แบบจำลองความจริงเสริม (AR) สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน และการประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลองด้วย FUZZY AHP

Augmented Reality Model for Underground Construction of Electricity System and the Evaluation of Model Adoption using FUZZY AHP

สรรเพชร คงถาวร[1,2] ฆนิศา รุ่งแจ้ง[1,*] และ พงษ์ศักดิ์ สุริยวนากุล[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
**Corresponding author; E-mail address: fengksr@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

แบบจำลองความจริงเสริม (Augmented Reality, AR) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการวิเคราะห์และแสดงผลที่มีการประยุกต์ใช้ในหลายศาสตร์รวมทั้งการวางแผนและการจัดการด้านโครงสร้างพื้นฐาน การนำ AR มาใช้ในงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินนอกจากจะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางวิศวกรรมเพื่อช่วยลดความสูญเสียจากอุบัติเหตุและความล่าช้าระหว่างการก่อสร้างแล้วยังเป็นการช่วยส่งเสริมการพัฒนาพื้นที่และความน่าอยู่ตามแนวคิดการพัฒนาเมืองอัจฉริยะตามยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2561-2580) และยุทธศาสตร์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองความจริงเสริม (AR) สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน และเพื่อทำการประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลองโดยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Fuzzy AHP) งานวิจัยนี้สามารถนำเสนอแบบจำลอง AR สำหรับการก่อสร้างใต้ดินทั้งในระยะก่อนการก่อสร้าง ระยะการก่อสร้าง และระยะหลังการก่อสร้างตามข้อกำหนดในการปฏิบัติงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง แบบจำลอง AR ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปช่วยในการจัดการและการแสดงผลขั้นตอนการก่อสร้างที่ซับซ้อนซึ่งเป็นประโยชน์ทั้งในงานก่อสร้างและงานอบรมในงานระบบไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีการเจาะเพื่อดึงท่อ (HDD) ในจังหวัดเพชรบุรี สำหรับการประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลองนั้นได้ทำการวิเคราะห์ Fuzzy AHP เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยในการเลือกใช้และวิเคราะห์ทางเลือกของแบบจำลองโดยวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ 30 ท่าน จาก กฟภ. และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ การประปาส่วนภูมิภาค องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น ผลการวิเคราะห์การเลือกใช้แบบจำลองพบว่าปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้ ได้แก่ โปรแกรมและคอมพิวเตอร์ องค์กร การนำไปใช้ และความสามารถของบุคลากรตามลำดับ แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินได้แก่ แบบจำลองที่ผสมผสานแบบ 3 มิติและ AR รองลงมาเป็นแบบจำลอง 2 มิติ แบบจำลองที่ผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ และแบบจำลอง AR ตามลำดับ ทั้งนี้การพัฒนา AR ควรพิจารณาระดับการพัฒนาให้สอดคล้องกับความถูกต้องของแบบจำลองและการวางแนวสาธารณูปโภคที่เหมาะสมกับการใช้งาน การร่วมกันพัฒนาและเชื่อมโยงฐานข้อมูลโครงข่ายโครงสร้างพื้นฐานของประเทศจะช่วยให้มีการใช้เทคโนโลยีและแบบจำลองอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ความจริงเสริม (AR), งานก่อสร้างใต้ดิน, เคเบิลใต้ดิน, กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่

Abstract

Augmented Reality (AR) modeling is recognized as a promising analysis tool and visualization technology of extended reality application in many practices including infrastructure planning and management. Adopting AR technology for underground construction of electrical system not only offers an engineering model development to potentially reduce the economics losses from accidents and work zone delay but also provides strategic response to support the eco-friendly development and livability in compliance with smart city concept in the National Strategy (2018-2037) and Provincial Electricity Authority (PEA) strategics plan. This research aims to develop AR model for underground construction of electrical system and to evaluated AR model adoption by Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP). According to the development of AR model and its application of PEA construction project using Horizontal Directional Drilling (HDD) technique in Phetchaburi province, it is envisioned that this research presents AR model for underground construction in pre-construction, construction, and post-construction stages by taking account of the PEA requirements, and relevant guidelines. AR model can support all

