโหมดการบิน



15. สามารถแสดงค่าพิกัด (x, y, z) ตำแหน่งจุดสแกน



16. สามารถนำเสนอการเปรียบระดับความสูง ณ จุดที่สนใจ

5.5 การแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ จากตารางการแสดงรายละเอียดผลการสำรวจข้างต้น โปรแกรมสามารถตรวจสอบค่าพิกัด (x, y, z) ตามตำแหน่งจุดที่สแกนได้ ดังตารางที่ 1 ข้อที่ 15 ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจะต้องกำหนดพิกัดตำแหน่งอ้างอิง ณ จุดสแกนตำแหน่งแรก โดยนำพิกัดตำแหน่งค่าอ้างอิงที่ถูกบันทึกจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในรูปแบบระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็มและความสูงจากระดับน้ำทะเล และนำพิกัดตำแหน่งอ้างอิงที่ได้นั้น มาทำการระบุลงในฟังก์ชัน UCS (User Co-ordinate System) ของโปรแกรม Cyclone REGISTER 360 เมื่อได้พิกัดจากจุดอ้างอิงจุดแรกแล้ว จึงเริ่มดำเนินการกำหนดตำแหน่งตามแนวเส้นทางการสำรวจภายในถ้ำจนถึงจุดสิ้นสุด และทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุล .txt และจากการทดสอบข้อมูลเบื้องต้น ทางผู้วิจัยได้แปลงข้อมูลระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็มเป็นระบบพิกัดภูมิศาสตร์และแสดงผลการทดสอบการแปลงค่าที่ได้ตามตารางและกราฟ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำเชียงดาว บริเวณทางเข้า - ถ้ำพระนอน - ถ้ำน้ำ

ตำแหน่งที่	พิกัดทางตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
จุดอ้างอิง	492470.554	2144400.255	427.511	19.39377253	98.92828562
1	492463.501	2144405.508	427.436	19.39382228	98.92822371
2	492455.338	2144411.625	427.324	19.39387753	98.92814594
3	492446.804	2144418.699	427.201	19.39394143	98.92806463
4	492438.797	2144425.448	428.670	19.39400239	98.92798835
5	492430.848	2144431.130	430.875	19.39405372	98.92791263
6	492423.443	2144436.687	433.932	19.39410391	98.92784208
7	492419.686	2144439.605	435.825	19.39413026	98.92780628

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
8	492415.446	2144442.686	436.176	19.39415809	98.92776589
9	492411.303	2144444.775	434.493	19.39417695	98.92772642
10	492407.468	2144445.459	434.366	19.39418312	98.9276899
11	492405.208	2144443.064	434.358	19.39416147	98.92766839
12	492402.992	2144440.280	433.737	19.39413629	98.92764729
13	492398.281	2144437.897	433.493	19.39411474	98.92760243
14	492394.816	2144435.869	433.374	19.39409641	98.92756944
15	492388.626	2144434.573	431.320	19.39408466	98.92751049

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำเชียงดาว บริเวณถ้ำพระนอน - ถ้ำน้ำ

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
จุดอ้างอิงจากทางเข้า	492378.204	2144432.411	431.245	19.39406509	98.92741125
17	492372.668	2144435.215	431.639	19.39409041	98.92735851
18	492369.199	2144436.263	431.819	19.39409987	98.92732547
19	492359.030	2144438.209	431.865	19.39411742	98.92722861
20	492352.848	2144445.740	431.997	19.39418545	98.92716971
21	492346.727	2144449.615	432.840	19.39422044	98.9271114
22	492345.060	2144454.808	432.500	19.39426737	98.92709549
23	492344.009	2144463.417	431.721	19.39434517	98.92708545
24	492333.790	2144467.712	431.577	19.39438395	98.92698811
25	492327.642	2144468.553	431.940	19.39439152	98.92692956
26	492323.679	2144473.848	428.763	19.39443936	98.92689179
27	492323.077	2144483.739	431.406	19.39452874	98.92688602
28	492324.376	2144493.729	431.769	19.39461904	98.92689835
29	492330.306	2144500.721	431.761	19.39468225	98.9269548
30	492339.642	2144504.445	431.863	19.39471593	98.9270437
31	492345.617	2144512.744	430.480	19.39479096	98.92710057
32	492350.527	2144514.133	431.439	19.39480353	98.92714732
33	492354.147	2144516.898	431.895	19.39482853	98.92718179
34	492358.946	2144521.042	432.097	19.394866	98.92722748
35	492359.684	2144524.585	431.949	19.39489802	98.92723449
36	492363.466	2144534.030	432.114	19.3949834	98.92727048
37	492365.313	2144538.928	430.755	19.39502766	98.92728805
38	492366.838	2144543.398	430.522	19.39506807	98.92730255
39	492368.074	2144548.673	430.490	19.39511575	98.9273143
40	492370.641	2144552.462	431.255	19.39515	98.92733874
41	492371.722	2144555.190	431.082	19.39517466	98.92734902
42	492374.324	2144561.579	431.451	19.3952324	98.92737377

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
43	492378.928	2144566.549	430.155	19.39527734	98.92741761
44	492379.780	2144569.723	430.646	19.39530602	98.9274257
45	492376.636	2144574.226	430.119	19.3953467	98.92739574
46	492373.903	2144579.149	430.611	19.39539119	98.9273697
47	492370.370	2144588.447	430.830	19.3954752	98.92733601
48	492365.813	2144596.187	429.957	19.39554513	98.92729258
49	492363.282	2144602.530	430.410	19.39560245	98.92726845
50	492359.520	2144605.190	432.489	19.39562647	98.92723261
51	492358.657	2144608.664	432.094	19.39565786	98.92722438
52	492356.521	2144612.876	430.365	19.39569592	98.92720401
53	492355.995	2144621.770	429.852	19.3957763	98.92719897
54	492352.951	2144624.215	429.921	19.39579838	98.92716997
55	492347.969	2144628.318	431.633	19.39583545	98.9271225
56	492339.806	2144636.161	429.757	19.39590629	98.92704472
57	492339.628	2144647.318	430.104	19.39600712	98.92704299
58	492337.732	2144651.199	429.745	19.39604219	98.92702492
59	492333.077	2144654.785	429.795	19.39607458	98.92698057
60	492330.382	2144659.268	429.928	19.39611508	98.92695488
61	492328.525	2144664.488	430.071	19.39616225	98.92693718
62	492327.378	2144671.213	430.242	19.39622302	98.92692622
63	492328.956	2144674.790	430.719	19.39625535	98.92694124
64	492329.795	2144678.181	430.529	19.396286	98.92694921
65	492329.307	2144682.121	430.679	19.3963216	98.92694455
66	492328.281	2144689.449	429.575	19.39638783	98.92693474
67	492323.879	2144692.399	430.611	19.39641447	98.92689282
68	492323.221	2144696.625	431.333	19.39645265	98.92688652
69	492320.578	2144701.574	431.045	19.39649738	98.92686134
70	492317.184	2144709.721	430.721	19.39657099	98.92682898
71	492312.809	2144717.388	430.737	19.39664026	98.92678728
72	492310.031	2144728.013	432.466	19.39673627	98.92676078
73	492302.279	2144731.760	431.282	19.3967701	98.92668693
74	492296.467	2144732.929	430.974	19.39678065	98.92663158
75	492289.141	2144731.341	431.952	19.39676627	98.92656181
76	492288.936	2144726.919	430.790	19.3967263	98.92655987
77	492285.672	2144723.829	431.720	19.39669836	98.9265288
78	492279.423	2144720.022	431.773	19.39666394	98.9264693
79	492273.277	2144717.000	432.641	19.3966366	98.92641078
80	492265.715	2144715.931	431.292	19.39662691	98.92633876
81	492256.865	2144714.975	430.908	19.39661823	98.92625449
82	492246.247	2144714.371	430.935	19.39661273	98.92615336

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
83	492241.828	2144710.967	431.454	19.39658196	98.92611129
84	492236.524	2144712.248	430.699	19.39659351	98.92606076
85	492229.440	2144707.858	430.744	19.39655381	98.92599331
86	492226.105	2144709.506	430.021	19.39656869	98.92596155
87	492222.548	2144709.040	429.115	19.39656447	98.92592767
88	492217.090	2144711.774	429.879	19.39658916	98.92587568
89	492208.531	2144716.451	431.165	19.39663138	98.92579415
90	492202.464	2144716.498	430.273	19.39663179	98.92573637
91	492197.868	2144714.353	429.055	19.39661238	98.9256926
92	492194.476	2144710.253	429.305	19.39657532	98.92566031
93	492193.995	2144704.958	431.929	19.39652746	98.92565575
94	492187.554	2144702.165	433.647	19.3965022	98.92559442
95	492180.853	2144702.056	430.290	19.39650119	98.9255306
96	492175.904	2144704.299	430.078	19.39652144	98.92548346
97	492171.534	2144702.362	430.445	19.39650392	98.92544185
98	492166.830	2144699.680	430.383	19.39647966	98.92539705
99	492157.754	2144696.202	429.583	19.39644819	98.92531063
100	492153.141	2144696.402	428.478	19.39644998	98.92526669

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำเชียงดาว บริเวณถ้ำม้า

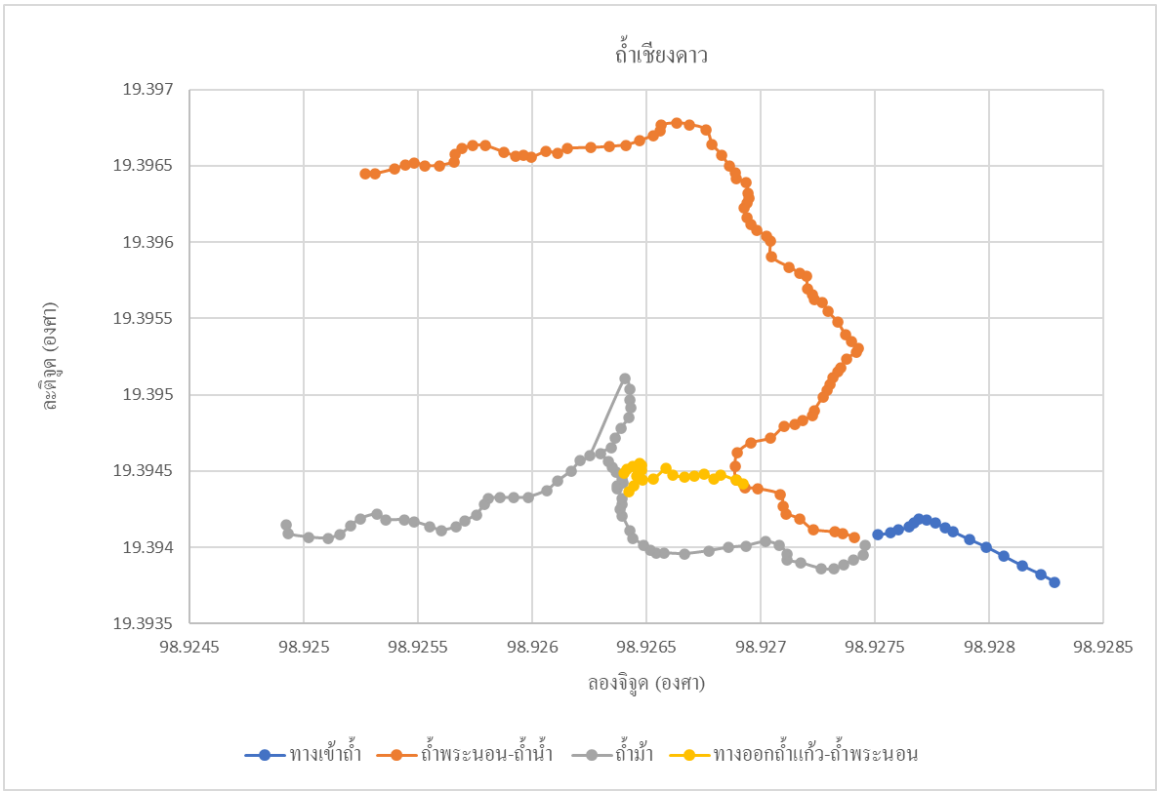
ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
จุดอ้างอิง จากทางเข้า	492383.029	2144427.049	431.607	19.39401665	98.92745722
17	492382.210	2144419.583	434.902	19.39394918	98.92744945
18	492377.549	2144415.915	437.390	19.393916	98.92740507
19	492373.283	2144412.820	440.184	19.39388802	98.92736446
20	492368.432	2144409.583	441.985	19.39385875	98.92731827
21	492362.598	2144409.825	442.658	19.39386092	98.9272627
22	492353.542	2144413.821	443.145	19.39389699	98.92717644
23	492346.999	2144415.971	444.358	19.3939164	98.92711411
24	492346.871	2144420.395	444.180	19.39395638	98.92711288
25	492343.530	2144426.379	445.277	19.39401044	98.92708104
26	492337.138	2144429.356	444.076	19.39403732	98.92702015
27	492328.134	2144426.364	444.131	19.39401025	98.92693441
28	492319.954	2144425.123	444.055	19.393999	98.92685651
29	492311.086	2144422.694	443.925	19.39397701	98.92677206
30	492300.023	2144420.570	445.049	19.39395778	98.92666671
31	492290.685	2144421.137	444.937	19.39396287	98.92657777
32	492286.773	2144420.939	444.867	19.39396107	98.92654052

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
33	492284.327	2144423.490	444.813	19.39398411	98.92651721
34	492281.281	2144426.584	443.605	19.39401205	98.92648819
35	492276.251	2144431.943	443.723	19.39406047	98.92644026
36	492274.727	2144437.239	443.623	19.39410832	98.92642573
37	492271.310	2144448.159	443.110	19.394207	98.92639313
38	492270.248	2144452.594	443.081	19.39424708	98.92638301
39	492271.439	2144456.802	442.795	19.39428511	98.92639433
40	492271.300	2144460.958	441.691	19.39432267	98.92639299
41	492268.921	2144467.616	442.901	19.39438283	98.92637031
42	492268.977	2144469.804	443.002	19.3944026	98.92637083
43	492271.697	2144471.937	443.136	19.39442189	98.92639673
44	492271.013	2144475.171	443.992	19.39445112	98.9263902
45	492268.580	2144479.485	444.255	19.39449009	98.92636702
46	492266.593	2144483.227	444.401	19.3945239	98.92634808
47	492264.876	2144487.781	444.504	19.39456505	98.92633171
48	492261.215	2144493.493	444.834	19.39461665	98.92629681
49	492266.187	2144497.415	444.861	19.39465212	98.92634414
50	492268.254	2144504.211	444.412	19.39471355	98.92636381
51	492270.789	2144511.866	444.213	19.39478274	98.92638792
52	492274.425	2144519.197	444.257	19.39484901	98.92642251
53	492275.284	2144526.434	444.143	19.39491441	98.92643067
54	492275.068	2144532.029	444.555	19.39496497	98.92642859
55	492274.870	2144539.563	444.244	19.39503306	98.92642668
56	492272.410	2144547.492	443.275	19.3951047	98.92640321
57	492256.290	2144491.548	444.970	19.39459906	98.92624991
58	492252.126	2144488.470	444.899	19.39457123	98.92621027
59	492247.857	2144480.706	444.835	19.39450104	98.92616965
60	492241.489	2144473.175	444.833	19.39443296	98.92610903
61	492236.555	2144466.597	444.809	19.39437349	98.92606206
62	492227.938	2144461.686	444.656	19.39432908	98.92598002
63	492221.314	2144461.288	445.091	19.39432545	98.92591693
64	492215.006	2144461.248	445.483	19.39432507	98.92585685
65	492209.796	2144460.687	445.989	19.39431998	98.92580724
66	492207.744	2144456.258	446.490	19.39427995	98.92578771
67	492204.251	2144449.016	447.904	19.39421449	98.92575448
68	492199.008	2144444.480	448.054	19.39417347	98.92570456
69	492194.992	2144440.206	448.371	19.39413483	98.92566633
70	492188.164	2144437.746	448.240	19.39411258	98.92560131
71	492182.865	2144440.479	449.810	19.39413725	98.92555083
72	492175.676	2144443.948	448.700	19.39416858	98.92548236

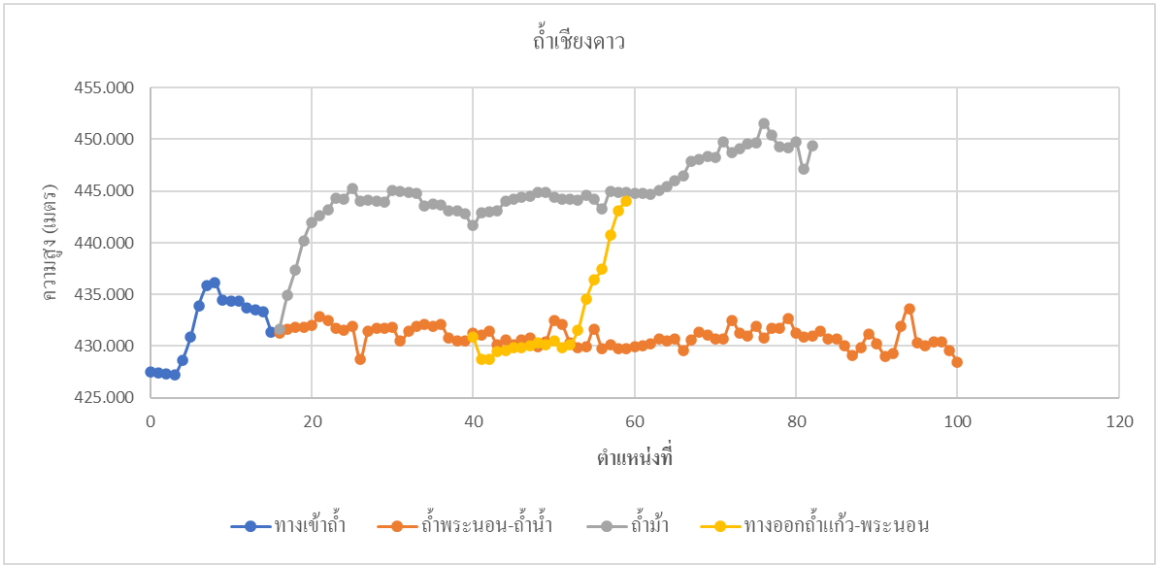
ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
73	492170.948	2144445.350	449.147	19.39418123	98.92543732
74	492162.661	2144445.302	449.614	19.39418075	98.92535839
75	492158.430	2144449.380	449.678	19.3942176	98.92531808
76	492150.793	2144445.920	451.573	19.3941863	98.92524536
77	492146.605	2144440.721	450.383	19.39413929	98.9252055
78	492141.709	2144434.863	449.341	19.39408633	98.9251589
79	492136.071	2144432.001	449.236	19.39406045	98.92510521
80	492127.122	2144432.728	449.788	19.39406698	98.92501998
81	492117.956	2144435.306	447.094	19.39409025	98.92493268
82	492117.035	2144441.576	449.409	19.39414691	98.92492387

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำเชียงดาว บริเวณทางออกถ้ำแก้ว - ถ้ำพระนอน

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
จุดอ้างอิงถ้ำแก้ว	492326.771	2144471.042	430.844	19.39441402	98.92692125
41	492323.679	2144473.848	428.763	19.39443936	98.92689179
42	492316.735	2144477.812	428.696	19.39447516	98.92682564
43	492313.593	2144475.159	429.453	19.39445116	98.92679572
44	492309.111	2144478.086	429.530	19.39447761	98.92675303
45	492304.344	2144476.674	429.821	19.39446482	98.92670763
46	492300.008	2144476.373	429.812	19.39446209	98.92666634
47	492294.429	2144477.822	430.004	19.39447516	98.9266132
48	492291.416	2144482.332	430.286	19.39451591	98.92658449
49	492285.599	2144475.027	430.091	19.39444986	98.92652912
50	492280.668	2144474.178	430.467	19.39444218	98.92648215
51	492276.457	2144469.983	429.827	19.39440425	98.92644207
52	492274.520	2144465.931	430.115	19.39436762	98.92642364
53	492278.132	2144477.003	431.582	19.39446769	98.926458
54	492280.036	2144481.397	434.532	19.39450742	98.92647611
55	492280.308	2144485.043	436.424	19.39454037	98.92647869
56	492279.222	2144486.274	437.475	19.39455148	98.92646834
57	492276.377	2144484.076	440.738	19.39453161	98.92644125
58	492273.651	2144482.145	443.079	19.39451415	98.9264153
59	492272.253	2144478.916	444.060	19.39448497	98.92640199



รูปที่ 41 กราฟแสดงผลการแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำเชียงดาว

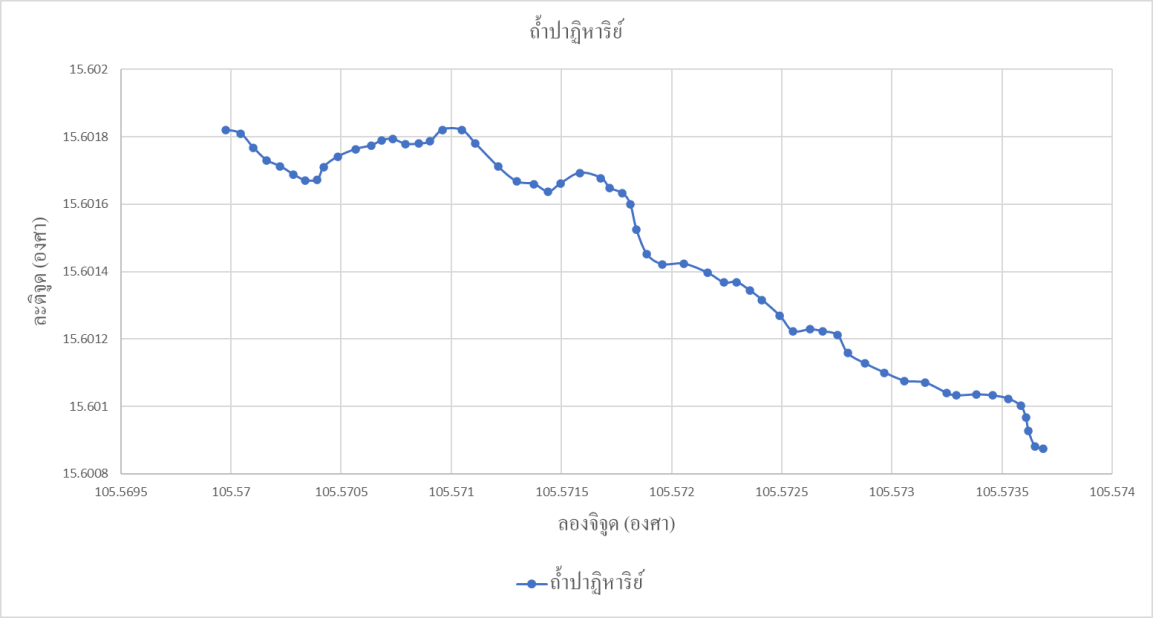


รูปที่ 42 กราฟแสดงระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล ณ ถ้ำเชียงดาว

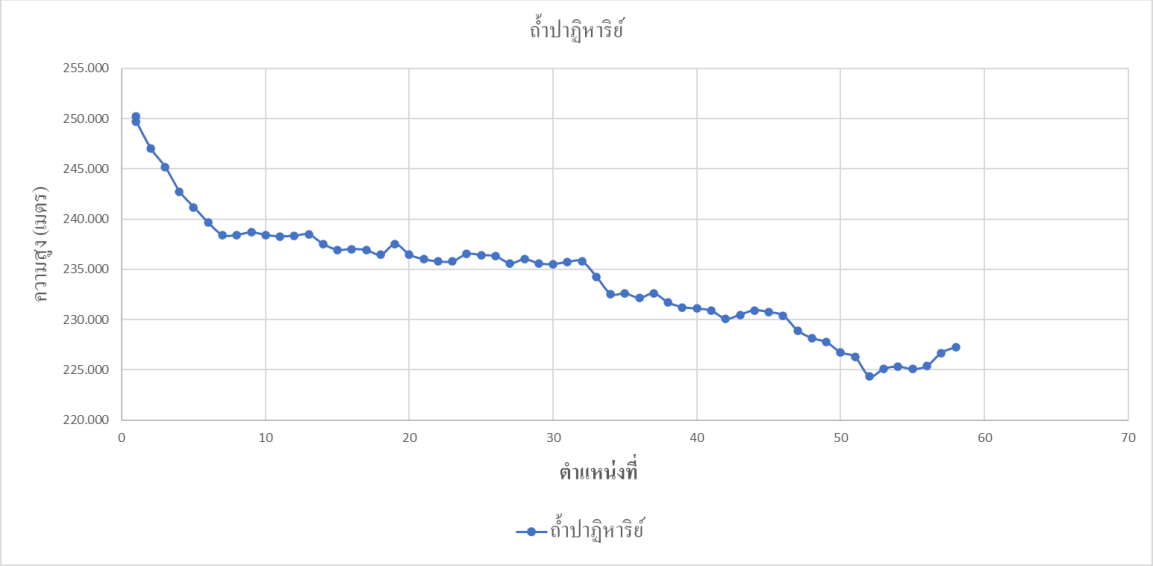
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับ น้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
จุดอ้างอิง	561501.002	1724870.000	250.200	15.60087497	105.5736878
1	561496.810	1724870.719	249.735	15.60088156	105.5736487
2	561493.636	1724875.737	247.049	15.60092701	105.5736192
3	561492.388	1724880.036	245.204	15.6009659	105.5736077
4	561489.880	1724883.973	242.757	15.60100155	105.5735844
5	561483.714	1724886.318	241.189	15.6010229	105.5735269
6	561476.311	1724887.337	239.649	15.6010323	105.5734579
7	561468.228	1724887.632	238.412	15.60103516	105.5733825
8	561458.393	1724887.295	238.437	15.60103235	105.5732907
9	561453.680	1724888.156	238.694	15.60104025	105.5732468
10	561443.269	1724891.477	238.423	15.60107053	105.5731498
11	561433.402	1724892.027	238.286	15.60107574	105.5730577
12	561423.551	1724894.693	238.352	15.60110008	105.5729659
13	561413.928	1724897.708	238.469	15.60112757	105.5728762
14	561405.608	1724901.017	237.509	15.60115768	105.5727987
15	561400.642	1724906.886	236.948	15.60121086	105.5727525
16	561393.545	1724908.161	237.032	15.60122257	105.5726864
17	561387.230	1724908.784	236.911	15.60122835	105.5726275
18	561378.856	1724908.190	236.459	15.60122318	105.5725494
19	561372.665	1724913.127	237.512	15.60126797	105.5724917
20	561363.833	1724918.436	236.463	15.60131617	105.5724095
21	561357.874	1724921.497	236.001	15.60134399	105.572354
22	561351.404	1724924.243	235.790	15.60136897	105.5722937
23	561345.376	1724924.012	235.798	15.60136703	105.5722375
24	561337.509	1724927.170	236.535	15.60139577	105.5721642
25	561325.896	1724930.134	236.417	15.60142285	105.5720559
26	561315.216	1724929.977	236.300	15.60142169	105.5719563
27	561307.879	1724933.189	235.596	15.6014509	105.5718879
28	561302.736	1724941.236	236.010	15.60152377	105.5718401
29	561299.734	1724949.533	235.588	15.60159886	105.5718124
30	561295.973	1724953.139	235.524	15.60163154	105.5717774
31	561289.623	1724954.965	235.732	15.60164821	105.5717182
32	561285.365	1724958.214	235.795	15.60167769	105.5716785
33	561275.114	1724959.839	234.274	15.60169262	105.571583
34	561265.836	1724956.374	232.554	15.60166152	105.5714963
35	561259.738	1724953.633	232.611	15.60163689	105.5714394
36	561252.730	1724956.129	232.147	15.60165963	105.5713741
37	561244.404	1724956.916	232.602	15.60166694	105.5712964
38	561235.295	1724961.768	231.686	15.60171103	105.5712116

ตำแหน่งที่	พิกัดทาง ตะวันออก (เมตร)	พิกัดทางเหนือ (เมตร)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ละติจูด (องศา)	ลองจิจูด (องศา)
39	561224.219	1724969.363	231.231	15.60177996	105.5711085
40	561217.663	1724973.721	231.086	15.60181951	105.5710474
41	561208.372	1724973.856	230.879	15.60182096	105.5709608
42	561202.207	1724969.951	230.074	15.60178581	105.5709032
43	561196.788	1724969.208	230.482	15.60177922	105.5708526
44	561190.312	1724969.067	230.928	15.6017781	105.5707922
45	561184.067	1724970.664	230.738	15.60179269	105.570734
46	561178.755	1724970.250	230.394	15.60178908	105.5706844
47	561173.596	1724968.549	228.907	15.60177383	105.5706362
48	561166.143	1724967.359	228.152	15.60176325	105.5705667
49	561157.250	1724964.830	227.746	15.6017406	105.5704837
50	561150.391	1724961.388	226.721	15.60170964	105.5704196
51	561147.436	1724957.335	226.257	15.60167308	105.570392
52	561141.329	1724957.097	224.342	15.60167107	105.570335
53	561135.623	1724958.991	225.088	15.60168834	105.5702818
54	561129.390	1724961.566	225.313	15.60171177	105.5702237
55	561122.604	1724963.609	225.061	15.6017304	105.5701605
56	561116.143	1724967.728	225.377	15.60176779	105.5701003
57	561109.962	1724972.328	226.673	15.60180953	105.5700428
58	561102.960	1724973.515	227.255	15.60182042	105.5699775



รูปที่ 43 กราฟแสดงผลการแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์



รูปที่ 44 กราฟแสดงระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

5.6 การบันทึกข้อมูล point cloud วิธีการเผยแพร่ข้อมูล point cloud ของการใช้งานซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 (blk edition) สามารถส่งออกข้อมูลในรูปแบบไฟล์นามสกุลของจุดพิกัด point cloud มาตรฐานที่หลากหลายได้แก่ นามสกุล PTS PTG PTX E57 และ RCP ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้ ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกรูปแบบการส่งออกข้อมูลชนิดไฟล์นามสกุล E57 ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์ที่เป็นมาตรฐานกลางจัดเก็บข้อมูลแบบ point cloud เพื่อนำไปพัฒนาซอฟต์แวร์แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริง ในลำดับขั้นตอนต่อไป

5.7 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 (Blk edition) ที่ใช้สำหรับการลงทะเบียน (Registration) และต่อข้อมูลสแกน (point cloud) ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บชุดข้อมูลจากการสแกนภาพ 3 มิติ เพื่อใช้สำหรับสร้างภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำทั้งหมด 2 แห่ง ได้แก่ ถ้ำเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ และถ้ำปาฏิหาริย์ อำเภอโขงเจียม อุบลราชธานี จากผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ สามารถสรุปผลได้ดังนี้ ณ ถ้ำเชียงดาว สามารถแสดงผลจุดอ่านข้อมูลทั้งสิ้น 261 จุด มีเส้นเชื่อมจุดอ่านข้อมูลรวม 556 เส้น จำนวนค่าจุดแสดงข้อมูลรวมทั้งสิ้น 3,050,434,386 จุด และมีระยะทาง 1,260 เมตร และสถานที่สำรวจแห่งที่สอง ณ ถ้ำปาฏิหาริย์ สามารถแสดงผลจุดอ่านข้อมูลทั้งสิ้น 77 จุด มีเส้นเชื่อมจุดอ่านข้อมูลรวม 125 เส้น จำนวนค่าจุดแสดงข้อมูลรวมทั้งสิ้น 862,503,624 จุด และมีระยะทาง 445 เมตร จากผลการสำรวจถ้ำทั้งสองแห่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างจุดอ่านข้อมูลและจุดแสดงข้อมูลรวมที่ถ้ำเชียงดาวมีจำนวนมากกว่าถ้ำปาฏิหาริย์เนื่องจากขนาดของถ้ำและลักษณะพื้นในการสำรวจมีความซับซ้อนมากกว่า นอกจากผลสำรวจที่กล่าวมาในเบื้องต้นแล้วซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 (Blk edition) ยังสามารถเลือกรูปแบบการนำเสนอแผนผังถ้ำได้อีกหลายรูปแบบ เช่นแสดงรูปแบบผังถ้ำแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ แสดงจุดพิกัด (x, y, z) ณ ตำแหน่งที่สนใจ แสดงระยะห่างระหว่างจุดพิกัดหรือตำแหน่งที่สนใจ สามารถนำออกข้อมูลจุดพิกัด (x, y, z) เพื่อนำไปใช้สำหรับแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ และยังสามารถบันทึกข้อมูล point cloud เพื่อนำไปพัฒนาซอฟต์แวร์แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริง ในลำดับ

ขั้นตอนต่อไป หลังจากทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งานซอฟต์แวร์ตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการทำงาน สรุปได้ว่าซอฟต์แวร์มีหลักการทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน ในแต่ละขั้นตอนการทำงานยังมาพร้อมกับคำแนะนำจึงช่วยประหยัดเวลาและทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ดี ซอฟต์แวร์ดังกล่าวเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะที่ใช้งานกับเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360 การพิจารณาใช้งานซอฟต์แวร์จึงจำเป็นต้องพิจารณาจากการเลือกใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิตินั้น ๆ ประกอบด้วย สิ่งสำคัญคือการบันทึกข้อมูล point cloud ในรูปแบบมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้งานในซอฟต์แวร์ประมวลผลอื่น ๆ ได้ต่อไป

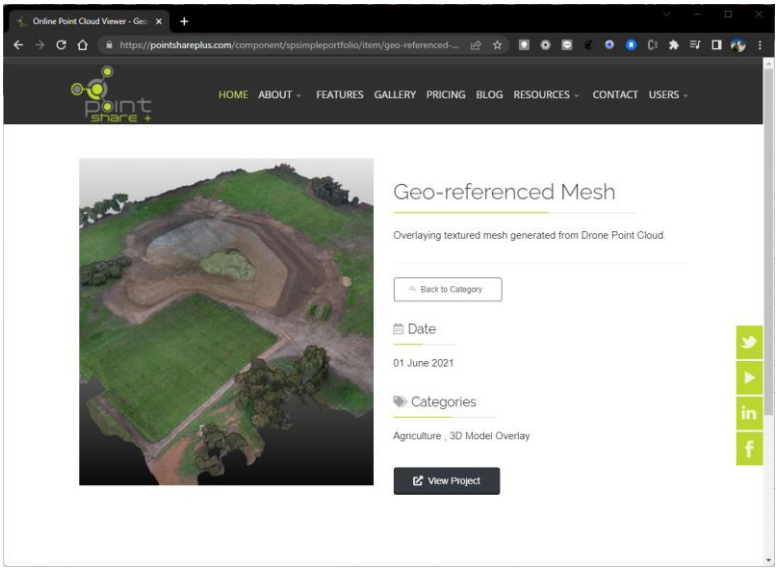
6. แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริง

จากการประมวลผลและสร้างภาพจำลองเสมือนจริงภายในถ้ำ ด้วยซอฟต์แวร์ Cyclone REGISTER 360 ในขั้นตอนก่อนหน้านั้น ทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงตลอดแนวโพรงถ้ำ ในขั้นตอนนี้เป็นการดำเนินการนำเสนอแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงด้วยซอฟต์แวร์ที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลจุดพิกัด (point cloud) ของโพรงถ้ำทั้ง 2 แห่ง ตามที่ได้ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลมาแล้ว โดยในส่วนของการประมวลผลหลักของซอฟต์แวร์เป็นการประมวลผลแบบคลาวด์ (cloud computing) ซึ่งเป็นการประมวลผลที่เครื่องแม่ข่ายผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต โดยที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงนี้ได้ ผ่านเว็บเบราเซอร์ (web browser) ที่ติดตั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเฉพาะทางเพิ่มแต่อย่างใด รายละเอียดในการพัฒนาแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงมีดังต่อไปนี้

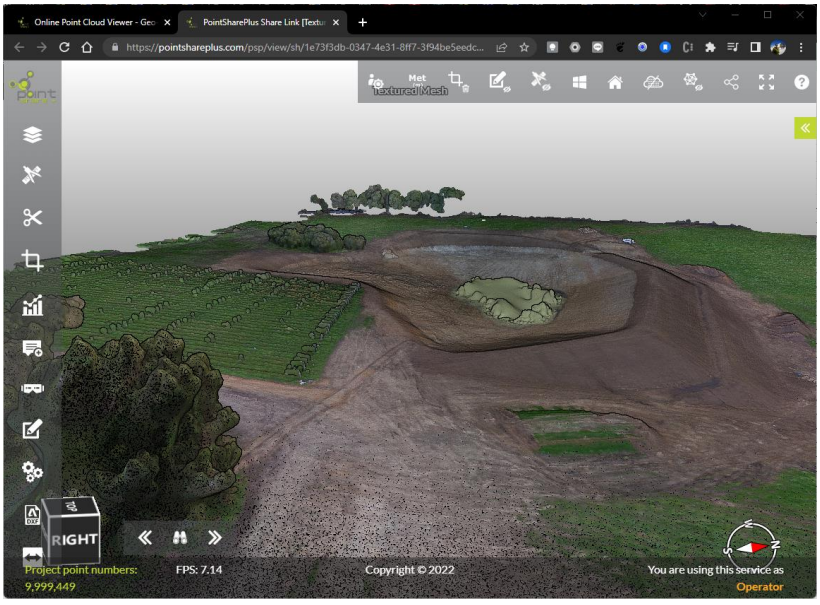
6.1 การพัฒนาซอฟต์แวร์แสดงผลแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริง

ซอฟต์แวร์แสดงผลหรือ viewer เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างข้อมูลถ้ำ 3 มิติ (ซึ่งอยู่ในรูปแบบ point cloud) กับผู้ใช้งาน (user) โดยทั่วไปแล้ว มีซอฟต์แวร์ viewer หลากหลายให้เลือกใช้งานเพื่อแสดงผลข้อมูล point cloud โดยมีทั้งแบบมีค่าใช้จ่ายและแบบไม่มีค่าใช้จ่าย ทั้งใช้งานแบบออนไลน์หรือแบบออฟไลน์ (local machine) การใช้งานแบบออนไลน์นั้นจะเป็นการให้บริการผ่านเว็บเบราเซอร์ ซึ่งมีทั้งแบบให้บริการจัดเก็บไฟล์ข้อมูลไว้บนแม่ข่าย และแบบแสดงผลโดยไม่มีการส่งผ่านข้อมูลผ่านอินเตอร์เน็ต (ข้อมูลจะถูกประมวลผลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และเบราเซอร์โดยตรง) ซอฟต์แวร์ viewer และบริการต่าง ๆ เหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียเช่น

- https://pointshareplus.com เป็นตัวอย่างบริการแบบออนไลน์สำหรับจัดเก็บข้อมูล point cloud ดูข้อมูลแบบ 3 มิติ วิเคราะห์และส่งต่อข้อมูลผ่านอินเตอร์เน็ต ดังตัวอย่างหน้าจอในรูปที่ 45 (รายละเอียดข้อมูล) และ 46 (3D viewer สำหรับข้อมูล point cloud)

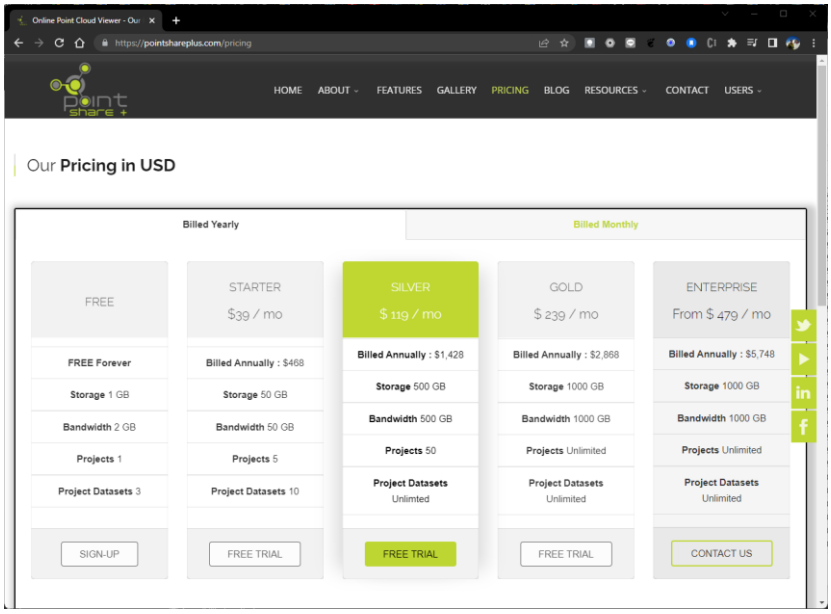


รูปที่ 45 ตัวอย่างข้อมูล point cloud บน https://pointshareplus.com



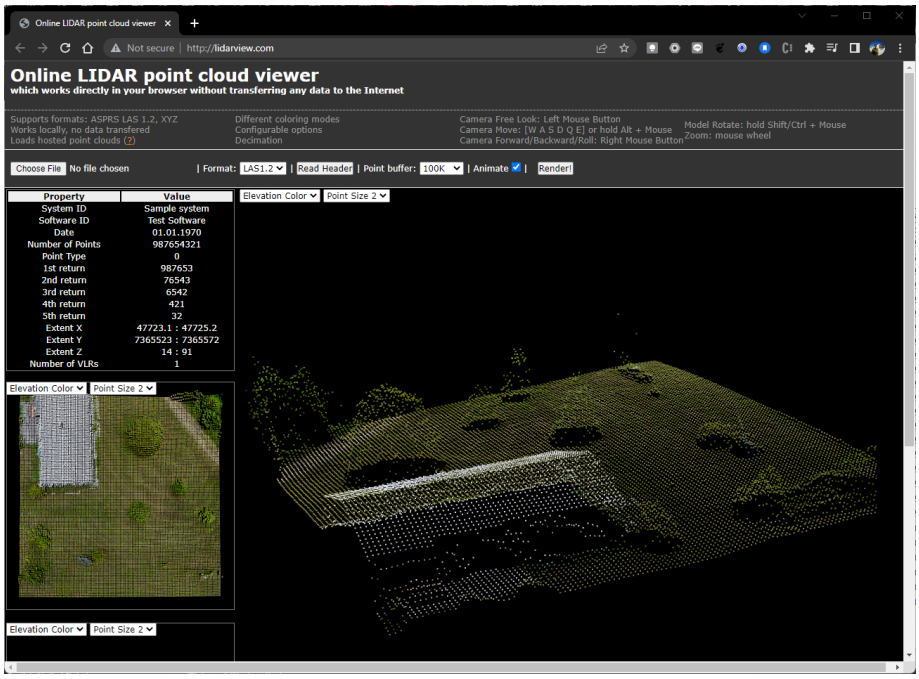
รูปที่ 46 การแสดงผลข้อมูล 3 มิติจาก point cloud ผ่านเว็บเบราเซอร์

ตัวอย่าง viewer จากผู้ให้บริการออนไลน์ข้างต้น สามารถเปิดไฟล์ข้อมูลที่มีการอัพโหลดไปไว้บนพื้นที่ของผู้ให้บริการ ผู้ใช้งานสามารถดู วิเคราะห์ ปรับแต่งข้อมูล point cloud ได้ด้วยการใช้งานจากเบราเซอร์พร้อมเครื่องมืออำนวยความสะดวกต่าง ๆ (ในที่นี้ใช้เบราเซอร์ Chrome) ถึงแม้ว่าบริการดังกล่าวจะมีส่วนให้ใช้งานได้ฟรี แต่ไม่สามารถรองรับงานที่ต้องการได้ เช่นจำนวนข้อมูลได้เพียง 3 ชุดข้อมูลต่อ project รวมไปถึงข้อมูลจัดเก็บได้เพียง 1GB นอกเหนือไปจากนี้แล้ว จะมีค่าใช้จ่ายทั้งรายเดือนหรือรายปี ดังตัวอย่างในรูปที่ 47



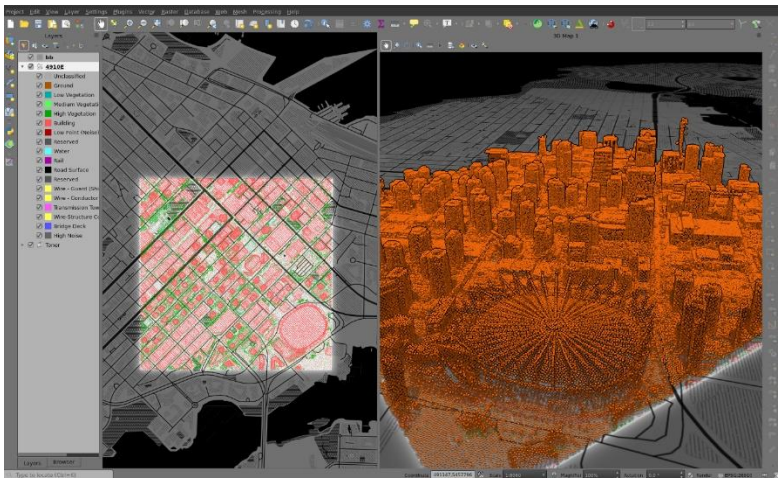
รูปที่ 47 ค่าใช้จ่ายในการใช้งาน https://pointshareplus.com

- http://lidarview.com เป็นตัวอย่างบริการ viewer แบบออนไลน์สำหรับข้อมูล point cloud โดยไม่มีการจัดเก็บข้อมูลไว้บนแม่ข่าย แต่เป็นการประมวลผลโดยตรงระหว่างเบราเซอร์กับข้อมูลที่จัดเก็บบนเครื่องของผู้ใช้งาน จึงไม่มีการส่งข้อมูลผ่านอินเตอร์เน็ตแต่อย่างใด บริการดังกล่าวรองรับไฟล์ point cloud ประเภท LAS 1.2 ดังตัวอย่างในรูปที่ 48 ถึงแม้ว่าบริการดังกล่าวจะไม่มีค่าใช้จ่าย แต่ผู้ใช้งานจำเป็นจะต้องมีไฟล์ข้อมูลอยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจจะไม่สะดวกในการร่วมใช้ข้อมูลระหว่างหลาย ๆ ผู้ใช้งาน



รูปที่ 48 http://lidarview.com บริการ point cloud viewer ฟรี

- QGIS 3 (https://qgis.org) คือซอฟต์แวร์ที่แบบ open source สำหรับดูข้อมูล 3 มิติจาก point cloud ซึ่งต้องมีการดาวน์โหลดและติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ โดย QGIS รองรับการติดตั้งใช้งานบนทุกระบบปฏิบัติการ ไม่ว่าจะเป็น Windows macOS Linux หรือ BSD รวมไปถึงแอพลิเคชันบนมือถือและแท็บเล็ต ตัวอย่างหน้าจอของ QGIS ในการแสดงผลข้อมูล point cloud แสดงในรูปที่ 49 ซอฟต์แวร์ลักษณะแบบ QGIS ต้องมีการติดตั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งาน และต้องมีไฟล์ข้อมูล point cloud อยู่ในเครื่องเพื่อสามารถแสดงผลข้อมูลได้ (QGIS มีตัวเลือกการดาวน์โหลดไฟล์จากอินเตอร์เน็ตได้โดยตรง)



รูปที่ 49 ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลข้อมูล point cloud บน QGIS (ที่มา https://opendata.vancouver.ca/explore/dataset/lidar-2018/information)

การออกแบบพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับแสดงผลแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงนั้น จำเป็นต้องพิจารณาจากคุณลักษณะที่ต้องการดังต่อไปนี้

- ไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้ ดังนั้นการใช้งานผ่านเว็บเบราเซอร์จึงมีความเหมาะสมในการนี้
- ไม่จำเป็นต้องมีไฟล์ข้อมูล point cloud จากเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์พกพาของผู้ใช้งาน ซึ่งปกติไฟล์ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่

ในโครงการวิจัยนี้จึงได้เลือกที่จะทำการพัฒนาระบบแสดงผลแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริง โดยใช้งานได้บนเว็บเบราเซอร์และเชื่อมต่อข้อมูล point cloud หรือข้อมูลแบบจำลองถ้ำ 3 มิติที่ได้จัดเก็บไว้บนเครื่องแม่ข่ายคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานเพียงเข้าไปยัง address ของข้อมูลแล้วสามารถดูแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงได้เลย ข้อมูลต่าง ๆ จะได้ถูกประมวลผล จัดเก็บและติดตั้งไว้บนเครื่องแม่ข่ายคอมพิวเตอร์โดยทีมวิจัย