construction stages and can visualize complex workplace situations in both construction and training paradigm. In order to evaluate AR model adoption, this research applied Fuzzy AHP to prioritize influencing factors and alternatives of model adoptions by analyzed survey data of 30 correspondents from PEA, Department of Highway, Department of Rural Road, National Telecom Public Company Limited, Provincial Waterworks Authority, Provincial Administrative Organization. As a result, the influencing factors affecting model adoption are hardware and software limitations, organizational factors, Implementation, and caliber or worker performances, respectively. The model integration of 3D and AR is the influential model for underground construction of electrical system with the highest priority of model deployment followed by 2D model, and the integrated 2D and 3D model, and AR model, respectively. It is challenging to balance the level of AR development and the accuracy of model and alignment. Sharing and integrating national infrastructure network and database can help increase the efficiency of model and technology adoption.
Keywords: Augmented Reality (AR), Underground Construction, Underground Cable, Fuzzy AHP

1. คำนำ

งานก่อสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเคเบิลใต้ดิน (Underground Cable System) เป็นอีกรูปแบบของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้านอกเหนือจากแบบขึงในอากาศ (Overhead Line System) ลักษณะโครงสร้างของสายเคเบิลใต้ดินประกอบด้วยส่วนที่เป็นฉนวนหลักและสิ่งห่อหุ้มภายนอก โดยใช้สายตัวนำหุ้มด้วยฉนวนให้ทนต่อไฟฟ้าที่มีพิกัดแรงดันสูงและสามารถติดตั้งใต้พื้นดินหรือใต้ทะเลได้โดยให้มีชั้นรองรับที่มั่นคง ระบบไฟฟ้าใต้ดินมีข้อดีที่ทำให้ดูเรียบร้อย ปลอดภัยจากฟ้าผ่าโดยตรงและให้ความปลอดภัยสูงแก่คนและสิ่งแวดล้อม [1] ภาครัฐได้กำหนดให้มีการนำระบบไฟฟ้าลงใต้ดินเพื่อปรับปรุงภูมิทัศน์บริเวณพื้นที่สำคัญในการจัดกิจกรรมของทุกจังหวัดทั่วประเทศ [2] ซึ่งสอดคล้องตามยุทธศาสตร์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ.2565-2569 ในวัตถุประสงค์เชิงยุทธศาสตร์ด้านระบบจำหน่ายที่มีประสิทธิภาพและสร้างความน่าเชื่อถือต่อผู้ใช้ไฟและทุกกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย [3] และยุทธศาสตร์ชาติชาติด้านการพัฒนาความมั่นคงพลังงานของประเทศ [4] อย่างไรก็ตามการก่อสร้างใต้ดิน (Underground Construction) เป็นงานที่มีความอันตรายและต้องมีการจัดการความปลอดภัย งานก่อสร้างมักมีพื้นที่ก่อสร้างขนาดใหญ่และต้องดำเนินการด้วยความรวดเร็วและมีระยะเวลาทำงานจำกัดเพราะมีผลกระทบต่อหลายฝ่าย ขั้นตอนการปฏิบัติงานมีความซับซ้อนและมักประสบกับสถานการณ์ที่คาดการณ์ได้ยาก ผลกระทบจากความผิดพลาดในการปฏิบัติงานอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงและมีมูลค่าความสูญเสียมากดังเช่นที่เหตุการณ์ในหลายประเทศ [5] ตัวอย่างงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินของ กฟภ. แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งต้องปฏิบัติงานในเวลากลางคืนและเกี่ยวข้องกับระบบสาธารณูปโภคใต้ดินที่มีอยู่หลากหลายที่รับผิดชอบโดยหลายหน่วยงาน ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยในการวางแผนและจัดการงานก่อสร้างในพื้นที่จริงที่สามารถใช้งานร่วมกับแบบและรายละเอียดทางวิศวกรรมได้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานก่อสร้างใต้ดิน