6.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์ point cloud viewer

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ประยุกต์พัฒนาต่อยอดชุด library เรียกว่า Potree [10][11] เป็นซอฟต์แวร์ open source สำหรับแสดงผลข้อมูล point cloud ด้วยเทคโนโลยี WebGL (Web Graphics Library) เป็นการใช้ภาษา JavaScript ในการเขียนโปรแกรมบนเว็บไซต์ ซึ่งมี API (Application Programming Interface) มาช่วยในเรื่องของการแสดงผลกราฟิคแบบ 2 และ 3 มิติ ซึ่งจะทำงานบนเว็บเบราเซอร์ที่รองรับโดยเฉพาะ

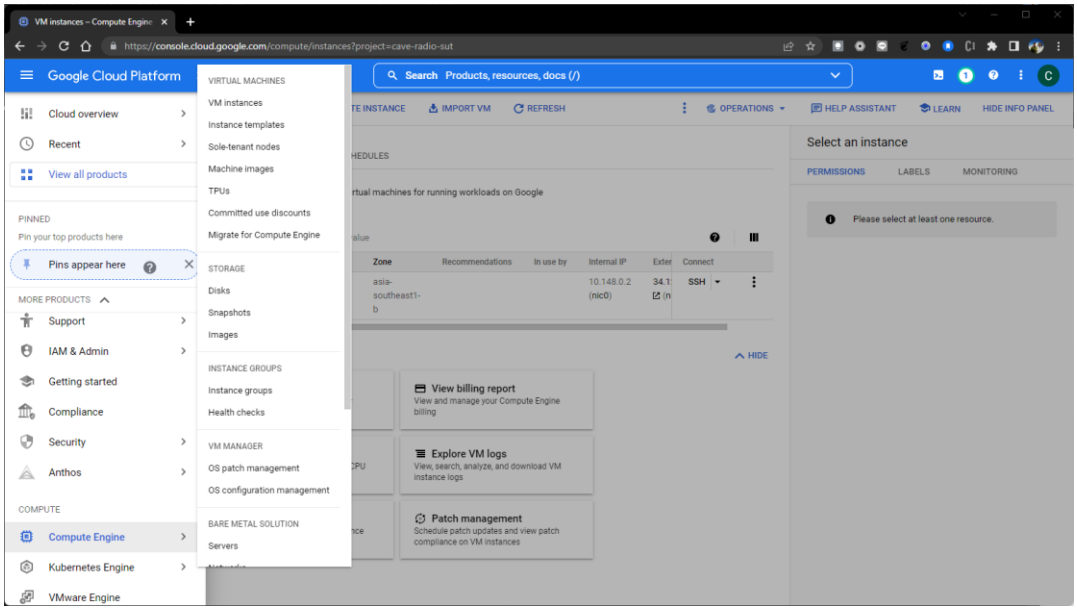
ทั้งนี้เราไม่จำเป็นต้องติดตั้ง plug-in เพิ่มเติมแต่อย่างใด (เนื่องจากเบราเซอร์รองรับภายในตัวเองอยู่แล้ว) เทคโนโลยี WebGL ยังช่วยให้เบราเซอร์ที่มีกราฟิคฮาร์ดแวร์ (GPU) มาประมวลผลแทนการใช้งาน CPU โดยตรง ทำให้การแสดงผลด้านกราฟิคมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เว็บเบราเซอร์ที่นิยมใช้ทั่วไปต่างรองรับเทคโนโลยี WebGL ดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็น Chrome Firebox Edge หรือ Safari ดังนั้น การเลือกพัฒนาซอฟต์แวร์ที่มีการแสดงผลกราฟิคบนเว็บเบราเซอร์ จึงควรพิจารณาใช้เทคโนโลยี WebGL งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาต่อยอดต้นรหัสซอฟต์แวร์ Potree [12] เพื่อใช้งานการแสดงผลข้อมูล point cloud สำหรับแบบจำลองถ้ำเสมือน 3 มิติดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.2.1 ติดตั้ง VM instance บน Google Cloud Platform (หรือ GCP) เพื่อใช้สำหรับเป็น web server โดยเข้าไปที่ https://console.cloud.google.com/ แล้ว sign in ด้วยบัญชีผู้ใช้งานของระบบจากงานวิจัยนี้

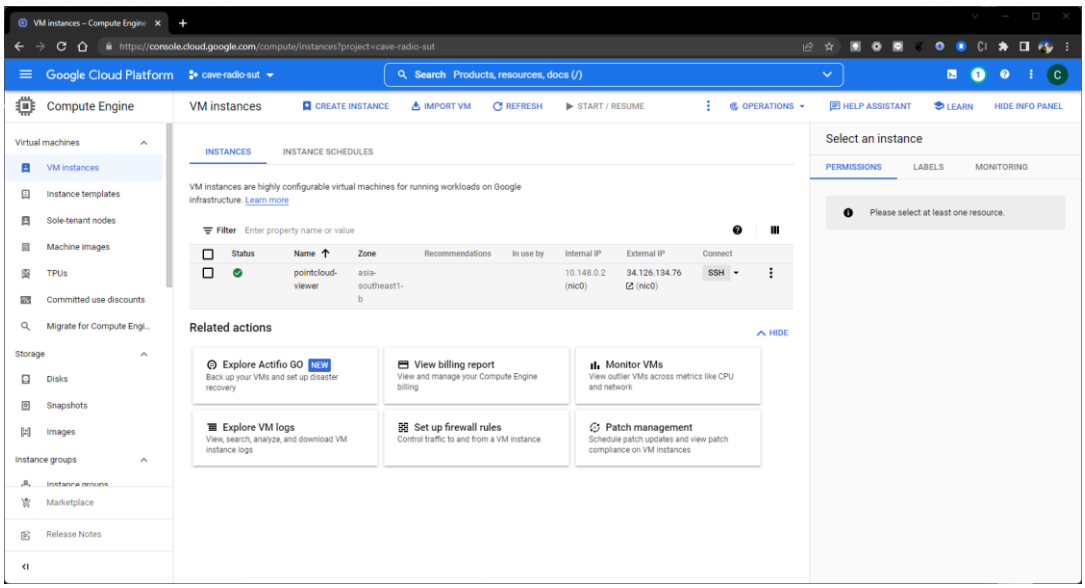
Username: cave.radio.sut@gmail.com

Password: crs@2020

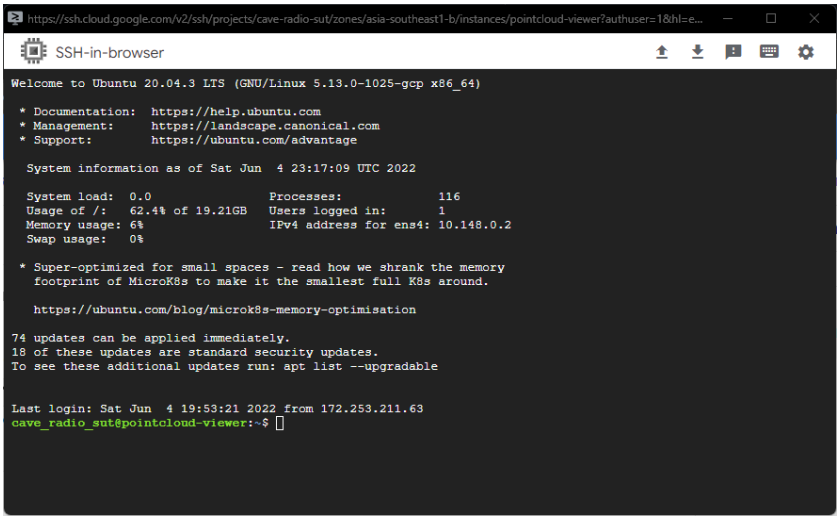
เข้าไปสู่ Console สำหรับจัดการระบบ cloud แล้วเลือกเมนูหลัก [COMPUTE] Compute Engine -> [VIRTUAL MACHINES] VM instances ดังรูปที่ 50 ทางโครงการวิจัยได้สร้างและติดตั้ง VM instance (หรือ Virtual Machine instance) ไว้เรียบร้อยแล้ว ภายใต้ project ชื่อว่า cave-radio-sut (เลือก project จากเมนู drop-down ที่มุมซ้ายบน ข้างหัวข้อ Google Cloud Platform) สำหรับรองรับระบบ point cloud viewer ในการเข้าจัดการ virtual machine ของระบบ ให้เลือก connect SSH ดังแสดงในรูปที่ 51 GCP จะเปิด terminal ไว้ให้สำหรับเชื่อมต่อทำงานกับ virtual machine ดังรูปที่ 52 VM ที่ทางโครงการวิจัยสร้างและติดตั้งนี้ ใช้ระบบปฏิบัติการเป็น Ubuntu รุ่น 20.04 (Focal) ติดตั้งอยู่บนฮาร์ดดิสก์แบบ SCSI ขนาด 20 GB รายละเอียดหรือ specification ของ VM จะมีค่าใช้จ่ายในการใช้งานแตกต่างกันไป



รูปที่ 50 หน้าจอ Google Cloud Platform สำหรับจัดการ VM instance หรือ Virtual Machine สำหรับเป็นแม่ข่ายรองรับ web server ของ point cloud viewer



รูปที่ 51 เลือก SSH สำหรับเปิด terminal เชื่อมต่อทำงานกับ virtual machine



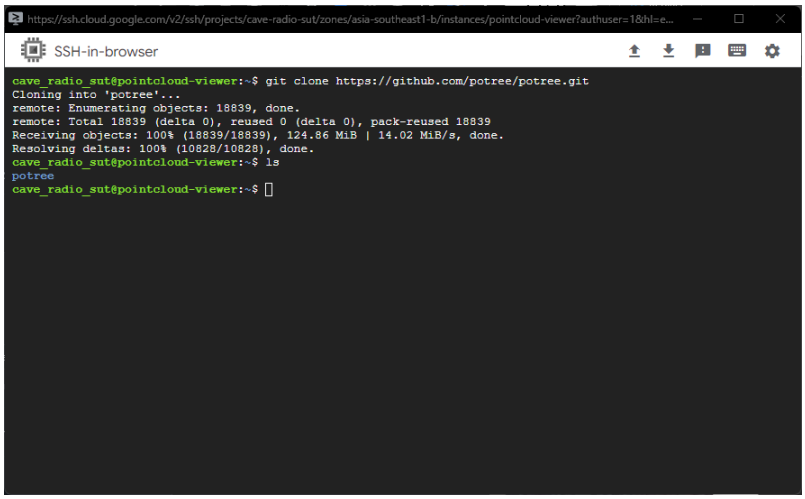
รูปที่ 52 terminal สำหรับเชื่อมต่อทำงานกับ virtual machine

6.2.2 ทำการติดตั้ง Apache Http Server เพื่อใช้เป็น web server ของซอฟต์แวร์ point cloud viewer โดยรายละเอียดการติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu สามารถดูได้จาก https://httpd.apache.org/

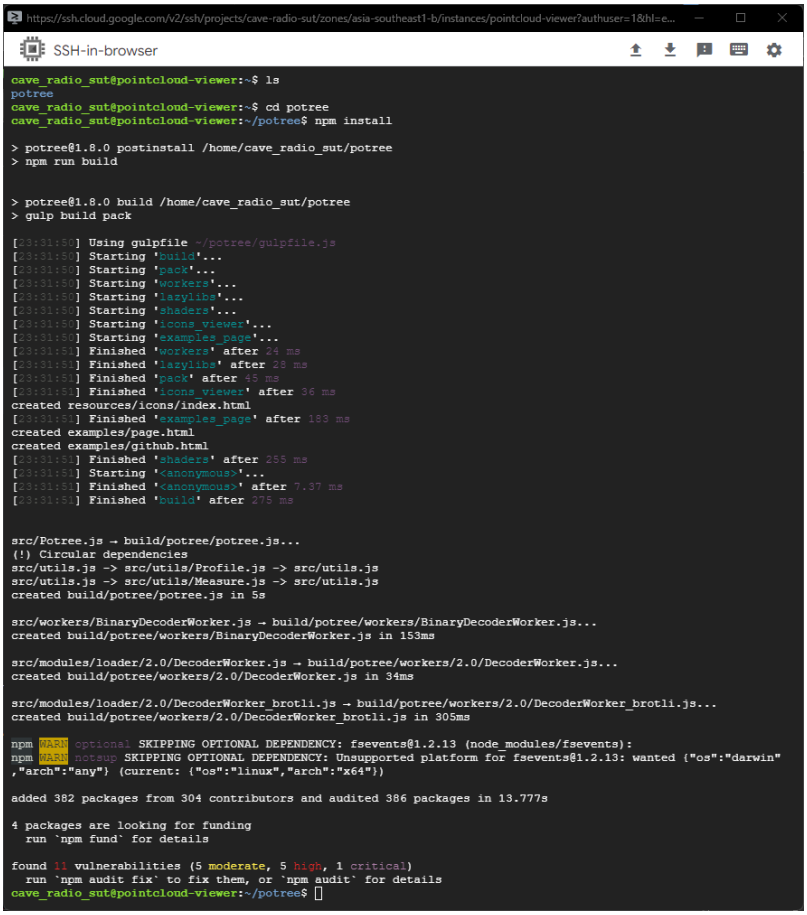
โดย address ที่สามารถเข้าถึง web server คือ http://34.126.134.76 (ดูได้จากหน้า console ของการจัดการ VM instance ของ GCP)

6.2.3 ทำการติดตั้ง node.js โดยการพัฒนาซอฟต์แวร์ point cloud viewer ใช้ JavaScript ในการเชื่อมต่อกับ library การแสดงผล รายละเอียดการติดตั้ง node.js บนระบบปฏิบัติการ Ubuntu สามารถดูได้จาก https://nodejs.org

6.2.3 จาก terminal ทำการโคลน Potree library จาก https://github.com/potree/potree ดังคำสั่งแสดงในรูปที่ 53 แล้วทำการติดตั้ง JavaScript modules ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ Potree ด้วยคำสั่งแสดงในรูปที่ 54



รูปที่ 53 การโคลน library ของ Potree

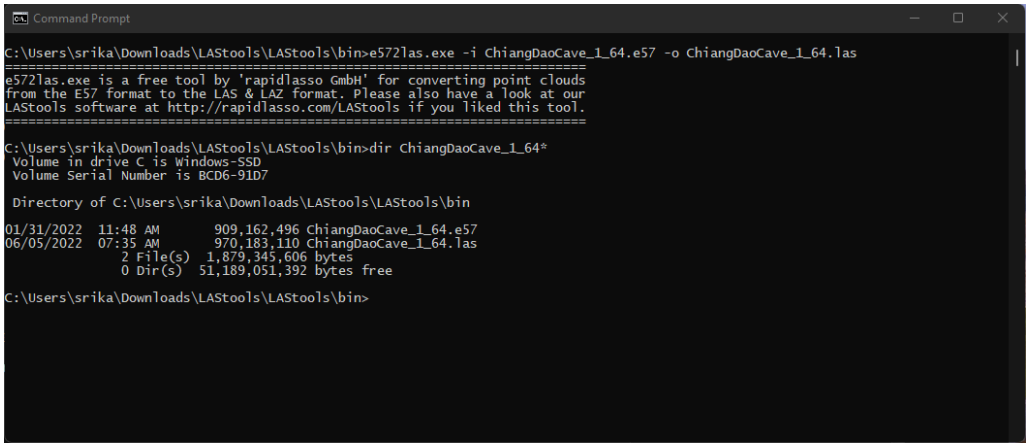


รูปที่ 54 การติดตั้ง JavaScript modules สำหรับ library Potree

6.2.4 ทำการ build ส่วน library ของ Potree โดยเข้าไปที่ไดเรกทอรี potree แล้วเรียกคำสั่ง npm start ระบบจะทำการสร้าง ./build/potree และทำการ build ต้นรหัสใหม่ หลังจากนี้เราจะได้ library ของ Potree ที่สามารถแสดงผลข้อมูล point cloud ได้ ให้ทำการย้ายไดเรกทอรีทั้งหมดที่ได้ build แล้วไปไว้ที่ไดเร็กทอรีของ Apache Http server เพื่อให้สามารถเข้าถึง point cloud viewer ได้จากเว็บเบราเซอร์ผ่านอินเตอร์เน็ต โดยไดเรกทอรีสำหรับใช้เป็น web server จะอยู่ที่ /var/www/html ในโครงการวิจัยนี้ สร้างไดเร็กทอรี cave_radio ไว้สำหรับ host ไฟล์ของ point cloud viewer ซึ่งจะปรากฏเป็น address สำหรับเข้าถึงเว็บไซต์ของ point cloud viewer คือ http://34.126.134.76/cave_radio/ โดยไฟล์ต่าง ๆ ที่จะได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้น จะถูกสร้างไว้ภายใต้ไดเรกทอรีนี้ ในที่นี้ ได้ทำการสร้างไดเรกทอรีย่อย showcase เพิ่มเติมต่อจาก address ข้างต้นเพื่อเป็นที่จัดเก็บไฟล์ให้มีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

6.2.5 ทำการแปลงไฟล์ point cloud จากการจัดเก็บข้อมูลภายในถ้ำด้วยเครื่องสแกน 3 มิติยี่ห้อ Leica รุ่น BLK 360 แล้วใช้ซอฟต์แวร์ของตัวเครื่องในการบันทึกไฟล์ข้อมูล จะได้ไฟล์ point cloud นามสกุล e57 ในที่นี้ Potree viewer library จะใช้รูปแบบไฟล์เฉพาะสำหรับการประมวลผลผ่านเว็บเบราเซอร์ จึงจำเป็นต้องมีการแปลงไฟล์ข้อมูล point cloud ให้อยู่ในสกุลไฟล์ที่ต้องการ โดยการแปลงข้อมูลไฟล์ให้รองรับ Potree viewer นั้นต้องใช้การแปลงไฟล์ point cloud จากสกุลไฟล์ las ซึ่งเราต้องทำการแปลงไฟล์ e57 ให้อยู่ในสกุลไฟล์ las ก่อน ในที่นี้การแปลงไฟล์ควรจะทำจากเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนา (local machine) ไม่จำเป็นต้องทำการแปลงบน virtual machine แต่อย่างใด ขั้นตอนการแปลงไฟล์ทั้งหมดมีดังต่อไปนี้

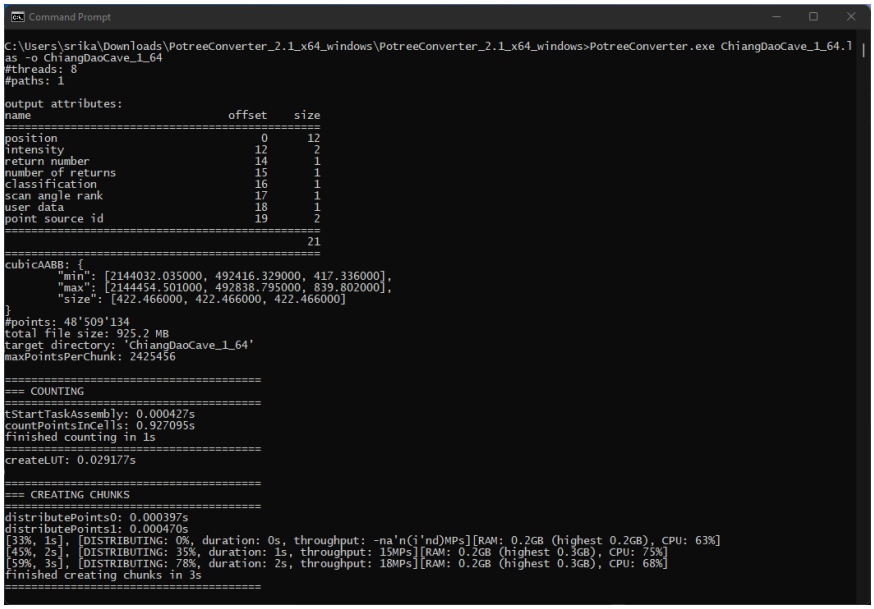
- ในกรณีใช้ระบบปฏิบัติการ Windows ให้ทำการดาวน์โหลดซอฟต์แวร์แปลงไฟล์ LiDAR ชื่อว่า lastools จาก http://lastools.org จะได้ไฟล์ LASTools.zip ทำการ unzip ไฟล์ จะได้ไฟล์ .exe สำหรับใช้แปลงไฟล์ LiDAR จากในไดเรกทอรี LAStools/bin
- เลือกใช้ตัวแปลงไฟล์ชื่อ e572las.exe สำหรับอ่านไฟล์ LiDAR ในสกุลไฟล์ e57 แล้วทำการแปลงไฟล์เป็นไฟล์มาตรฐาน las
- ทำการเรียกคำสั่งจาก command prompt ดังแสดงในรูปที่ 55 โดยจัดเตรียมไฟล์ที่ต้องการแปลงไว้ในไดเรกทอรีเดียวกันกับไฟล์ e572las.exe ตัวอย่างไฟล์ที่ใช้คือไฟล์ ChiangDaoCave_1_64.e57 เป็นไฟล์ที่ได้จากการสแกนถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่ ด้วยสเกลความละเอียดในการสแกนไฟล์ที่ 1:64 จะได้ไฟล์ขนาดประมาณ 900 MB ถ้าหากสแกนด้วยความละเอียดสูงกว่านี้ เช่นไฟล์สแกนถ้ำเชียงดาวด้วยความละเอียด 1:16 จะมีขนาดไฟล์ใหญ่ขึ้นเป็น 3.6 GB เป็นต้น ในคำสั่ง e572las.exe ดังกล่าวจะทำการระบุชื่อไฟล์ของ e57 ตามหลัง -i ในขณะที่ระบุชื่อเอาต์พุตไฟล์ las ที่ต้องการไว้ตามหลัง -o สังเกตไฟล์ las ที่ได้จะมีขนาดไม่แตกต่างจากไฟล์ e57 ต้นฉบับ สังเกตไฟล์ที่ได้จากรูปที่ 55



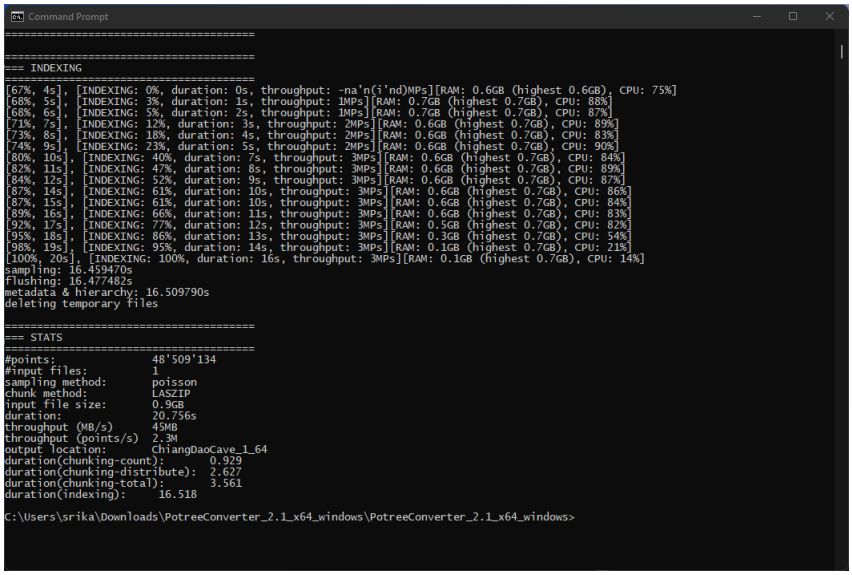
รูปที่ 55 คำสั่งการแปลงไฟล์ e57 เป็น las ด้วย LASTools

- เมื่อได้ไฟล์ las แล้ว จะทำการแปลงไฟล์ las ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้แสดงผลด้วย library จาก Potree ได้ โดยใช้เครื่องมือการแปลงไฟล์เรียกว่า PotreeConverter สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows สามารถดาวน์โหลดได้จาก
  https://github.com/potree/PotreeConverter/releases/tag/2.1

  ทำการ unzip ไฟล์ PotreeConverter_2.1_x64_windows.zip โดยภายในไดเรกทอรีที่ได้จะมีไฟล์ PotreeConverter.exe ที่ต้องการ ทำการย้ายไฟล์ las ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้วมายังไดเรกทอรีนี้ เพื่อทำการแปลงไฟล์ โดยใช้คำสั่งดังแสดงในรูปที่ 56 – 57 โดยระบุไฟล์ las ที่ต้องการแปลงและระบุไดเรกทอรีสำหรับเอาต์พุตหลัง -o



รูปที่ 56 คำสั่งแปลงไฟล์ las เพื่อใช้ในการแสดงผลบน Potree



รูปที่ 57 คำสั่งแปลงไฟล์ las เพื่อใช้ในการแสดงผลบน Potree (ต่อ)

- PotreeConverter จะทำการสร้างไดเรกทอรีตามที่ระบุ พร้อมกับไฟล์ที่ใช้สำหรับ viewer ตัวอย่างไฟล์ในไดเรกทอรีจากคำสั่งข้างต้นจะประกอบไปด้วยไฟล์ hierarchy.bin metadata.json และ octree.bin (ไฟล์ octree.bin เป็นไฟล์ที่มีข้อมูลของ point cloud อยู่ สังเกตได้จากขนาดของไฟล์ที่ประมาณ 900 MB – 1 GB ไดเรกทอรีของไฟล์ข้อมูลนี้จะถูกอัพโหลดขึ้นไว้บน web server ขั้นตอนต่อไปคือการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการแสดงผลแบบจำลอง 3 มิติจากชุดข้อมูลดังกล่าว

6.2.6 การเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงผลแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงด้วย library จาก Potree ดังรายละเอียดตามขั้นตอนต่อไปนี้

- สร้างไดเรกทอรีบน web server โดยตัวอย่างนี้จะใช้ชื่อ chiang_dao ดังนั้นไดเรกทอรีบน web server สำหรับไฟล์ตัวอย่างนี้คือ

  /var/www/html/cave_radio/showcase/chiang_dao

- ทำการอัพโหลดไดเรกทอรีไฟล์ข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่แล้วไปไว้ภายใต้ไดเรกทอรีข้างต้น จะได้ไดเรกทอรีของข้อมูลคือ (สังเกตว่าเรากำหนดไดเรกทอรี pointclouds ไว้ก่อนหน้าด้วยเพื่อความเป็นระเบียบ ซึ่งเราสามารถเพิ่มไดเรกทอรีข้อมูล point cloud อื่น ๆ เพิ่มเติมได้ภายใต้ไดเรกทอรี pointclouds นี้)

/var/www/html/cave_radio/showcase/chiang_dao/pointclouds/ChiangDao_1_64

- สร้างไฟล์ชื่อ chiangdao.html ซึ่งเป็นไฟล์ html โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
- ในส่วน <head> ทำการตั้งชื่อหน้า web page และกำหนดการเชื่อมโยง library ต่าง ๆ ของ Potree

```
<head>
    <meta charset="utf-8">
    <meta name="description" content="">
    <meta name="author" content="">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0, user-scalable=no">
    <title>แบบจำลองเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว</title>
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/potree/potree.css">
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.css">
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/openlayers3/ol.css">
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/spectrum/spectrum.css">
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jstree/themes/mixed/style.css">
    <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
    <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
    <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Prompt:wght@100&display=swap" rel="stylesheet">
    <style>
        body {
            font-family: 'Prompt', sans-serif;
        }
    </style>
</head>
```

รูปที่ 58 การกำหนด <head>

- ในส่วนของ <body> เริ่มจากการเรียกใช้งาน script library ของ Potree ดังรูปที่ 59

```
<script src="./libs/jquery/jquery-3.1.1.min.js"></script>
<script src="./libs/spectrum/spectrum.js"></script>
<script src="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.js"></script>
<script src="./libs/other/BinaryHeap.js"></script>
<script src="./libs/tween/tween.min.js"></script>
<script src="./libs/d3/d3.js"></script>
<script src="./libs/proj4/proj4.js"></script>
<script src="./libs/openlayers3/ol.js"></script>
<script src="./libs/i18next/i18next.js"></script>
<script src="./libs/jstree/jstree.js"></script>
<script src="./libs/potree/potree.js"></script>
<script src="./libs/plasio/js/laslaz.js"></script>
```

รูปที่ 59 การเรียกใช้งาน script library ของ Potree

- กำหนด container สำหรับแสดงผลแบบจำลอง 3 มิติ โดยเลือกให้แสดงผลแบบเต็มจอ (full screen) ของเบราเซอร์ ดังระบุในส่วนของ width และ height

```
<div class="potree_container" style="position: absolute; width: 100%; height: 100%; left: 0px; top: 0px; ">
    <div id="potree_render_area" style="background-image: url('../build/potree/resources/images/background.jpg');">
    </div>
    <div id="potree_sidebar_container"> </div>
</div>
```

รูปที่ 60 การกำหนด container สำหรับพื้นที่แสดงผลแบบจำลอง 3 มิติ

- ภายใต้ <script> ทำการเรียกคำสั่งสร้าง viewer และกำหนดค่ามุมมองต่าง ๆ ในเบื้องต้น ดังรูปที่ 61 ตัวแปร window.viewer จะเป็นตัวแปรหลักที่รวมองค์ประกอบต่าง ๆ ของ viewer ไว้ทั้งหมด โดยหัวข้อของ viewer กำหนดได้ด้วยคำสั่ง setDescription ส่วนของการแสดงผลข้อมูล point cloud จะกำหนดด้วยตัวแปร scene = new Potree.Scene() และทำการเพิ่มส่วนแสดงผลนี้เข้ากับตัว viewer โดยคำสั่ง viewer.setScene(scene) การควบคุมการแสดงผล (การใช้เมาส์ควบคุมการเสมือนเดินเข้าไปในแบบจำลอง) จาก library ของ Potree มีให้เลือกใช้หลายแบบ ในเบื้องต้นสามารถกำหนดด้วย viewer.setControls(viewer.earthControls) ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับการเดินสำรวจถ้ำ รูปแบบอื่น ๆ ที่มีให้เลือกใช้เช่น flyControls helicopterControls orbitControls ฯลฯ

```
<script>

    window.viewer = new Potree.Viewer(document.getElementById("potree_render_area"));

    viewer.setEDLEnabled(true);
    viewer.setFOV(60);
    viewer.setPointBudget(2_000_000);
    viewer.loadSettingsFromURL();

    viewer.loadGUI(() => {
        viewer.setLanguage('en');
        $("#menu_tools").next().show();
    });
    viewer.setDescription(`
    แบบจำลองเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ที่ขนาด 1:16
    `);

    let scene = new Potree.Scene();
    viewer.setScene(scene);
    viewer.setControls(viewer.earthControls);
```

รูปที่ 61 คำสั่งเรียก viewer และกำหนดค่าต่าง ๆ เบื้องต้น

- ทำการโหลดข้อมูล point cloud ที่ได้จัดเก็บไว้ในไดเรกทอรี pointclouds ด้วยคำสั่ง loadPointCloud ดังแสดงในรูปที่ 62 โดยกำหนดที่อยู่ของไฟล์ metadata.json จากในไดเรกทอรีของข้อมูล point cloud จากขั้นตอนการแปลงด้วย PotreeConverter สังเกตได้จากชื่อไดเรกทอรี ChiangDao_1_64 ข้อมูล point cloud จะถูกสกัดและโหลดใส่ใน scene ด้วยคำสั่ง addPointCloud ทำการปิดท้ายด้วย </script> แล้วดูผลการแสดงแบบจำลอง 3 มิติของชุดข้อมูล point cloud ได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 63 โดยใช้ address ต่อไปนี้บนเว็บเบราเซอร์

http://34.126.134.76/cave_radio/showcase/chaing_dao/chaingdao.html

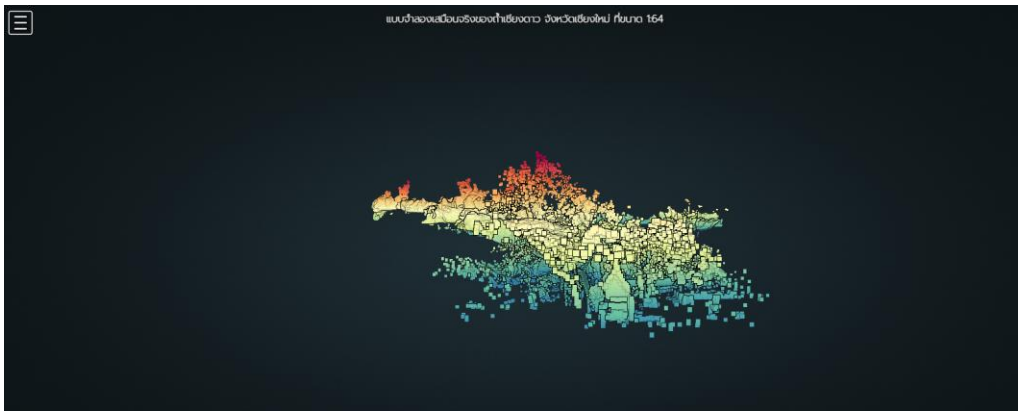
```
Potree.loadPointCloud("./pointclouds/ChiangDao_1_64/metadata.json", "ChiangDao_1_64", e => {
    //let scene = viewer.scene;
    let pointcloud = e.pointcloud;

    let material = pointcloud.material;
    material.size = 1;
    material.pointSizeType = Potree.PointSizeType.ADAPTIVE;
    material.shape = Potree.PointShape.SQUARE;
    material.activeAttributeName = "elevation";

    scene.addPointCloud(pointcloud);

    scene.view.setView(
        [2144524.209, 492346.900, 461.815],
        [2144089.414, 492651.996, 401.217]
    );
```

รูปที่ 62 ชุดคำสั่งโหลดข้อมูล point cloud

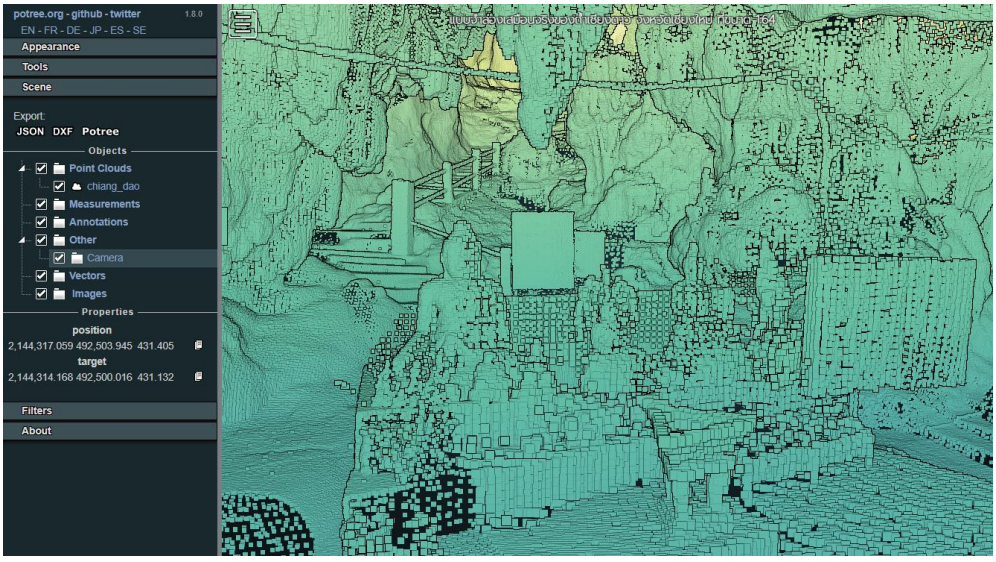


รูปที่ 63 ผลการแสดงชุดข้อมูล point cloud 3 มิติของแบบจำลองถ้ำเชียงดาว

จากนี้ผู้ใช้งานสามารถเริ่มสำรวจแบบจำลองที่ได้โดยการควบคุมด้วยเมาส์ สังเกตว่ามุมมองเริ่มต้นของ viewer ถูกกำหนดไว้ด้วยคำสั่ง setView โดยค่าต่าง ๆ สามารถเลือกปรับได้โดยเลือกไปที่กล่องเครื่องมือสามขีดที่มุมซ้ายบน เลือกไปที่ Objects :: Scene -> Other -> Camera จะเห็นค่ามุมกล้องปัจจุบันของ viewer จาก Properties :: position และ target เมื่อผู้ใช้เดินสำรวจแบบจำลองด้วยเมาส์ ค่ามุมกล้องนี้จะเปลี่ยนไปตามการควบคุมของผู้ใช้ เราสามารถบันทึกค่ามุมกล้องเหล่านี้ไว้ แล้วใช้กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับเริ่มใช้งาน viewer ได้ ตัวอย่างค่ามุมกล้องดังแสดงในรูปที่ 64

รูปที่ 64 ตัวอย่างมุมกล้องเริ่มต้นจากกล่องควบคุมการแสดงผลของ viewer

- การเพิ่มองค์ประกอบในแบบจำลองด้วยการใส่ Annotation ใน Potree viewer เป็นการเพิ่มจุดสำคัญเข้าไปในแบบจำลอง เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกคลิกและ viewer จะเปลี่ยนมุมกล้องไปยังจุดสำคัญนั้น ๆ ได้ทันที ตัวอย่างเช่นการเพิ่มป้ายแสดงทางเข้าถ้ำ (ถ้ำเชียงดาวมีถ้ำย่อยภายใน ได้แก่ถ้ำม้า ถ้ำพระนอนและถ้ำม้า) เป็นต้น ในการนี้ เราจำเป็นต้องรู้มุมกล้อง ณ ตำแหน่งทางเข้าถ้ำต่าง ๆ ซึ่งได้จากการเดินสำรวจจริงไปในแบบจำลอง แล้วทำการบันทึกมุมกล้อง ณ ทางเข้าถ้ำจริง ๆ ไว้เพื่อนำมาใส่ไว้ในโปรแกรม ดังตัวอย่างในรูปที่ 65 เป็นตำแหน่งภายในแบบจำลองที่ทางเข้าถ้ำม้า และค่ามุมมองกล้อง ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ซึ่งมีค่าตำแหน่งกล้อง (position) ที่พิกัด 2,144,317.059 492,503.945 และ 431.405 พร้อมด้วยค่าเป้าหมาย (target) ที่พิกัด 2,144,314.168 492,500.016 และ 431.132



รูปที่ 65 ตัวอย่างมุมกล้อง ณ ตำแหน่งทางเข้าถ้ำม้า ในถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่

- เมื่อได้ตำแหน่งมุมกล้องที่ต้องการแล้ว เราจะเลือกตำแหน่งที่จะติดป้าย Annotation เพื่อแสดงข้อมูล ซึ่งเปรียบได้กับการที่เรานำเอาป้ายไปติดในถ้ำจริง ๆ โดยตำแหน่งหรือพิกัดใน

แบบจำลองนั้นสามารถหาได้จากกล่องควบคุมเดิม แล้วเลือกไปที่ Tools :: Measurement และเลือกการวัดแบบจุด (ในกล่องเครื่องมือจะมีเครื่องมือการวัดหลากหลายแบบให้ใช้งาน เช่นการวัดระยะทางระหว่างสองจุด การวัดมุม การวัดพื้นที่ เป็นต้น) เลื่อนเม้าส์ไปยังจุดที่ต้องการ ตัว viewer จะแสดงจุดแดงหากตำแหน่งเม้าส์ตรงกับพิกัด point cloud ในแบบจำลอง ดังตัวอย่างในรูปที่ 66 เป็นตำแหน่งจริงของป้ายบอกทางเข้าถ้ำม้า ทำการบันทึกตำแหน่งนี้ไว้ เพื่อใช้ในการโปรแกรมเพิ่ม Annotation ทางเข้าถ้ำม้า ในที่นี้ค่าพิกัดที่ได้คือ 2,144,312.40 492,495.03 และ 432.09

รูปที่ 66 พิกัดของจุดบนป้ายบอกทางเข้าถ้ำม้าจากการเลือก point measurement

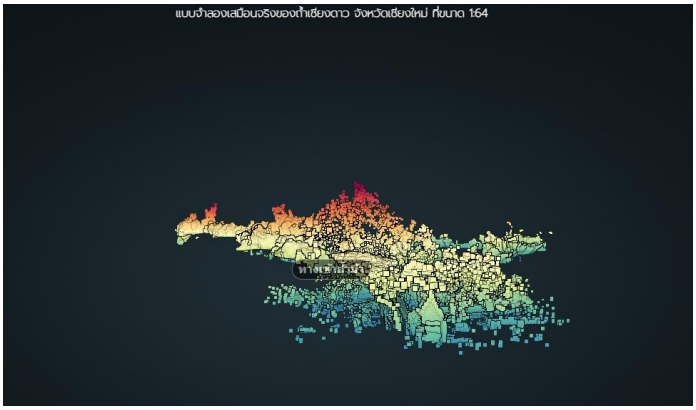
- จากข้อมูลมุมกล้องและตำแหน่งของป้ายทางเข้าถ้ำม้า เราสามารถเพิ่มองค์ประกอบ Annotation เข้าไปในแบบจำลองได้ด้วยคำสั่งดังแสดงในรูปที่ 67 โดยกำหนดชื่อป้ายเป็น “ทางเข้าถ้ำม้า” และรายละเอียด “ทางเข้าถ้ำม้า ภายในถ้ำเชียงดาว” ซึ่งรายละเอียดนี้จะปรากฏเมื่อนำเม้าส์มาจ่อที่ป้าย

```
let maEntrance = new Potree.Annotation({
            position: [2144312.40, 492495.03, 432.09],
            title: 'ทางเข้าถ้ำม้า',
            cameraPosition: [2144317.059, 492503.945, 431.405],
            cameraTarget: [2144314.168, 492500.016, 431.132],
            description: `ทางเข้าถ้ำม้า ภายในถ้ำเชียงดาว`
});
scene.annotations.add(maEntrance);
```

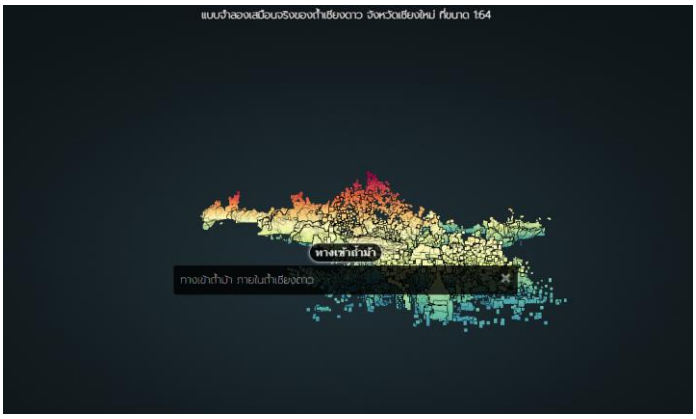
รูปที่ 67 คำสั่งเพิ่ม Annotation แสดงป้ายทางเข้าถ้ำม้าที่พิกัดตามที่กำหนด

- ทำการ refresh เบราเซอร์เพื่อดูผลการเพิ่ม Annotation ดังแสดงในรูปที่ 68 ซึ่งจะเห็นป้าย “ทางเข้าถ้ำม้า” แสดงในแบบจำลอง เมื่อนำเม้าส์ไปจ่อที่ป้าย จะปรากฏกล่องแสดงรายละเอียดว่า “ทางเข้าถ้ำม้า ภายในถ้ำเชียงดาว” ดังรูปที่ 69 เมื่อผู้ใช้คลิ๊กที่ป้าย viewer

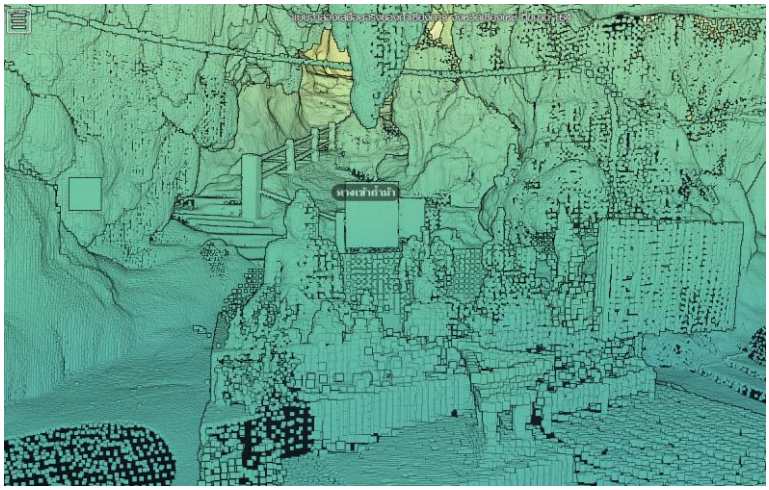
จะทำการเคลื่อนหน้าแสดงผลไปยังพิกัดที่กำหนดหน้าถ้ำม้าทันที ดังแสดงในรูปที่ 70 ด้วยมุมกล้องและตำแหน่งป้ายที่กำหนดไว้ในโปรแกรม เป็นการอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้โดยที่ไม่ต้องเลื่อนการเดินสำรวจถ้ำไปยังทางเข้าถ้ำม้าเอง



รูปที่ 68 ป้ายหรือ annotation “ทางเข้าถ้ำม้า” ปรากฏในแบบจำลอง



รูปที่ 69 รายละเอียดป้าย “ทางเข้าถ้ำม้า ภายในถ้ำเชียงดาว”



รูปที่ 70 การแสดงผลเมื่อผู้ใช้คลิ๊กที่ป้าย “ทางเข้าถ้ำม้า”

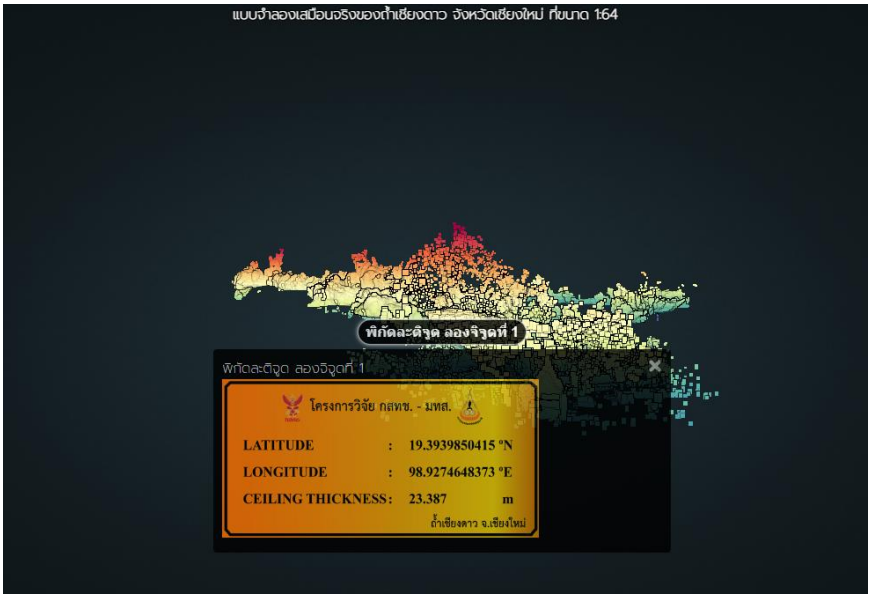
- เราสามารถเพิ่ม Annotation ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ดังตัวอย่างในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการสำรวจและบันทึกพิกัด GPS ภายในถ้ำที่สำรวจ แล้วได้ทำการติดตั้งป้ายโลหะแสดงตำแหน่งพิกัดภายในถ้ำ ณ ตำแหน่งพิกัด GPS ที่สำรวจได้จริง เราสามารถสร้างไฟล์กราฟิค ดังตัวอย่างในรูปที่ 71 เพื่อนำมาใส่ใน Annotation ของแบบจำลอง เพื่อให้ผู้ใช้งานได้เห็นข้อมูลพิกัด GPS ณ ตำแหน่งนั้น ๆ และสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างตำแหน่ง GPS ต่าง ๆ ในแบบจำลองได้อย่างสะดวก

รูปที่ 71 ตัวอย่างไฟล์กราฟิคป้ายแสดงพิกัด GPS และค่าความหนาของเพดานถ้ำ ณ ตำแหน่งพิกัดนั้น ๆ