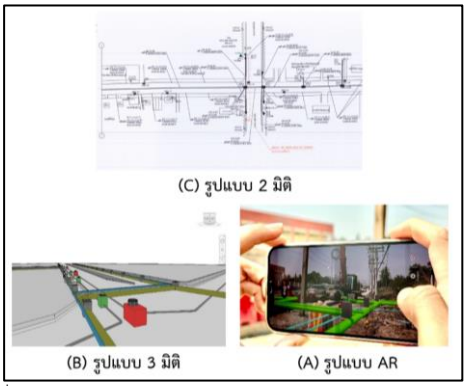
รูปที่ 1 งานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ความจริงเสริม (Augmented Reality, AR) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาและนำไปใช้ในหลายศาสตร์ สภาพความจริงเสริม หมายถึงสภาพที่อยู่ระหว่างขอบเขตของสภาพจริง (Real Environment, RE) และสภาพความเสมือน (Virtual Environment, VE) ซึ่งเป็นนิยามที่ใช้อ้างอิงอย่างแพร่หลาย [6-9] สภาพความจริงเสริม (AR) ได้ถูกกำหนดให้มีชื่อเรียกหลากหลายตามงานวิจัยและการใช้งาน เช่น Reality-Virtuality (RV) Mixed Reality MR) Virtual Reality (VR) [6] กำหนดให้สภาพจริง (RE) เป็นสภาพที่แสดงตามความจริงของโลกที่ไม่มีการจำลอง (Completely Unmodelled) และสภาพเสมือนเป็นสภาพที่แสดงการจำลองโดยสมบูรณ์ (Completely Modelled) โดยให้การจำลอง (Model) หมายถึงแบบจำลองเชิงปริมาณในทางคอมพิวเตอร์ (Quantitative Computer Model) กำหนดให้สภาพความจริงเสริมที่มีสภาพต่อเนื่อง (Continuum) ระหว่างสภาพจริงและสภาพเสมือน เรียกว่า Reality Virtuality (RV) ทั้งนี้ความหมายของ AR ที่นิยมใช้ในอีกความหมายหนึ่งกำหนด AR หมายถึงเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ในการซ้อนทับข้อมูลเสมือนที่สร้างขึ้นทางคอมพิวเตอร์เข้ากับสภาพแวดล้อมจริงเพื่อให้เกิดข้อมูลในสภาพแวดล้อมแบบผสมผสาน (Hybrid Environment) โดย AR สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการรับรู้อย่างอื่นร่วมด้วยทั้งการฟัง การสัมผัส และกลิ่น [9] งานวิจัยนี้ให้ AR มีความหมายตามนิยามดังกล่าวมา

เทคโนโลยี AR ในงานก่อสร้างและบำรุงรักษาสาธารณูปโภคใต้ดิน ก้าวหน้าไปอย่างมากนับตั้งแต่การใช้ AR ในงานทางการทหารในสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อแสดงภาพข้อมูลเรดาร์ผ่านกระจกของเครื่องบิน จากนั้นได้มีการใช้งาน AR ร่วมกับอุปกรณ์แสดงภาพแบบสวมศีรษะ (Head Mounted Display, HMD) จอภาพ และอุปกรณ์อีกหลายประเภท การพัฒนางานในห้องปฏิบัติการ งานบันเทิง รวมถึงการพัฒนาโดยองค์กรสำคัญ เช่น ระบบ Hybrid Synthetic vision ของ NASA แว่นตา Google Smart Glass เทคโนโลยี Microsoft HoloLens ระบบ Apple ARKit เป็นต้น [10] การใช้

AR ในศาสตร์ที่สำคัญที่มีความก้าวหน้าอย่างมาก ได้แก่ การแพทย์ [11] [12] [13] อุตสาหกรรมยานยนต์และการผลิต [14] [15] การทหาร [16] อุตสาหกรรมเกมส์ [17] รวมถึงงานด้านวิศวกรรม งานก่อสร้าง งานบำรุงรักษา และงานสาธารณูปโภคใต้ดิน [18-20] งานวิจัยมากมายแสดงว่าความท้าทายในการพัฒนา AR มีหลายประการ ได้แก่ การรวบรวมข้อมูล ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์ การวางแนวแบบจำลอง การติดตาม และการจัดการข้อมูล [19] งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบ AR สำหรับงานระบบไฟฟ้าใต้ดินและนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต1 ภาคใต้ และนำไปใช้ในการก่อสร้างเคเบิลใต้ดินในพื้นที่ดังกล่าวและอบรมสาธิตให้แก่บุคลากรในพื้นที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อให้เข้าการทำงานของแบบจำลอง AR ทั้งนี้เนื่องจากการก่อสร้างเคเบิลใต้ดินในพื้นที่ดังกล่าวยังไม่เคยมีการนำแบบจำลอง AR มาใช้ในการปฏิบัติงานมาก่อน ต่อจากนั้นเมื่อผู้เกี่ยวข้องได้เข้าใจกระบวนการของ AR ที่ได้พัฒนาขึ้นแล้วจึงได้ทำการรวบรวมข้อมูลการประเมินการเลือกใช้แบบจำลองจากผู้เชี่ยวชาญ