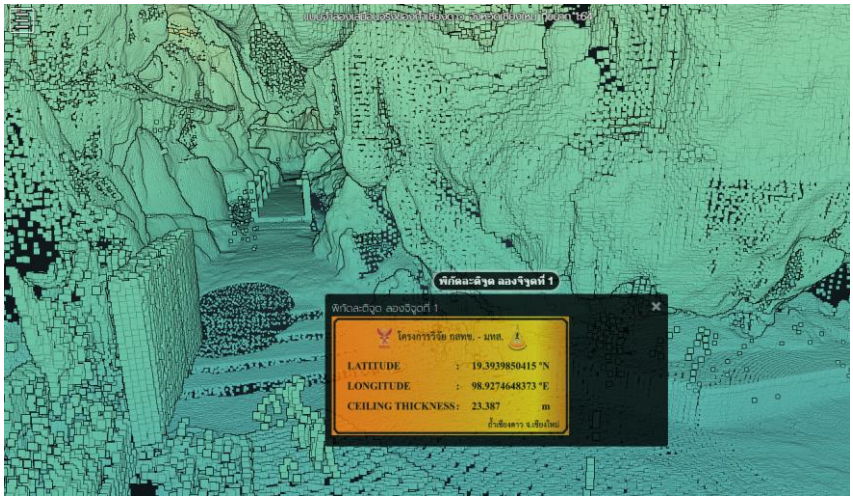
- ตัวอย่างโปรแกรมการเพิ่ม Annotation ด้วยป้ายไฟล์กราฟิคจากรูปที่ 71 ในแบบจำลองแสดงในรูปที่ 72 โดยที่ไฟล์ plate_chiangdao1.jpg ต้องถูกอัพโหลดไว้ไปยัง web server ที่ไดเรกทอรีเดียวกันกับ chiang_dao.html ตัวอย่างการแสดงผลป้ายกราฟิคดังกล่าวแสดงในรูปที่ 73 เมื่อผู้ใช้คลิ๊กที่ป้าย ตัว viewer จะเปลี่ยนตำแหน่งการแสดงผลไปยังตำแหน่งป้ายจริง ๆ ภายในถ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 74 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการติดตั้งป้ายโลหะบอกพิกัดจริงภายในถ้ำจากทีมวิจัย

```
let plate1 = new Potree.Annotation({
            position: [2144311.501, 492505.569, 430.376],
            title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1',
            cameraPosition: [2144316.455, 492501.150, 432.552],
            cameraTarget: [2144310.774, 492505.157, 430.739],
            description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1<img src="plate_chiangdao1.jpg" width="360" height="180">`
        });
scene.annotations.add(plate1);
```

รูปที่ 72 ตัวอย่างการเพิ่มไฟล์กราฟิคแสดงป้ายพิกัด GPS ณ ตำแหน่งมุมกล้องที่กำหนด



รูปที่ 73 ป้ายกราฟิคพิกัด GPS ณ ตำแหน่งจริงภายในถ้ำ

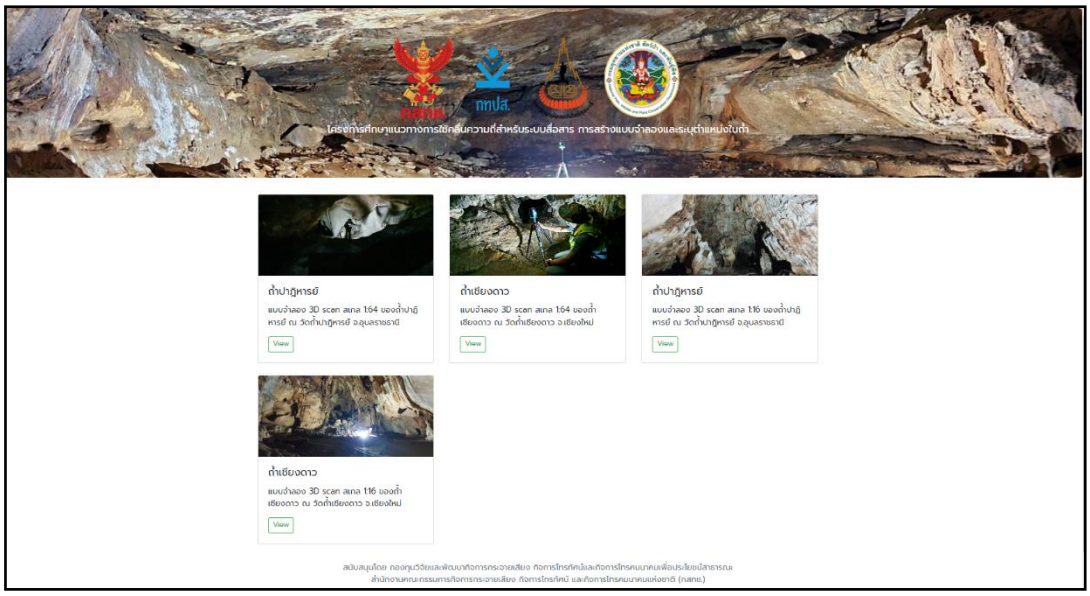


รูปที่ 74 ป้ายกราฟิคพิกัด GPS ณ ตำแหน่งจริงภายในแบบจำลองถ้ำ

เมื่อสามารถสร้างแบบจำลองถ้ำและจัดทำไฟล์ html เพื่อแสดงผลแบบจำลองถ้ำบนเว็บเบราเซอร์ ไฟล์ html ของถ้ำต่าง ๆ ได้ถูกนำมารวบรวมไว้ที่หน้าหลักของโครงการวิจัย การเข้าถึงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงนั้น ผู้ใช้งานสามารถเริ่มต้นได้โดยการเข้าสู่หน้าหลักตามที่อยู่ของเว็บ (URL) ดังนี้

http://34.126.134.76/cave_radio/showcase/cave_radio.html

ซึ่งภายในหน้าหลักจะประกอบด้วย ลิ้งค์สำหรับเชื่อมต่อเข้าสู่แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว อำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ และถ้ำปาฏิหาริย์ อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี ที่มีความละเอียดของจุดพิกัด (point cloud) ให้เลือกสองแบบคือ 1:16 และ 1:64 ดังแสดงในภาพที่ 75



รูปที่ 75 หน้าหลักของซอฟต์แวร์สำหรับนำเสนอแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริง

ในขั้นต้นจะได้ทำการอธิบายการใช้งานในการเข้าสำรวจถ้ำในแบบจำลองเสมือนจริง 3 มิติ โดยที่ผู้ใช้งานจะต้องใช้เมาส์ในการเข้าสำรวจถ้ำ มีรายละเอียดการใช้งานดังนี้

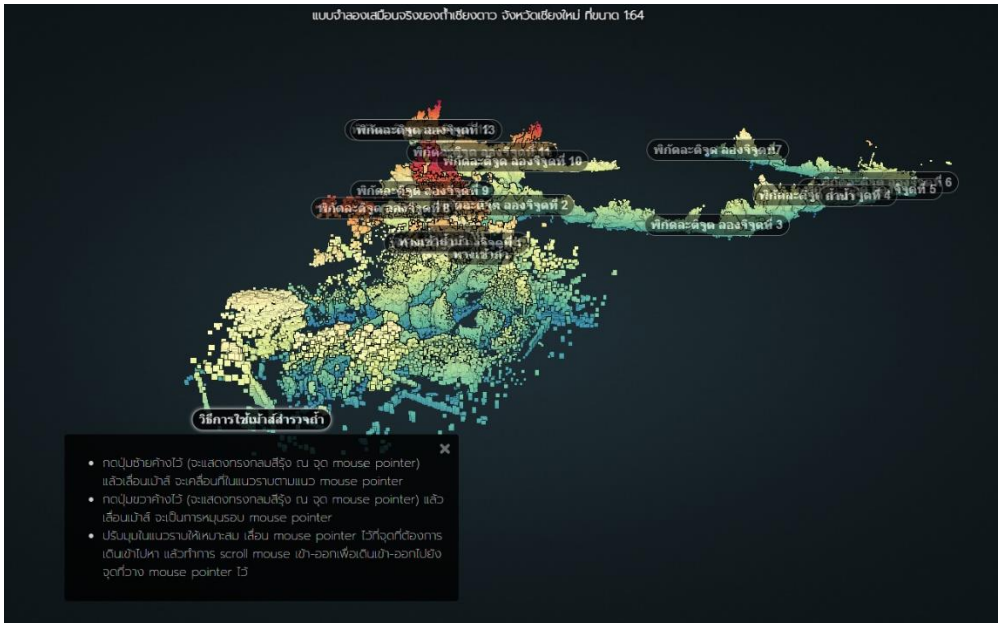
- กดปุ่มซ้ายค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเคลื่อนที่ในแนวราบตามแนว mouse pointer
- กดปุ่มขวาค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเป็นการหมุนรอบ mouse pointer
- ปรับมุมในแนวราบให้เหมาะสม เลื่อน mouse pointer ไว้ที่จุดที่ต้องการเดินเข้าไปหา แล้วทำการ scroll mouse เข้า-ออกเพื่อเดินเข้า-ออกไปยังจุดที่วาง mouse pointer ไว้

รายละเอียดของแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำในแต่ละแห่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไปดังนี้

6.3 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว

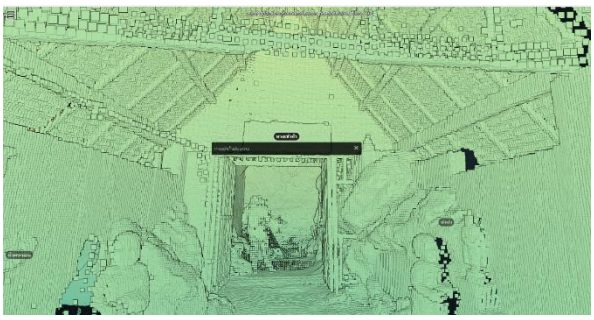
ผู้ใช้งานสามารถถึงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาวได้โดยการคลิกที่ลิ้งค์ในหน้าหลักของเว็บแอพลิเคชั่นหรือเข้าผ่านตำแหน่งที่อยู่ของเว็บ (URL) โดยตรงได้ดังนี้

http://34.126.134.76/cave_radio/showcase/chiang_dao/chiang_dao.html

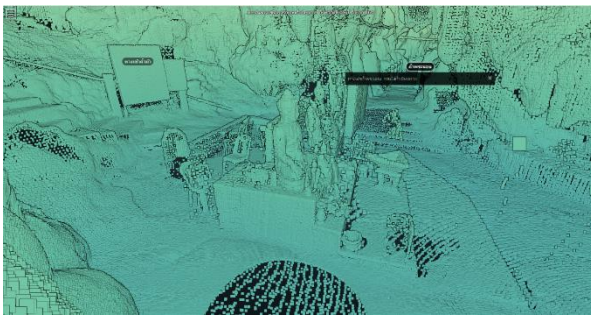


รูปที่ 76 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว

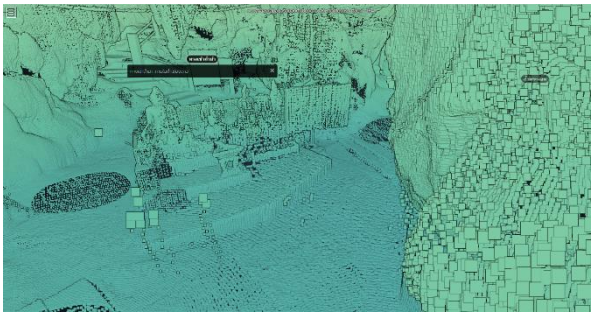
จากรูปที่ 76 แสดงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว ในแบบจำลองที่นำเสนอนี้ แสดงจุดพิกัดที่เชื่อมต่อกันตลอดทั้งโพรงถ้ำ โดยที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าสำรวจลักษณะภูมิประเทศภายในโพรงถ้ำในมุมมองหรือทิศทางต่างๆ ได้ โดยการด้วยการใช้เมาส์สำรวจถ้ำ จากการสำรวจพบว่าภายในโพรงของถ้ำเชียงดาวนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนทางลักษณะภูมิประเทศ ประกอบด้วยทางแยกและทางเชื่อมหลายแห่ง ผู้วิจัยจึงได้จัดทำป้ายปักหมุดประจำแต่ละจุดที่มีความสำคัญไว้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน ได้แก่ ทางเข้าหน้าถ้ำ ทางเข้าถ้ำม้า ทางเข้าถ้ำพระนอน และทางเข้าถ้ำน้ำ โดยวิธีการเข้าสำรวจที่หมุดดังกล่าวสามารถทำได้โดยการคลิกเม้าส์ในตำแหน่งหมุดที่สนใจ แล้วซอฟต์แวร์จะนำผู้ใช้งานเข้าไปถึงยังตำแหน่งนั้นในทันที จากนั้นผู้ใช้งานสามารถเข้าสำรวจถ้ำในส่วนอื่นๆ ต่อได้ด้วยการใช้เม้าส์สำรวจถ้ำเช่นเดิม ดังแสดงตัวอย่างการใช้งานซอฟต์แวร์ได้ดังรูปที่ 77 ถึงรูปที่ 79



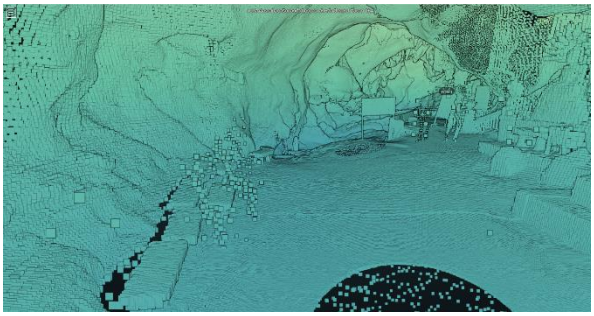
(ก) ป้ายทางเข้าหน้าถ้ำ



(ข) ป้ายทางเข้าถ้ำพระนอน

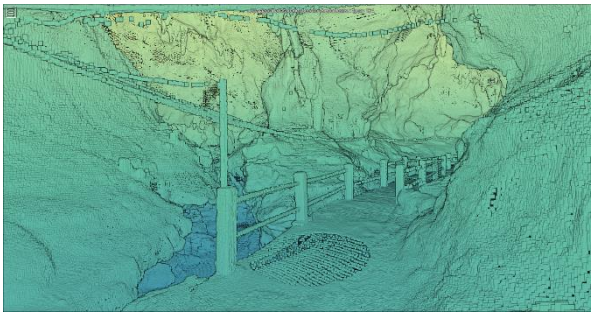


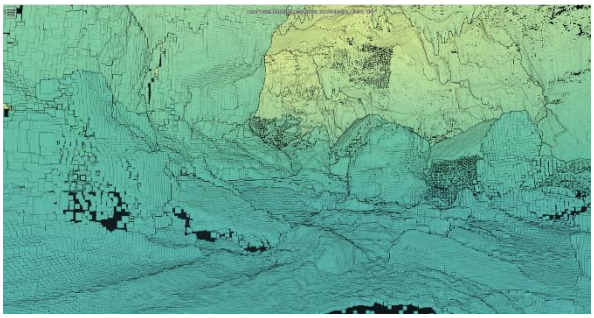
(ค) ป้ายทางเข้าเส้นทางถ้ำม้า

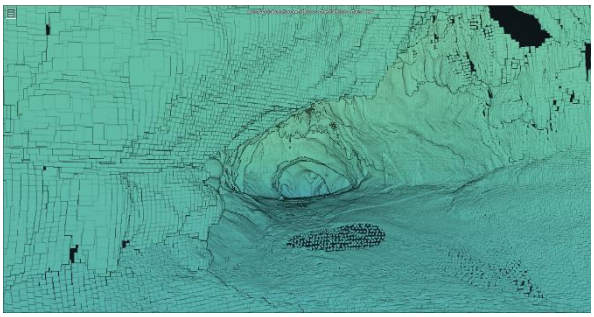


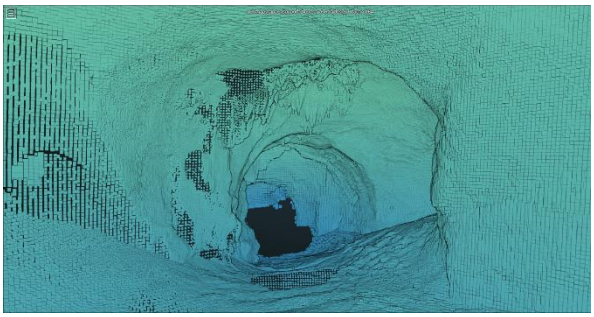
(ง) ป้ายทางเข้าเส้นทางถ้ำน้ำ

รูปที่ 77 ตำแหน่งป้ายปักหมุดประจำแต่ละจุดของแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว

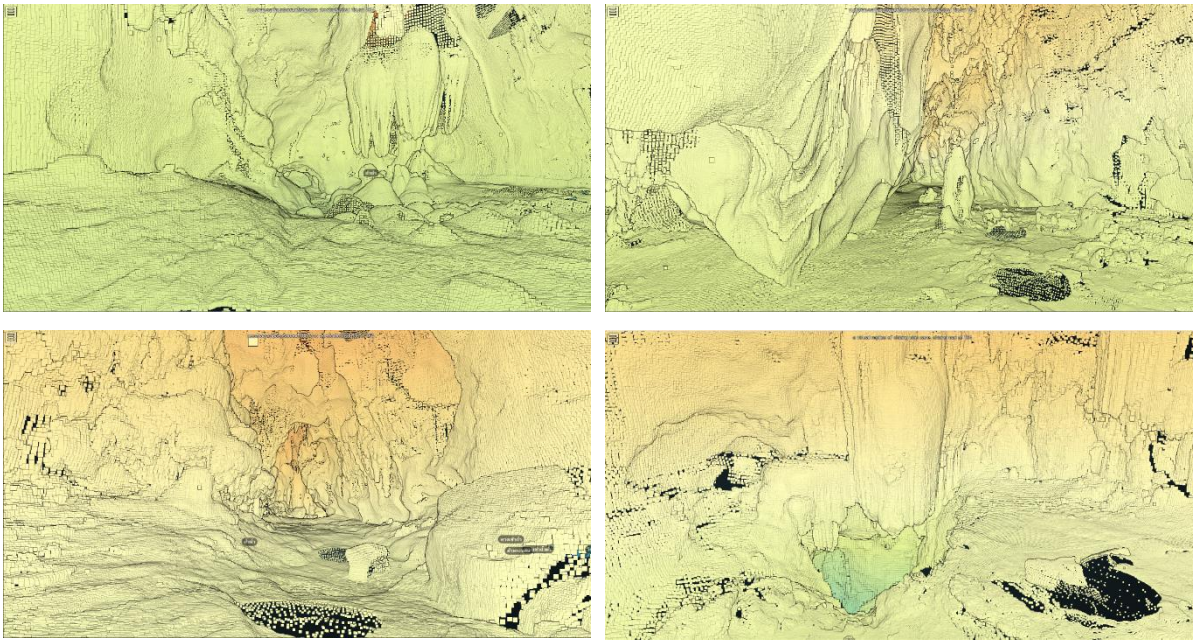








รูปที่ 78 ตัวอย่างโพรงถ้ำเส้นทางถ้ำพระนอนและเส้นทางถ้ำน้ำของแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว

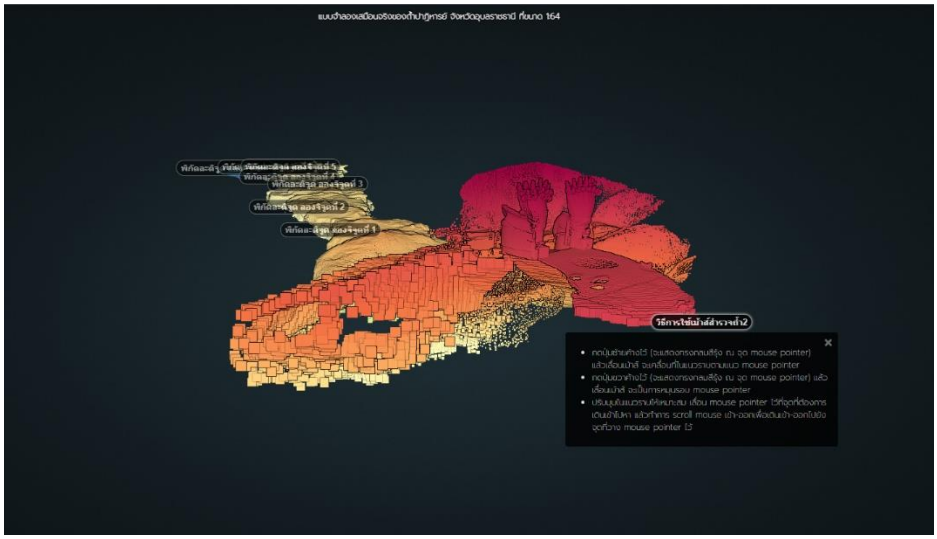


รูปที่ 79 ตัวอย่างโพรงถ้ำในเส้นทางถ้ำม้าของแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว

6.4 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์

ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์ได้โดยการคลิกที่ลิงค์ในหน้าหลักของเว็บแอพลิเคชันหรือเข้าผ่านตำแหน่งที่อยู่ของเว็บ (URL) โดยตรงได้ดังนี้

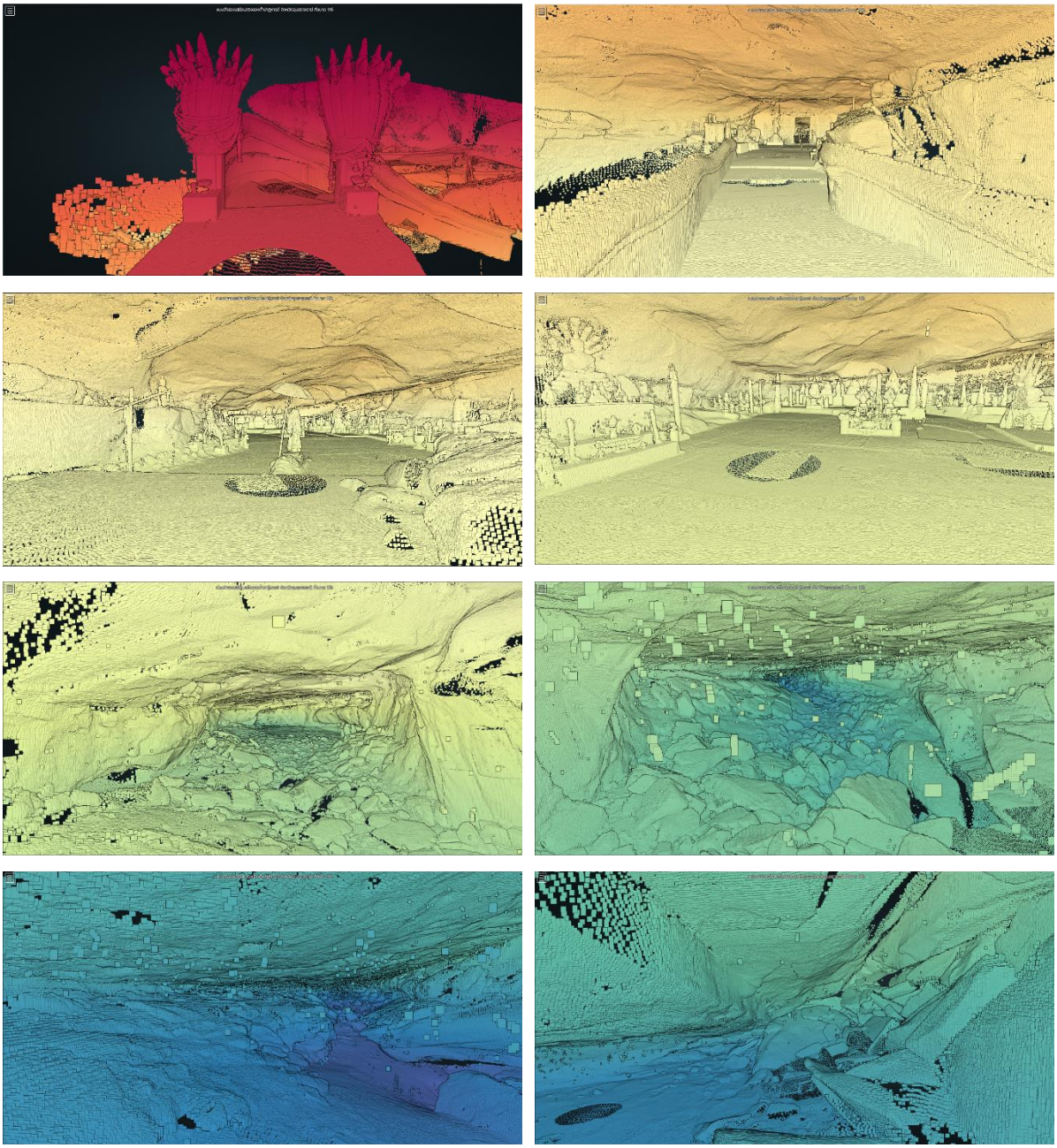
http://34.126.134.76/cave_radio/showcase/Patihan16/patihan16.html



รูปที่ 80 แบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงถ้ำปาฏิหาริย์

จากรูปที่ 80 แสดงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบ 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์ ในแบบจำลองที่นำเสนอนี้ แสดงจุดพิกัดที่เชื่อมต่อกันตลอดทั้งโพรงถ้ำ จากการสำรวจพบว่าภายในโพรงถ้ำของถ้ำปาฏิหาริย์นั้น เป็นโพรงถ้ำที่มีเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวตลอดโพรงถ้ำจนถึงจุดสิ้นสุดการสำรวจ มีเพียงแต่ทางโค้งคดเคี้ยวเท่านั้นมิได้มีทางแยกแต่อย่างใด ผู้วิจัยจึงมิได้จัดทำหมุดประจำตำแหน่งไว้เหมือนเช่นถ้ำเชียงดาว แต่ทั้งนี้

ผู้ใช้งานก็สามารถเข้าสำรวจลักษณะภูมิประเทศภายในโพรงถ้ำของถ้ำปาฏิหาริย์ในมุมมองหรือทิศทางต่างๆ จากแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงนี้ได้เช่นกัน โดยการใช้เม้าสำรวจถ้ำเช่นเดิม ดังแสดงตัวอย่างการใช้งานซอฟต์แวร์ได้ดังรูปที่ 81

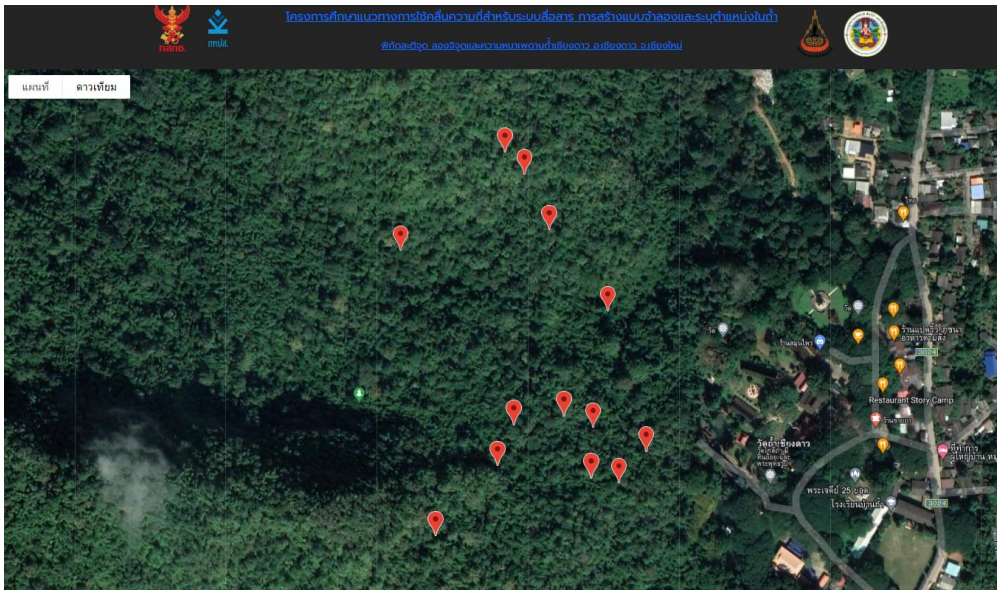


รูปที่ 81 ตัวอย่างภายในโพรงถ้ำของแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงถ้ำปาฏิหาริย์

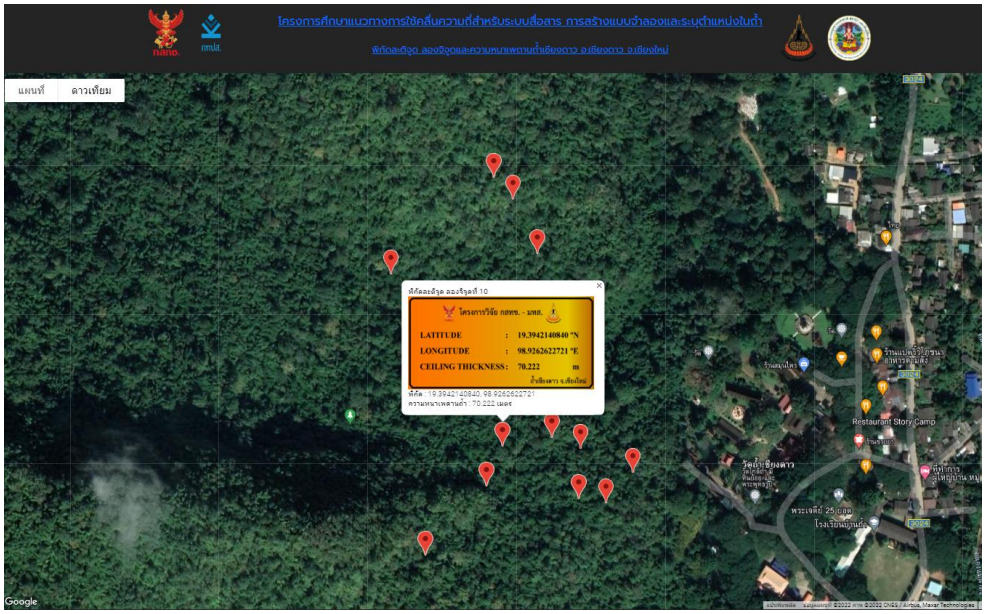
6.5 การแสดงผลพิกัด GPS ภายในถ้ำบน Google Map

จากแบบจำลองถ้ำที่มีพิกัด GPS ผู้ใช้งานสามารถคลิ๊กที่แผ่นป้ายกราฟิค ระบบจะเปลี่ยนการแสดงผลเป็น Google Map ที่มีการแสดงพิกัดจริงของป้าย GPS บนแผนที่ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 82 เมื่อผู้ใช้คลิ๊กที่หมุด จะแสดงป้ายกราฟิคพร้อมรายละเอียดพิกัด GPS และความหนาเพดานถ้ำ ณ ตำแหน่งพิกัดนั้น

ๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 83 เมื่อผู้ใช้คลิ๊กที่รูปป้ายกราฟิค ระบบจะแสดงผลแบบจำลองภายในถ้ำ ณ ตำแหน่งป้ายพิกัด GPS นั้นอีกครั้ง



รูปที่ 82 พิกัดป้าย GPS บน Google Map



รูปที่ 83 การแสดงผลป้ายกราฟิครายละเอียดพิกัดและความหนาเพดานถ้ำตามพิกัดหมุด

7. สรุป

7.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองภาพสามมิติภายในถ้ำ ซึ่งในปัจจุบันสามารถดำเนินการได้ด้วยเทคโนโลยีการสแกนแบบเลเซอร์ 3 มิติ (3D laser scanning) ด้วยความละเอียดและประสิทธิภาพสูง ตัวสแกนเลเซอร์ 3 มิติดังกล่าวเป็นที่รู้จักในชื่อของ LiDAR หรือ Light Detection And Ranging รายละเอียดข้อมูลที่

ได้จากเครื่องสแกน LiDAR อยู่ในรูปแบบพอยต์คลาวด์ (pointcloud) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประมวลผลต่อได้ ไม่ว่าจะเป็นการแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติ หรือการผนวกกับข้อมูลอื่น ๆ เช่นพิกัด GPS ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจและสแกนตัวถ้ำทั้งหมด 2 ถ้ำได้แก่ถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่ และถ้ำปาฏิหาริย์ จ.อุบลราชธานี ผลการสแกนทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ของตัวถ้ำที่มีความละเอียดสูง สามารถนำมาต่อยอดในการแสดงผลแบบ 3 มิติ รวมไปถึงการแสดงผลในรูปแบบ Google StreetView ที่ผู้ใช้งานสามารถใช้เว็บบราวเซอร์เข้าไปเดินสำรวจในถ้ำแบบ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลด้านอื่น ๆ จากทั้งโครงการวิจัยนี้ ได้แก่พิกัด GPS ภายในถ้ำ รวมทั้งตัวอย่างข้อมูลในรูปแบบอื่น ๆ เช่นป้ายแสดงข้อมูลต่าง ๆ ภายในถ้ำ สามารถนำมาผนวกกับข้อมูลคลาวด์พอยต์ เพื่อใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย

การสแกนด้วยเครื่อง LiDAR จำเป็นต้องใช้เครื่องสแกนเฉพาะ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง ประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นไปตามคุณสมบัติของเครื่อง โดยเฉพาะช่วงเวลาที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งจำกัดด้วยขนาดของแบตเตอรีในตัวเครื่องสแกน นอกไปจากนั้นแล้วภายในถ้ำมีสภาพแสงไฟที่น้อย หรือไม่มีแสงสว่างเลย การจัดเตรียมระบบไฟสำรองและระบบไฟส่องสว่าง เพื่อช่วยในการสแกนด้วยเครื่อง LiDAR จึงมีความจำเป็นเป็นอย่างยิ่ง การจัดเตรียมอุปกรณ์และการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระหว่างการสแกนภายในถ้ำจึงต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก เมื่อถ้ำมีความยาวและขนาดที่มากขึ้น ระบบไฟสำรอง ระบบไฟส่องสว่างและเวลาที่ใช้ดำเนินการสแกนจะต้องเพิ่มตามไปด้วย

7.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการวิจัยในอนาคต

ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนภายในถ้ำ เมื่อผนวกกับข้อมูลพิกัด GPS ภายในถ้ำ ทำให้ได้ข้อมูลที่มีประโยชน์ สามารถนำไปต่อยอดการใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะการบริหารจัดการถ้ำในด้านต่าง ๆ เช่นด้านความปลอดภัย ด้านส่งเสริมการท่องเที่ยว เป็นต้น ซึ่งการประยุกต์ต่อยอดใช้งานดังกล่าว เป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้ ระบบแสดงแบบจำลองภายในถ้ำรูปแบบสามมิติเสมือนจริงสามารถพัฒนาต่อยอด ให้มีความเป็นอัตโนมัติ การนำเข้าข้อมูลที่สะดวก รวมไปถึงการมีส่วนร่วมของผู้ที่เกี่ยวข้องในงานทางด้านถ้ำ เช่นเจ้าหน้าที่กรมอุทยาน เจ้าหน้าที่กรมทรัพยากรธรณี เป็นต้น สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลในแบบออนไลน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

8. เอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรม

[1] J. Ring, "The Laser in Astronomy." pp. 672–73, New Scientist June 20, 1963.

[2] T. Cosso, I. Ferrando, and A. Orlando, “Surverying and Mapping a Cave Using 3D Laser Scanner: The Open Challenge with Free and Open Source Software,” The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-5, 2014.

[3] M. Gallay, J. Kanuk, Z. Hochmuth, J. D. Meneely, J. Hofierka and V. Sedlak, “Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia,” International Journal of Speleology, 44(3): 277-291, 2015.

[4] H. Ruther, M. Chazan, R. Schroeder, R. Neeser, C. Held, S. J. Walker, A. Matmon and L. K. Horwitz, “Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the

case study of Wonderwerk Cave, South Africa," Journal of Archaeological Science, 36(2009): 1847-1856, 2009.

[5] https://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner

[6] J. Ring, "The Laser in Astronomy." pp. 672–73, New Scientist June 20, 1963.

[7] https://paracosm.io

[8] https://pointclouds.org

[9] https://www.meshlab.net

[10] https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2016/SCHUETZ-2016-POT/SCHUETZ-2016-POT-thesis.pdf (2016)

[11] https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2020/SCHUETZ-2020-MPC (2020)

[12] https://github.com/potree/potree

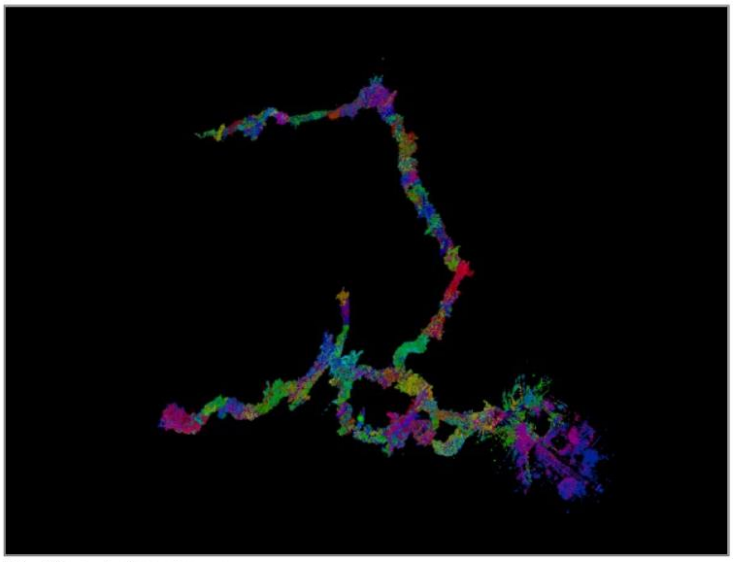
ภาคผนวก ก

รายงานผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ เชียงดาว

Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition)
Registration Report

Apr 6, 2022

Certified by:
SUT.CAVE
Chiang Dao Caves
Suranaree University of Technology



SiteMap chaing dao cave

Overall Quality

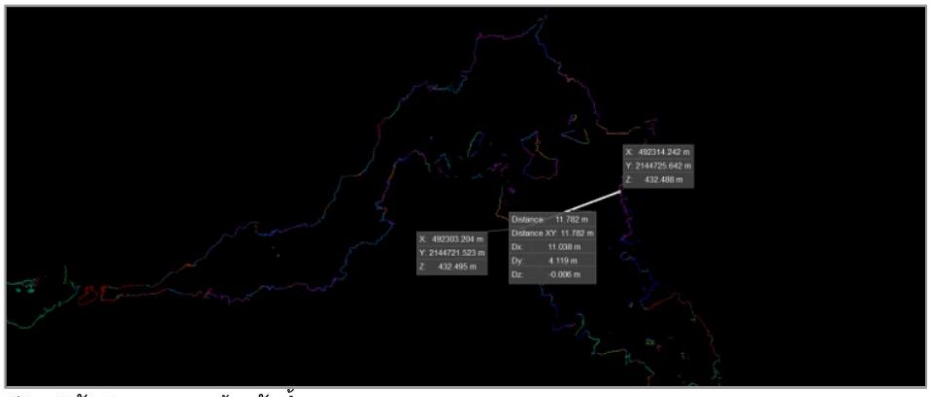
Error Results for Bundle 1

Setup Count:	261
Link Count:	556
Strength:	69 %
Overlap:	53 %

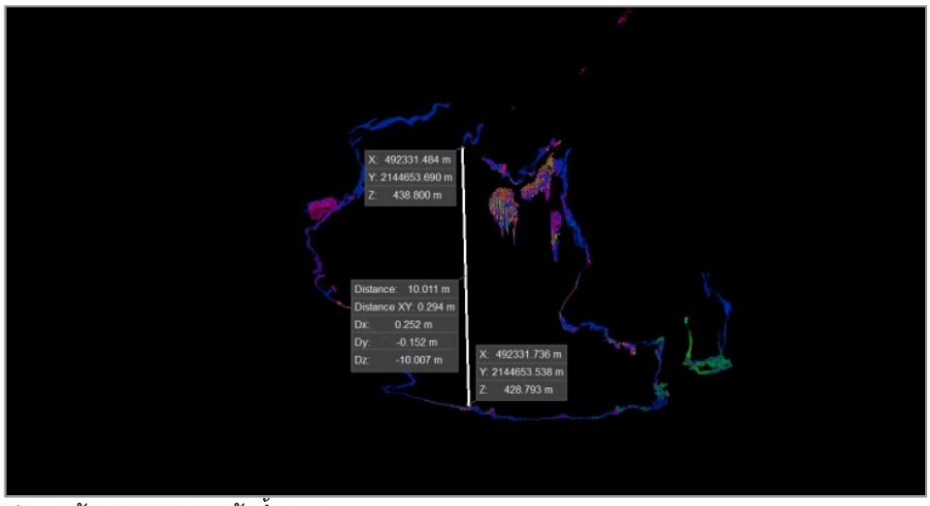
Bundle Error 0.01 m ✓	
Overlap 53 % ✓	Strength 69 % ✓
Cloud-to-Cloud 0.01 m ✓	Target Error --

Max error of 0.01 m. Max error of 0.02 m. Error greater than 0.02 m.

TruSlicer Images

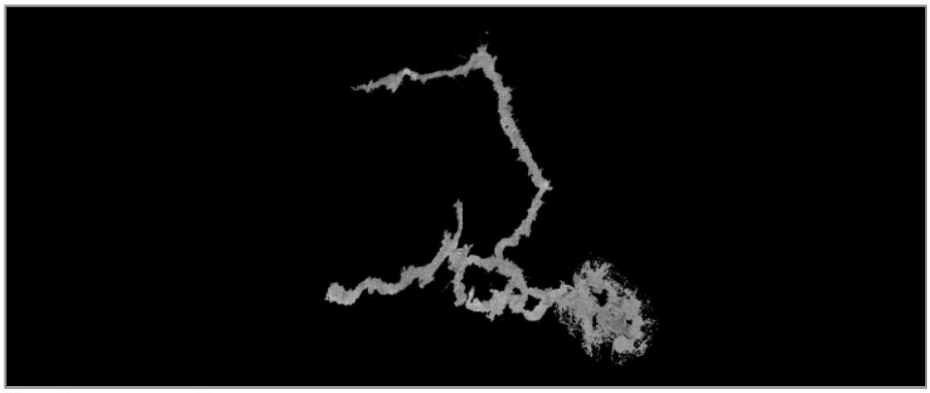


Slice 1 วัดระยะความกว้างผังถ้ำ

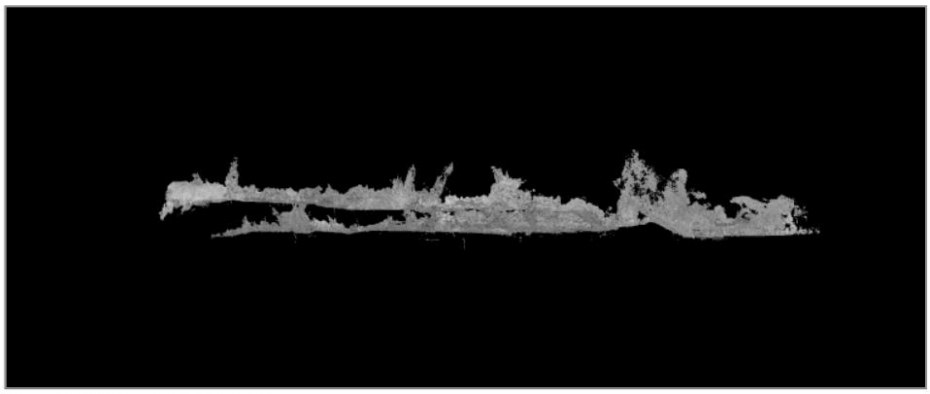


Slice 2 วัดระยะความสูงผังถ้ำ.png

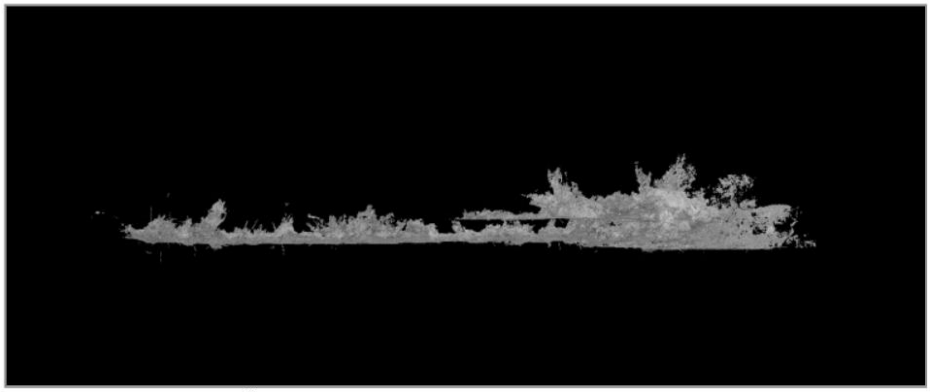
Graphics



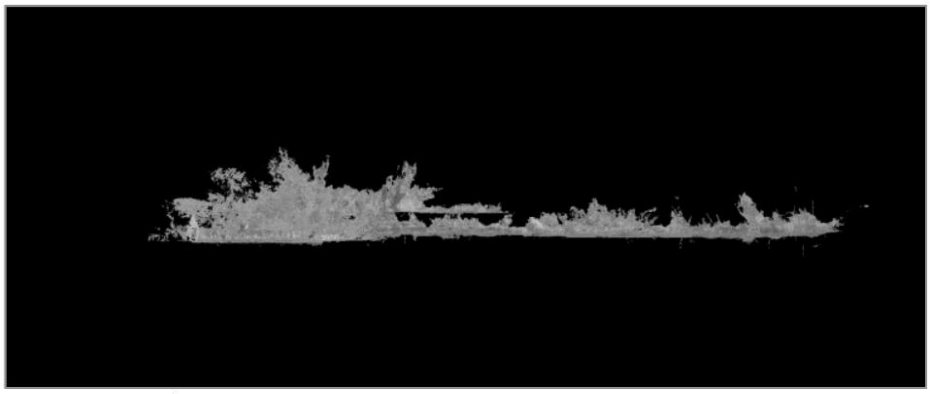
View 1 มุมมองภาพด้านบน



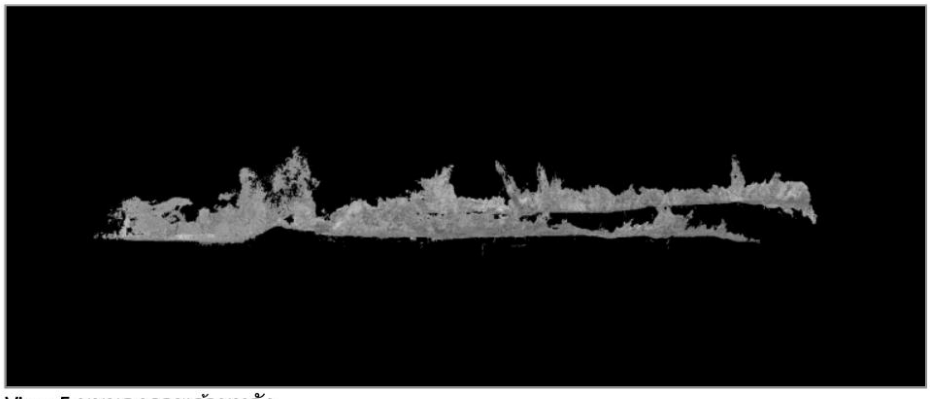
View 2 มุมมองภาพด้านหน้า



View 3 มุมมองภาพด้านซ้าย



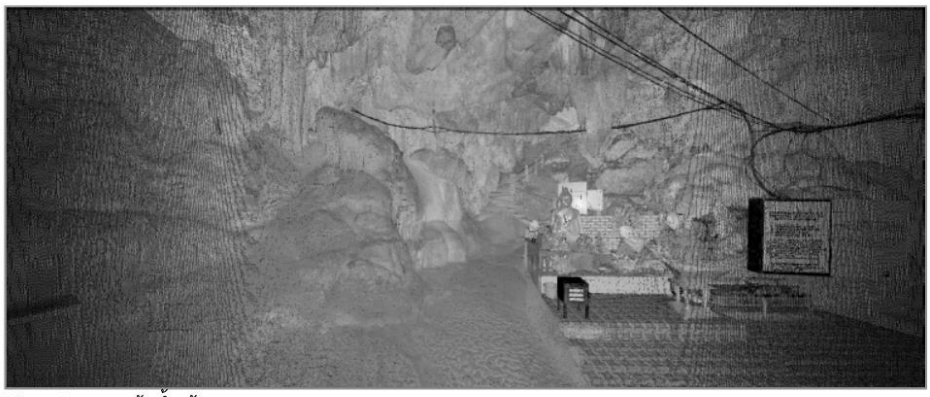
View 4 มุมมองภด้านขวา



View 5 มุมมองภาพด้านหลัง

View 6 ตำแหน่งเริ่มต้น(จุดอ้างอิ

View 7 ทางเข้าถ้ำ

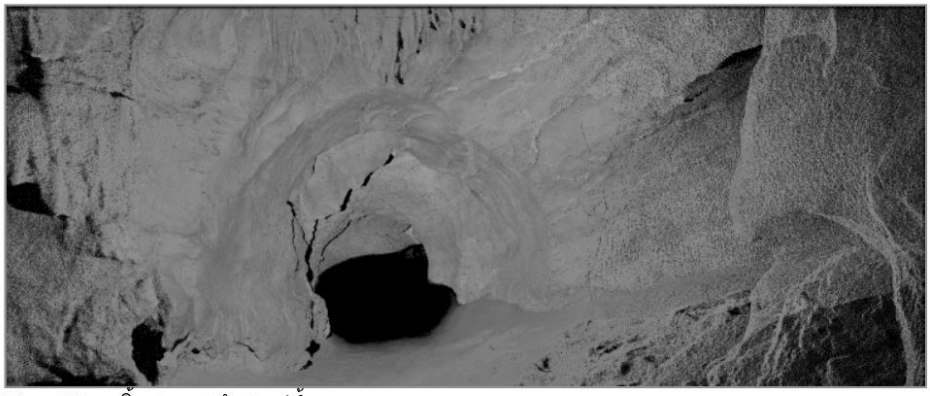


View 8 ทางเข้าถ้ำม้า

View 9 ถ้ำพระนอน

View 10 พระนอน

View 11 ถ้ำน้ำ



View 12 จุดสิ้นสุดการสำรวจ (ถ้ำน

View 13 ทางเข้าถ้ำแก้ว

View 14 จุดสิ้นสุดการสำรวจ (ผาน้ำ

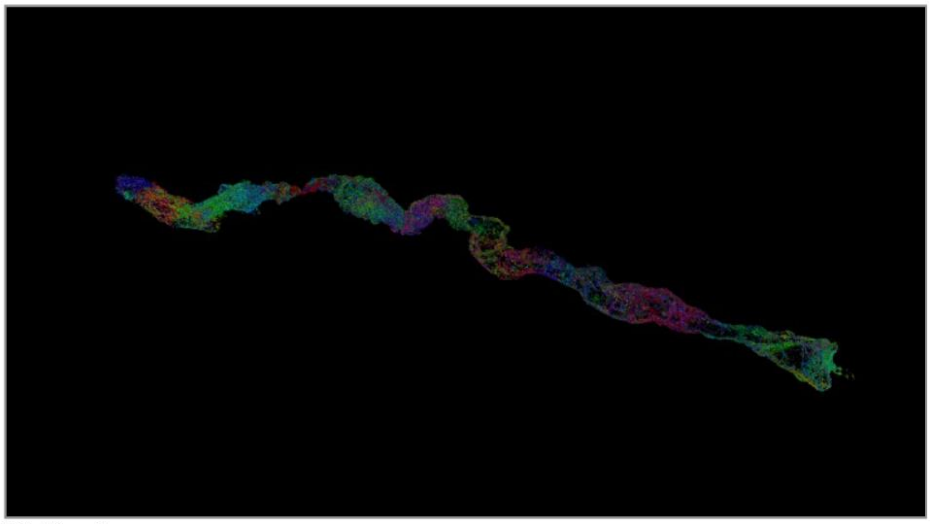
ภาคผนวก ข

รายงานผลการสำรวจผังถ้ำแบบ 3 มิติ ณ ถ้ำปาฏิหาริย์

Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition)
Registration Report

Apr 7, 2022

Certified by:
SUT.CAVE
Patihan Cave
Suranaree University of Technology



SiteMap 1

Overall Quality

Error Results for Bundle 1

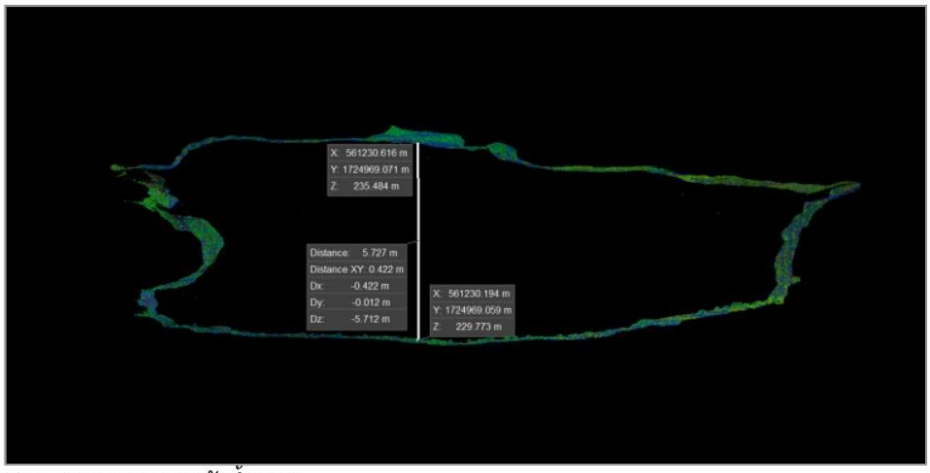
Setup Count:	77
Link Count:	125
Strength:	57 %
Overlap:	63 %

Bundle Error 0.01 m ✓	
Overlap 63 % ✓	Strength 57 % ✓
Cloud-to-Cloud 0.01 m ✓	Target Error --

Max error of 0.01 m. Max error of 0.02 m. Error greater than 0.02 m.

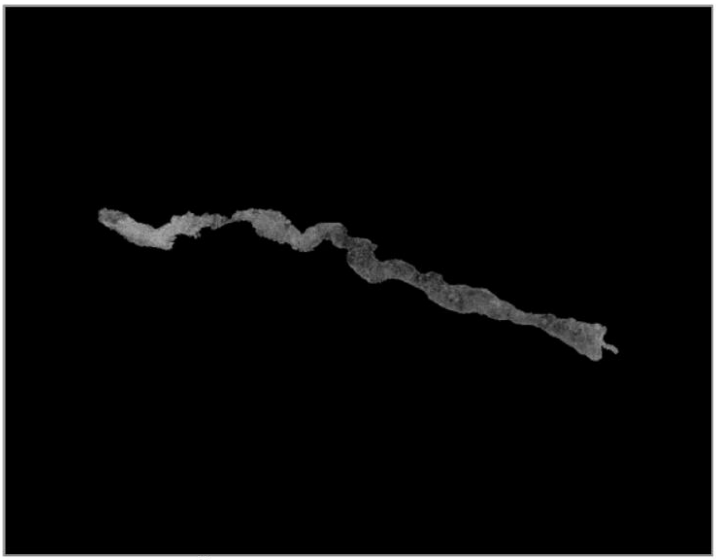
TruSlicer Images

Slice 1 ระยะความกว้างผังถ้ำ.png

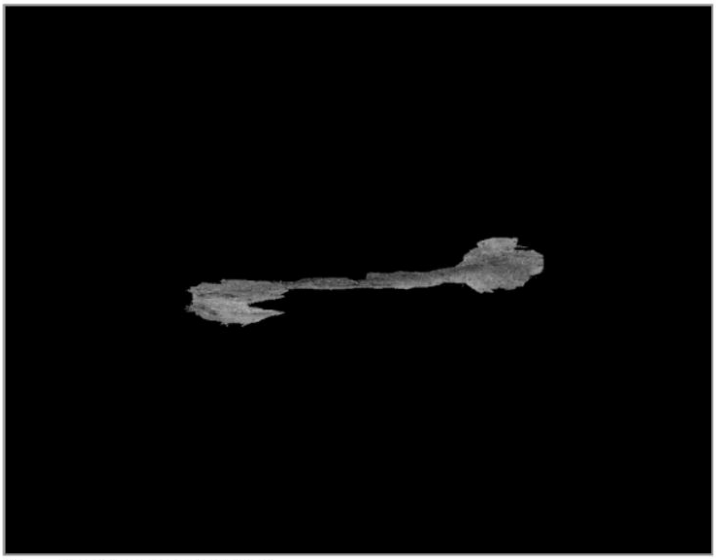


Slice 2 ระยะความสูงผังถ้ำ.png

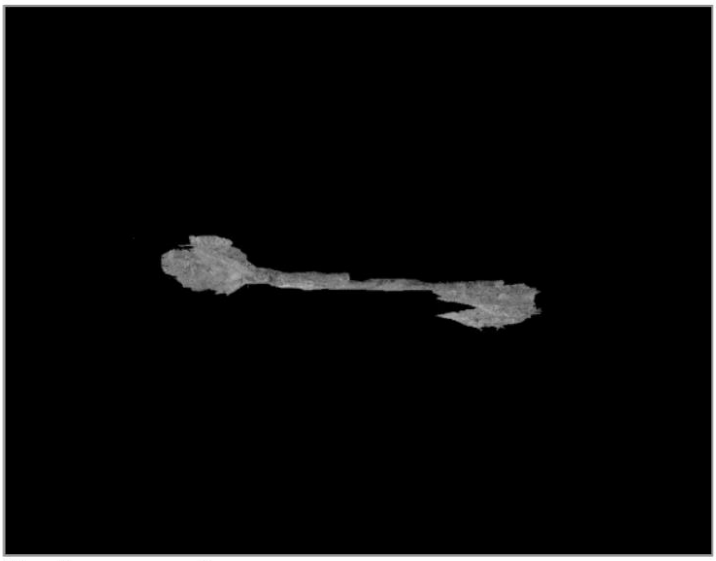
Graphics



View 1 มุมมองภาพด้านบน

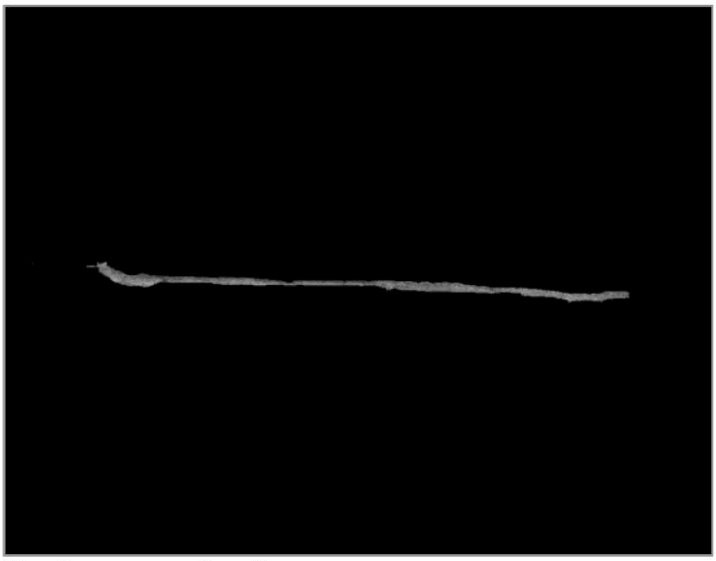


View 2 มุมมองภาพด้ายซ้าย

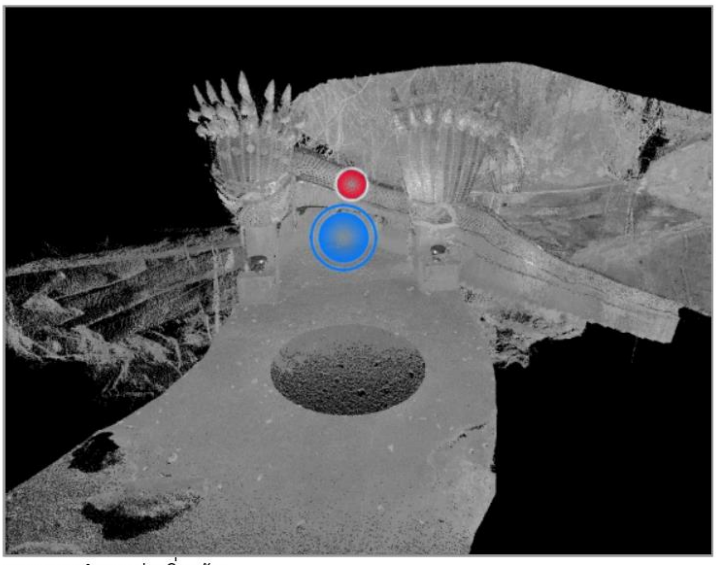


View 3 มุมมองภาพด้านขวา

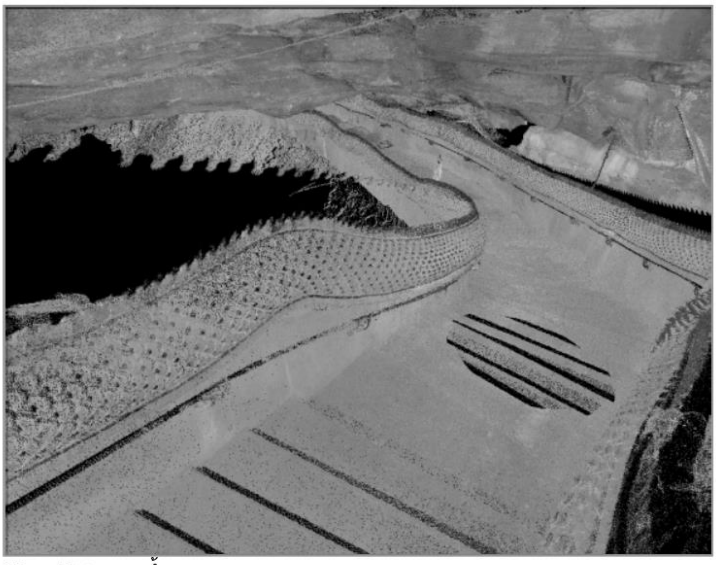
View 4 มุมมองภาพด้ายหน้า



View 5 มุมมองภาพด้านหลัง

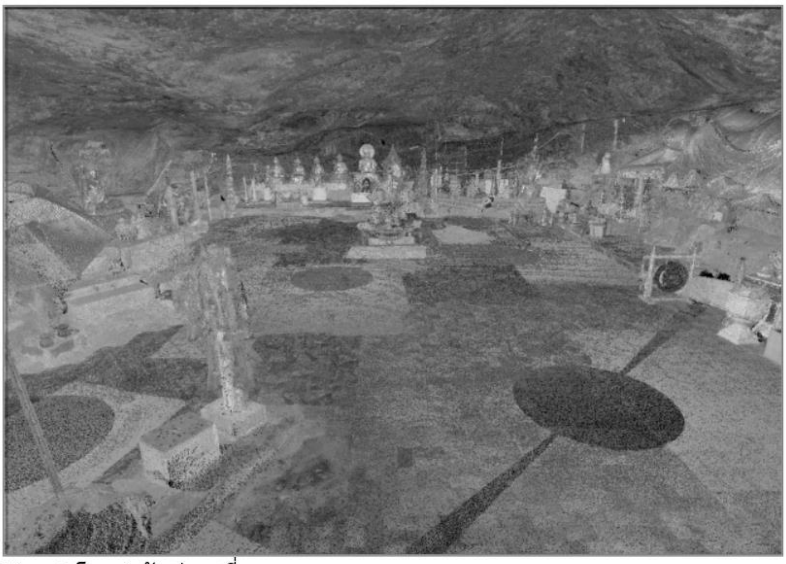


View 6 ตำแหน่งเริ่มต้น



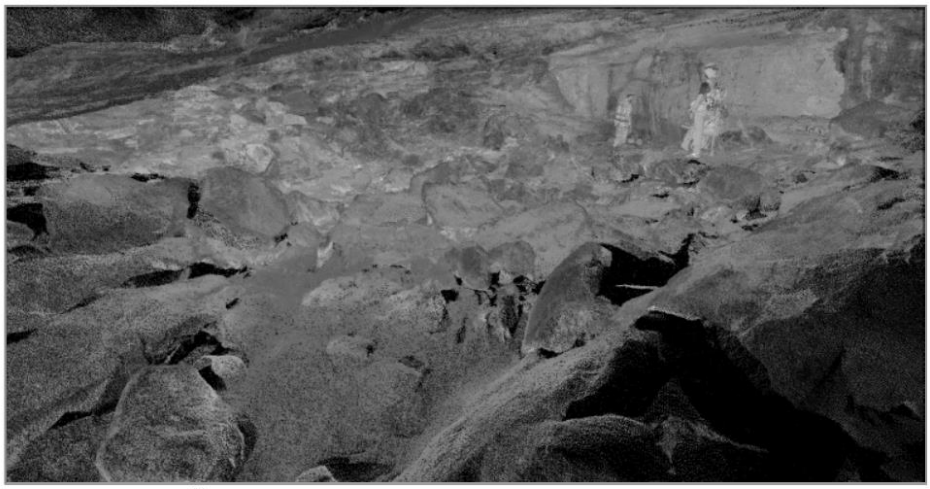
View 7 ทางลงถ้ำ

View 8 ปากทางเข้าถ้ำ



View 9 โถง 1 นักท่องเที่ยว

View 10 โถง 2



View 11 จุดเนินหินซับซ้อน.png

View 12 โถง 3 มีลักษณะที่ใหญ่.png

View 13 จุดสิ้นสุด.png

ภาคผนวก ค

ต้นรหัสซอฟต์แวร์แสดงผลแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริง

1. chiang_dao.html – ไฟล์แสดงผลแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว จ.เชียงใหม่

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
	<meta charset="utf-8">
	<meta name="description" content="">
	<meta name="author" content="">
	<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0, user-scalable=no">
	<title>แบบจำลองเสมือนจริงถ้ำเชียงดาว</title>
	<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/potree/potree.css">
	<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.css">
	<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/openlayers3/ol.css">
	<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/spectrum/spectrum.css">
	<link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jstree/themes/mixed/style.css">
	<link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
	<link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
	<link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Prompt:wght@100&display=swap"
rel="stylesheet">
	<style>
		body {
			font-family: 'Prompt', sans-serif;
		}
	</style>
</head>

<body>
	<script src="./libs/jquery/jquery-3.1.1.min.js"></script>
	<script src="./libs/spectrum/spectrum.js"></script>
	<script src="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.js"></script>
	<script src="./libs/other/BinaryHeap.js"></script>
	<script src="./libs/tween/tween.min.js"></script>
	<script src="./libs/d3/d3.js"></script>
	<script src="./libs/proj4/proj4.js"></script>
	<script src="./libs/openlayers3/ol.js"></script>
	<script src="./libs/i18next/i18next.js"></script>
	<script src="./libs/jstree/jstree.js"></script>
	<script src="./libs/potree/potree.js"></script>
	<script src="./libs/plasio/js/laslaz.js"></script>

	<!-- INCLUDE ADDITIONAL DEPENDENCIES HERE -->
	<!-- INCLUDE SETTINGS HERE -->

	<div class="potree_container" style="position: absolute; width: 100%; height: 100%; left: 0px; top: 0px;
">
		<div id="potree_render_area" style="background-image: url('./background.jpg');"></div>
		<div id="potree_sidebar_container"> </div>
	</div>
	<script>

	window.viewer = new Potree.Viewer(document.getElementById("potree_render_area"));

	viewer.setEDLEnabled(true);
	viewer.setFOV(60);
	viewer.setPointBudget(2_000_000);

	viewer.loadSettingsFromURL();

	viewer.loadGUI(() => {
	viewer.setLanguage('en');
		$("#menu_tools").next().show();
		$("#menu_clipping").next().show();
	});

	viewer.setDescription('แบบจำลองเสมือนจริงของถ้ำเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ที่ขนาด 1:64');

	let scene = new Potree.Scene();
	viewer.setScene(scene);
	viewer.setControls(viewer.earthControls);
	Potree.loadPointCloud("./chiang_dao_1_64_converted/metadata.json","chiang_dao",e => {
		let pointcloud = e.pointcloud;
```

```
                let material = pointcloud.material;
                material.size = 1;
                material.pointSizeType = Potree.PointSizeType.ADAPTIVE;
                material.shape = Potree.PointShape.SQUARE;
                material.activeAttributeName = "elevation";

                scene.addPointCloud(pointcloud);
                scene.view.setView(
                        [2144524.209, 492346.900, 461.815],
                        [2144089.414, 492651.996, 401.217]
                        );

                let howtoMouse = new Potree.Annotation({
                        position: [2144432.818, 492440.878, 426.648],
                        title: 'วิธีการใช้เม้าส์สำรวจถ้ำ',
                        cameraPosition: [2144455.319, 492424.723, 437.954],
                        cameraTarget: [2144436.618, 492437.845, 435.348],
                        description: `<ul><li>กดปุ่มซ้ายค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเคลื่อนที่ในแนวราบตามแนว mouse pointer <li>กดปุ่มขวาค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเป็นการหมุนรอบ mouse pointer<li>ปรับมุมในแนวราบให้เหมาะสม เลื่อน mouse pointer ไว้ที่จุดที่ต้องการเดินเข้าไปหา แล้วทำการ scroll mouse เข้า-ออกเพื่อเดินเข้า-ออกไปยังจุดที่วาง mouse pointer ไว้</li>`
                                        });
                let mainEntrance = new Potree.Annotation({
                        position: [2144347.680, 492511.045, 437.071],
                        title: 'ทางเข้าถ้ำ',
                        cameraPosition: [2144350.827, 492508.657, 435.884],
                        cameraTarget: [2144344.951, 492514.038, 437.556],
                        description: `ทางเข้าถ้ำเชียงดาว`
                });
                let maEntrance = new Potree.Annotation({
                        position: [2144312.336, 492495.092, 431.963],
                        title: 'ทางเข้าถ้ำม้า',
                        cameraPosition: [2144317.410, 492507.752, 432.989],
                        cameraTarget: [2144306.374, 492495.829, 425.506],
                        description: `ทางเข้าถ้ำม้า ภายในถ้ำเชียงดาว`
                        });
                let pranonEntrance = new Potree.Annotation({
                        position: [2144302.265, 492505.612, 431.237],
                        title: 'ถ้ำพระนอน',
                        cameraPosition: [2144319.668, 492500.446, 432.328],
                        cameraTarget: [2144307.211, 492499.401, 427.090],
                        description: `ทางเข้าถ้ำพระนอน ภายในถ้ำเชียงดาว`
                        });
                let namEntrance = new Potree.Annotation({
                        position: [2144260.134, 492744.071, 430.569],
                        title: 'ถ้ำน้ำ',
                        cameraPosition: [2144258.175, 492732.678, 430.400],
                        cameraTarget: [2144253.912, 492746.898, 427.003],
                        description: `ทางเข้าถ้ำน้ำ ถายในถ้ำเชียงดาว`
                        });
                let plate1 = new Potree.Annotation({
                        position: [2144311.501, 492505.569, 430.376],
                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1',
                        cameraPosition: [2144316.455, 492501.150, 432.552],
                        cameraTarget: [2144310.774, 492505.157, 430.739],
                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1<a href="../chiangdao_google_map.html"><img src="plate_chiangdao1.jpg" width="360" height="180"></a>
                        <ul><li>Latitude : 19.3939850415
                        <li>Longitude : 98.9274648373
                        <li>Ceiling thickness : 23.4 เมตร
                        </ul>`
                        });
                let plate2 = new Potree.Annotation({
                        position: [2144253.417, 492538.199, 431.997],
                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2',
                        cameraPosition: [2144261.792, 492537.857, 432.224],
                        cameraTarget: [2144253.786, 492539.849, 431.252],
                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2<a href="../chiangdao_google_map.html"><img src="plate_chiangdao2.jpg" width="360" height="180"></a>
                        <ul><li>Latitude : 19.3941952102
                        <li>Longitude : 98.9269828088
                        <li>Ceiling thickness : 46.0 เมตร
```

```
                    </ul>`
                    });
            let plate3 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144305.254, 492638.157, 431.323],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3',
                    cameraPosition: [2144310.500, 492635.838, 431.634],
                    cameraTarget: [2144305.059, 492637.968, 430.321],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao3.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3951932983
                    <li>Longitude : 98.9271134934
                    <li>Ceiling thickness : 26.8 เมตร
                    </ul>`
                    });
            let plate4 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144253.619, 492739.655, 429.992],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4',
                    cameraPosition: [2144259.463, 492739.863, 431.530],
                    cameraTarget: [2144253.429, 492740.839, 428.584],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao4.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3958874557
                    <li>Longitude : 98.9265859879
                    <li>Ceiling thickness : 58.1 เมตร
                    </ul>`
                    });
            let plate5 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144246.457, 492776.368, 430.655],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5',
                    cameraPosition: [2144246.945, 492783.704, 430.497],
                    cameraTarget: [2144243.321, 492777.821, 428.946],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao5.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3963633501
                    <li>Longitude : 98.9263582351
                    <li>Ceiling thickness : 85.0 เมตร
                    </ul>`
                    });
            let plate6 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144231.339, 492801.077, 431.186],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6',
                    cameraPosition: [2144231.647, 492804.674, 432.722],
                    cameraTarget: [2144232.159, 492800.449, 431.393],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao6.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3965501638
                    <li>Longitude : 98.9261810119
                    <li>Ceiling thickness : 92.9 เมตร
                    </ul>`
                    });
            let plate7 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144080.998, 492768.938, 428.475],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่7',
                    cameraPosition: [2144084.606, 492765.655, 428.845],
                    cameraTarget: [2144080.737, 492769.286, 427.598],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 7<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao7.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3957147306
                    <li>Longitude : 98.9252314074
                    <li>Ceiling thickness : 112.9 เมตร
                    </ul>`
                    });
            let plate8 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144291.200, 492473.385, 442.650],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 8',
                    cameraPosition: [2144292.437, 492480.066, 442.074],
                    cameraTarget: [2144289.861, 492476.810, 441.582],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 8<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao8.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3937186987
                    <li>Longitude : 98.9272172245
                    <li>Ceiling thickness : 27.2 เมตร
```

```
                    </ul>`
                    });
                let plate9 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144264.859, 492493.940, 443.989],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 9',
                    cameraPosition: [2144265.860, 492499.965, 444.927],
                    cameraTarget: [2144265.011, 492494.009, 442.958],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 9<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao9.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3937598500
                    <li>Longitude : 98.9269676131
                    <li>Ceiling thickness : 30.3 เมตร
                    </ul>`
                    });
                let plate10 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144191.768, 492557.044, 444.679],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 10',
                    cameraPosition: [2144195.982, 492557.781, 445.278],
                    cameraTarget: [2144189.969, 492558.048, 442.575],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 10<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao10.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3942140840
                    <li>Longitude : 98.9262622721
                    <li>Ceiling thickness : 70.2 เมตร
                    </ul>`
                    });
                let plate11 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144163.795, 492541.783, 445.850],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 11',
                    cameraPosition: [2144166.532, 492535.034, 444.982],
                    cameraTarget: [2144168.576, 492542.810, 444.902],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 11<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao11.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3938673800
                    <li>Longitude : 98.9261133799
                    <li>Ceiling thickness : 83.5 เมตร
                    </ul>`
                    });
                let plate12 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144076.547, 492505.394, 450.093],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 12',
                    cameraPosition: [2144069.298, 492506.305, 449.243],
                    cameraTarget: [2144075.674, 492502.665, 449.137],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 12<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao12.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3932616021
                    <li>Longitude : 98.9255473764
                    <li>Ceiling thickness : 134.3 เมตร
                    </ul>`
                    });
                let plate13 = new Potree.Annotation({
                    position: [2144078.438, 492509.235, 450.367],
                    title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 13',
                    cameraPosition: [2144074.725, 492511.667, 450.283],
                    cameraTarget: [2144078.804, 492509.359, 448.596],
                    description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 13<a href="../chiangdao_google_map.html"><img
src="plate_chiangdao13.jpg" width="360" height="180"></a>
                    <ul><li>Latitude : 19.3942906849
                    <li>Longitude : 98.9267172359
                    <li>Ceiling thickness : 58.9 เมตร
                    </ul>`
                    });
                scene.annotations.add(mainEntrance);
                scene.annotations.add(maEntrance);
                scene.annotations.add(pranonEntrance);
                scene.annotations.add(namEntrance);
                scene.annotations.add(howtoMouse);
                scene.annotations.add(plate1);
                scene.annotations.add(plate2);
                scene.annotations.add(plate3);
                scene.annotations.add(plate4);
                scene.annotations.add(plate5);
```

```
                scene.annotations.add(plate6);
                scene.annotations.add(plate7);
                scene.annotations.add(plate8);
                scene.annotations.add(plate9);
                scene.annotations.add(plate10);
                scene.annotations.add(plate11);
                scene.annotations.add(plate12);
                scene.annotations.add(plate13);
        });
</script>
</body>

</html>
```

2. patihan.html – ไฟล์แสดงผลแบบจำลอง 3 มิติเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์ จ.อุบลราชธานี

```
<!DOCTYPE html>

<html lang="en">

<head>

        <meta charset="utf-8">

        <meta name="description" content="">

        <meta name="author" content="">

        <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0, user-scalable=no">

        <title>แบบจำลองถ้ำปาฏิหาริย์เสมือนจริง</title>

        <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/potree/potree.css">

        <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.css">

        <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/openlayers3/ol.css">

        <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/spectrum/spectrum.css">

        <link rel="stylesheet" type="text/css" href="./libs/jstree/themes/mixed/style.css">

        <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">

        <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>

        <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Prompt:wght@100&display=swap"
rel="stylesheet">

        <style>

                body {

                        font-family: 'Prompt', sans-serif;

                }

        </style>

</head>


<body>

        <script src="./libs/jquery/jquery-3.1.1.min.js"></script>

        <script src="./libs/spectrum/spectrum.js"></script>

        <script src="./libs/jquery-ui/jquery-ui.min.js"></script>

        <script src="./libs/other/BinaryHeap.js"></script>

        <script src="./libs/tween/tween.min.js"></script>
```

```
		<script src="./libs/d3/d3.js"></script>
		<script src="./libs/proj4/proj4.js"></script>
		<script src="./libs/openlayers3/ol.js"></script>
		<script src="./libs/i18next/i18next.js"></script>
		<script src="./libs/jstree/jstree.js"></script>
		<script src="./libs/potree/potree.js"></script>
		<script src="./libs/plasio/js/laslaz.js"></script>
		<!-- INCLUDE ADDITIONAL DEPENDENCIES HERE -->
		<!-- INCLUDE SETTINGS HERE -->
		<div class="potree_container" style="position: absolute; width: 100%; height: 100%; left: 0px; top: 0px;
">
			<div id="potree_render_area" style="background-image:
url('../build/potree/resources/images/background.jpg');"></div>
			<div id="potree_sidebar_container"> </div>
		</div>
		<script>
			window.viewer = new Potree.Viewer(document.getElementById("potree_render_area"));
			viewer.setEDLEnabled(true);
			viewer.setFOV(60);
			viewer.setPointBudget(2_000_000);
			viewer.loadSettingsFromURL();

			viewer.setDescription(`
			แบบจำลองเสมือนจริงของถ้ำปาฏิหาริย์ จังหวัดอุบลราชธานี ที่ขนาด 1:64
			`);
			viewer.loadGUI(() => {
				viewer.setLanguage('en');
				//$("#menu_appearance").next().show();
				$("#menu_tools").next().show();
				//$("#menu_clipping").next().show();
				//viewer.toggleSidebar();
			});
			let scene = new Potree.Scene();
			viewer.setScene(scene);
			viewer.setControls(viewer.earthControls);
			Potree.loadPointCloud("./pointclouds/patihan/metadata.json", "patihan", e => {
				let pointcloud = e.pointcloud;
				let material = pointcloud.material;
				material.size = 1;
```

```
material.pointSizeType = Potree.PointSizeType.ADAPTIVE;
material.shape = Potree.PointShape.SQUARE;
material.activeAttributeName = "elevation";


scene.addPointCloud(pointcloud);
scene.view.setView(
    [12.243, -16.496, 3.353],
    [-11.242, 0.861, -6.594]
);
//viewer.fitToScreen();
let howtoMouse = new Potree.Annotation({
        position: [6.033, -3.387, -1.480],
        title: 'วิธีการใช้เม้าส์สำรวจถ้ำ2',
        cameraPosition: [9.929, -5.828, 2.651],
        cameraTarget: [2.699, -3.566, -1.238],
        description: `<ul><li>กดปุ่มซ้ายค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเคลื่อนที่ในแนวราบตามแนว mouse pointer <li>กดปุ่มขวาค้างไว้ (จะแสดงทรงกลมสีรุ้ง ณ จุด mouse pointer) แล้วเลื่อนเม้าส์ จะเป็นการหมุนรอบ mouse pointer<li>ปรับมุมในแนวราบให้เหมาะสม เลื่อน mouse pointer ไว้ที่จุดที่ต้องการเดินเข้าไปหา แล้วทำการ scroll mouse เข้า-ออกเพื่อเดินเข้า-ออกไปยังจุดที่วาง mouse pointer ไว้</li>`
    });
let plate1 = new Potree.Annotation({
        position: [-64.685, 18.789, -12.296],
        title: "พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1",
        cameraPosition: [-60.038, 20.880, -12.294],
        cameraTarget: [-61.606, 20.323, -12.285],
        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1<a href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_01.jpg" width="360" height="180"></a>
        <ul><li>Latitude : 15.60129859
            <li>Longitude : 105.5731677
            <li>Ceiling thickness : 20.812 เมตร
        </ul>`
    });
let plate2 = new Potree.Annotation({
        position: [-97.078, 26.700, -13.129],
        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2',
        cameraPosition: [-95.945, 29.575, -12.774],
        cameraTarget: [-97.484, 26.650, -13.766],
        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2<a href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_02.jpg" width="360" height="180"></a>
```

```
                                        <ul><li>Latitude : 15.60147536
                                                <li>Longitude : 105.5728436
                                                <li>Ceiling thickness : 23.87 เมตร
                                                        </ul>`

                                });
                        let plate3 = new Potree.Annotation({
                                        position: [-134.771, 47.723, -12.669],
                                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3',
                                        cameraPosition: [-134.520, 42.128, -13.476],
                                        cameraTarget: [-134.591, 44.521, -13.372],
                                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3<a
href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_03.jpg" width="360" height="180"></a>
                                        <ul><li>Latitude : 15.60151522
                                                <li>Longitude : 105.5725939
                                                <li>Ceiling thickness : 25.41 เมตร
                                        </ul>`
                                });
                        let plate4 = new Potree.Annotation({
                                        position: [-174.849, 54.758, -13.789],
                                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4',
                                        cameraPosition: [-174.573, 58.631, -13.724],
                                        cameraTarget: [-174.757, 55.664, -13.948],
                                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4<a
href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_04.jpg" width="360" height="180"></a>
                                        <ul><li>Latitude : 15.60161883
                                                <li>Longitude : 105.5723230
                                                <li>Ceiling thickness : 26.615 เมตร
                                        </ul>`
                                });
                        let plate5 = new Potree.Annotation({
                                        position: [-280.324, 96.058, -18.026],
                                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5',
                                        cameraPosition: [-270.696, 100.858, -16.711],
                                        cameraTarget: [-276.585, 97.288, -17.157],
                                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5<a
href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_05.jpg" width="360" height="180"></a>
                                        <ul><li>Latitude : 15.60182504
                                                <li>Longitude : 105.5715980
                                                <li>Ceiling thickness : 26.447 เมตร
```

```
                                        </ul>`
                                    });
                                let plate6 = new Potree.Annotation({
                                        position: [-336.505, 102.257, -21.764],
                                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6',
                                        cameraPosition: [-335.452, 98.947, -21.006],
                                        cameraTarget: [-335.845, 100.530, -21.336],
                                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6<a
href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_06.jpg" width="360" height="180"></a>
                                        <ul><li>Latitude : 15.60162519
                                            <li>Longitude : 105.5711007
                                            <li>Ceiling thickness : 28.263 เมตร
                                        </ul>`
                                    });
                                let plate7 = new Potree.Annotation({
                                        position: [-382.979, 88.079, -24.563],
                                        title: 'พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่7',
                                        cameraPosition: [-379.684, 89.977, -24.615],
                                        cameraTarget: [-380.542, 89.481, -24.739],
                                        description: `พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 7<a
href="../patihan_google_map.html"><img src="plate_patihan_07.jpg" width="360" height="180"></a>
                                        <ul><li>Latitude : 15.60154472
                                            <li>Longitude : 105.5708654
                                            <li>Ceiling thickness : 31.121 เมตร
                                        </ul>`
                                    });
                                scene.annotations.add(howtoMouse);
                                scene.annotations.add(plate1);
                                scene.annotations.add(plate2);
                                scene.annotations.add(plate3);
                                scene.annotations.add(plate4);
                                scene.annotations.add(plate5);
                                scene.annotations.add(plate6);
                                scene.annotations.add(plate7);
                        });
            </script>
    </body>
</html>
```

3. ไฟล์ chiangdao_google_map.html – แสดงพิกัดป้าย GPS บน Google Map

```
<!DOCTYPE html>

<html>

   <head>

      <title>พิกัดภายในถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่</title>

      <meta charset="utf-8">

      <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">

      <link rel="stylesheet" href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.5.3/dist/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-TX8t27EcRE3e/ihU7zmQxVncDAy5uIKz4rEkgIXeMed4M0jlfIDPvg6uqKI2xXr2"
crossorigin="anonymous">

         <link rel="stylesheet" href="cave_radio.css">

      <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">

      <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>

      <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Prompt:wght@100;400&display=swap"
rel="stylesheet">

      <link href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.1.3/dist/css/bootstrap.min.css" rel="stylesheet"
integrity="sha384-1BmE4kWBq78iYhFldvKuhfTAU6auU8tT94WrHftjDbrCEXSU1oBoqyl2QvZ6jIW3"
crossorigin="anonymous">

      <style>

         /* Add some padding on document's body to prevent the content

         to go underneath the header and footer */

         body{

            font-family: 'Prompt', sans-serif;

            background-color: #242424;

         }

         html {

            position: relative;

            min-height: 100%;

            }

         body {

            /* Margin bottom by footer height */

            margin-bottom: 20px;

            }

         footer {

            position: absolute;

            bottom: 0;

            width: 100%;

            /* Set the fixed height of the footer here */

            height: 8vh;

            background-color: #242424;
```

```
            }
        </style>
    </head>
<body>
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.1.3/dist/js/bootstrap.bundle.min.js" integrity="sha384-ka7Sk0Gln4gmtz2MlQnikT1wXgYsOg+OMhuP+IlRH9sENBO0LRn5q+8nbTov4+1p" crossorigin="anonymous"></script>
    <div class="container">
        <div class="row" style="padding: 10px;">
          <div class="col">
            <img src="NBTC.png" width="60px" height="80px">   <img src="ktps.png" width="60px" height="80px">
          </div>
          <div class="col-md-auto">
            <h2 class="lead text-white" style="padding: 10px; text-align: center;";><strong><a href="cave_radio.html">โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสาร การสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ</strong></h2></a>
            <div style="color: white; text-align: center;padding: 5px;"><a href="./chiang_dao/chiang_dao.html">พิกัดละติจูด ลองจิจูดและความหนาเพดานถ้ำเชียงดาว อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่</a></div>
          </div>
          <div class="col" style="padding: 10px;">
            <img src="SUT.png" width="60px" height="80px">   <img src="DNPWP.png" width="80px" height="80px">
          </div>
        </div>
      </div>
    <div id="map" style="width:100%;height:80vh;"></div>
    <footer>
        <div class="container">
          <p class="text-muted" style="text-align:center;padding-top:10px;">สนับสนุนโดย กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ<br>
            สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.)
          </p>
        </div>
      </footer>
<script>
var locations = [
          ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img src="./ChiangDao16/plate_chiangdao1.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3939850415, 98.9274648373</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 23.387 เมตร</div>', 19.3939850415, 98.9274648373, 1],
          ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img src="./ChiangDao16/plate_chiangdao2.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3941952102, 98.9269828088</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 45.971 เมตร</div>', 19.3941952102, 98.9269828088, 2],
```

```
        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao3.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3951932983,
98.9271134934</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 26.783 เมตร</div>', 19.3951932983, 98.9271134934, 3],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao4.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3958874557,
98.9265859879</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 58.114 เมตร</div>', 19.3958874557, 98.9265859879, 4],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao5.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3963633501,
98.9263582351</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 85.047 เมตร</div>', 19.3963633501, 98.9263582351, 5],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao6.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3965501638,
98.9261810119</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 92.946 เมตร</div>', 19.3965501638, 98.9261810119, 6],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 7</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao7.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3957147306,
98.9252314074</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 112.94 เมตร</div>', 19.3957147306, 98.9252314074, 7],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 8</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao8.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3937186987,
98.9272172245</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 27.229 เมตร</div>', 19.3937186987, 98.9272172245, 8],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 9</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao9.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3937598500,
98.9269676131</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 30.263 เมตร</div>', 19.3937598500, 98.9269676131, 9],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 10</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao10.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3942140840,
98.9262622721</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 70.222 เมตร</div>', 19.3942140840, 98.9262622721, 10],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 11</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao11.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3938673800,
98.9261133799</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 83.463 เมตร</div>', 19.3938673800, 98.9261133799, 11],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 12</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao12.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3932616021,
98.9255473764</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 134.251 เมตร</div>', 19.3932616021, 98.9255473764, 12],

        ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 13</strong><div><a href="./chiang_dao/chiangdao.html"><img
src="./ChiangDao16/plate_chiangdao13.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 19.3942906849,
98.9267172359</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 58.852 เมตร</div>', 19.3942906849, 98.9267172359, 13],

      ];
function myMap() {
   var mapProp= {
   center:new google.maps.LatLng(19.39493114694712, 98.9264109977173),
   zoom:18,
   mapTypeId: google.maps.MapTypeId.HYBRID
   };
   var map = new google.maps.Map(document.getElementById("map"),mapProp);
   var infowindow = new google.maps.InfoWindow();
   var marker, i;
   for (i = 0; i < locations.length; i++) {
      marker = new google.maps.Marker({
         position: new google.maps.LatLng(locations[i][1], locations[i][2]),
         map: map
```

```
        });


        google.maps.event.addListener(marker, 'click', (function (marker, i) {
            return function () {
                infowindow.setContent(locations[i][0]);
                infowindow.open(map, marker);
            }
        })(marker, i));
    }
}
</script>
<script
src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AIzaSyBXguyr14Y_83dhcDKjQzHmqmw26GZ3Tsw&callback=myMap"></script>
</body>
</html>
```

4. ไฟล์ patihan_google_map.html – แสดงพิกัดป้าย GPS บน Google Map

```
<!DOCTYPE html>
<html>
    <head>
        <title>พิกัดภายในถ้ำปาฏิหารย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี</title>
        <meta charset="utf-8">
        <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
        <link rel="stylesheet" href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@4.5.3/dist/css/bootstrap.min.css"
integrity="sha384-TX8t27EcRE3e/ihU7zmQxVncDAy5uIKz4rEkgIXeMed4M0jlfIDPvg6uqKI2xXr2"
crossorigin="anonymous">
            <link rel="stylesheet" href="cave_radio.css">
        <link rel="preconnect" href="https://fonts.googleapis.com">
        <link rel="preconnect" href="https://fonts.gstatic.com" crossorigin>
        <link href="https://fonts.googleapis.com/css2?family=Prompt:wght@100;400&display=swap"
rel="stylesheet">
        <link href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.1.3/dist/css/bootstrap.min.css" rel="stylesheet"
integrity="sha384-1BmE4kWBq78iYhFldvKuhfTAU6auU8tT94WrHftjDbrCEXSU1oBoqyl2QvZ6jIW3"
crossorigin="anonymous">
        <style>
            /* Add some padding on document's body to prevent the content
            to go underneath the header and footer */
            body{
                font-family: 'Prompt', sans-serif;
                background-color: #242424;
            }
```

```
        html {
            position: relative;
            min-height: 100%;
            }
        body {
            /* Margin bottom by footer height */
            margin-bottom: 20px;
            }
        footer {
            position: absolute;
            bottom: 0;
            width: 100%;
            /* Set the fixed height of the footer here */
            height: 8vh;
            background-color: #242424;
            }
    </style>
  </head>
<body>
  <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.1.3/dist/js/bootstrap.bundle.min.js" integrity="sha384-ka7Sk0Gln4gmtz2MlQnikT1wXgYsOg+OMhuP+IlRH9sENBO0LRn5q+8nbTov4+1p" crossorigin="anonymous"></script>

  <div class="container">
    <div class="row" style="padding: 10px;">
      <div class="col">
        <img src="NBTC.png" width="60px" height="80px">   <img src="ktps.png" width="60px" height="80px">
      </div>
      <div class="col-md-auto">
        <h2 class="lead text-white" style="padding: 10px; text-align: center;";><strong><a href="cave_radio.html">โครงการศึกษาแนวทางการใช้คลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสาร การสร้างแบบจำลองและระบุตำแหน่งในถ้ำ</strong></h2></a>
        <div style="color: white; text-align: center;padding: 5px;"><a href="./Patihan/patihan.html">พิกัดละติจูดลองจิจูดและความหนาเพดานถ้ำปฏิหารย์ อ.โขงเจียม จ.อุบลราชธานี</a></div>
      </div>
      <div class="col" style="padding: 10px;">
        <img src="SUT.png" width="60px" height="80px">   <img src="DNPWP.png" width="80px" height="80px">
      </div>
    </div>
```

```
    </div>

  <div id="map" style="width:100%;height:80vh;"></div>

  <footer>

    <div class="container">

      <p class="text-muted" style="text-align:center;padding-top:10px;">สนับสนุนโดย กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ<br>

        สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.)

      </p>

    </div>

  </footer>

<script>

var locations = [

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 1</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_01.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60129859, 105.5731677</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 20.812 เมตร</div>', 15.60129859, 105.5731677, 1],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 2</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_02.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60147536, 105.5728436</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 23.87 เมตร</div>', 15.60147536, 105.5728436, 2],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 3</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_03.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60151522, 105.5725939</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 25.41 เมตร</div>', 15.60151522, 105.5725939, 3],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 4</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_04.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60161883, 105.5723230</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 26.615 เมตร</div>', 15.60161883, 105.5723230, 4],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 5</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_05.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60182504, 105.5715980</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 26.447 เมตร</div>', 15.60182504, 105.5715980, 5],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 6</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_06.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60162519, 105.5711007</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 28.263 เมตร</div>', 15.60162519, 105.5711007, 6],

      ['<strong>พิกัดละติจูด ลองจิจูดที่ 7</strong><div><a href="./Patihan/patihan.html"><img src="./Patihan/plate_patihan_07.jpg" height="160" width="320"></a></div><div>พิกัด : 15.60154472, 105.5708654</div><div>ความหนาเพดานถ้ำ : 31.121 เมตร</div>', 15.60154472, 105.5708654, 7],

    ];

function myMap() {

  var mapProp= {

  center:new google.maps.LatLng(15.600766388224137, 105.57235770476989),

  zoom:18,

  mapTypeId: google.maps.MapTypeId.HYBRID

  };

  var map = new google.maps.Map(document.getElementById("map"),mapProp);

  var infowindow = new google.maps.InfoWindow();

  var marker, i;

  for (i = 0; i < locations.length; i++) {
```

```
        marker = new google.maps.Marker({
            position: new google.maps.LatLng(locations[i][1], locations[i][2]),
            map: map
        });
        google.maps.event.addListener(marker, 'click', (function (marker, i) {
            return function () {
                infowindow.setContent(locations[i][0]);
                infowindow.open(map, marker);
            }
        })(marker, i));
    }
}
</script>


<script
src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=AIzaSyBXguyr14Y_83dhcDKjQzHmqmw26GZ3Tsw&callback=myMap"></script>
</body>
</html>
```

หมายเหตุ ต้นรหัสสำหรับแสดงผลแบบจำลองถ้ำเชียงดาวและถ้ำปาฏิหาริย์ในสเกล 1:16 มีรายละเอียดภายในไฟล์เหมือนกัน ต่างกันที่ชื่อไฟล์ข้อมูล point cloud เท่านั้น จึงไม่ได้นำมาแสดงไว้ที่ภาคผนวกนี้