การเลือกใช้เทคโนโลยีในงานสาธารณูปโภคใต้ดิน หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใต้ดินมีหลายหน่วยงานตามคำสั่งคณะทำงานขับเคลื่อนแผนการดำเนินงานก่อสร้างตามแผนปรับปรุงระบบไฟฟ้าเป็นไฟฟ้าใต้ดิน 1 จังหวัด 1 ถนน เฉลิมพระเกียรติ [21] ประกอบด้วยกลุ่มหน่วยงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กลุ่มหน่วยงานทางและเจ้าของพื้นที่ ได้แก่ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคและส่วนเกี่ยวข้องในการดำเนินงาน ได้แก่ การประปาส่วนภูมิภาค และบริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) ซึ่งแต่ละหน่วยงานมีภารกิจต่างกันและมีการนำเทคโนโลยีที่หลากหลายมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยเทคโนโลยีในงานก่อสร้างเหล่านี้สามารถช่วยให้การบริหารโครงการงานก่อสร้างได้เป็นไปตามแผนงานที่วางไว้ ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและส่งผลให้งานก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [22] เช่น โปรแกรมออกแบบ 2 มิติ เทคโนโลยีสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling, BIM) เพื่อช่วยสร้างแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ ที่แสดงรายละเอียดและสื่อสารได้อย่างที่มีประสิทธิภาพ [23] [24] และความจริงเสริม (Augmented Reality, AR) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองฐานข้อมูลสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน

การเลือกใช้เทคโนโลยีในการก่อสร้างเป็นการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) ที่มีปัจจัยทั้งรูปธรรมและนามธรรมที่ไม่สามารถเปรียบเทียบในหน่วยวัดเดียวกัน (Incommensurate Criteria) ซึ่งงานวิจัยมากมายชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP) ที่พัฒนาขึ้นโดย Thomas L. Saaty เป็นวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ที่มีความเหมาะสมและการนำไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจในหลายศาสตร์ [25-27]

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองความจริงเสริม (AR) สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีเจาะดึงท่อลอดใต้ดิน (Horizontal Directional Drilling, HDD) และประเมินความเหมาะสมในการเลือกใช้แบบจำลอง โดยการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (Fuzzy Analytical Hierarchy Process)

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยมี 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1. การรวบรวมข้อมูลและการออกแบบกระบวนการพัฒนา AR 2. การนำเข้าข้อมูล 3. การพัฒนาแบบจำลอง AR และการแสดงผล 4. การประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลอง ด้วยการวิเคราะห์ Fuzzy AHP และการวิเคราะห์และสรุป ดังรูปที่ 3 แบบจำลอง AR สำหรับงานระบบไฟฟ้าใต้ดินที่พัฒนาขึ้น (ขั้นตอนที่ 3) ได้ถูกนำไปใช้งานในโครงการก่อสร้างของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคใต้ เขต1 และรวบรวมข้อมูลการประเมินการเลือกใช้แบบจำลองจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องจากหลายฝ่าย (ขั้นตอนที่ 4)



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

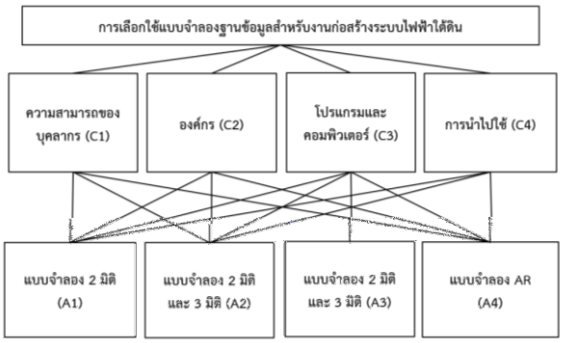
การประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลองเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้แบบจำลองและทางเลือกของแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยวิธีการวิเคราะห์ Fuzzy AHP ที่มีขั้นตอนหลัก ได้แก่ การกำหนดโครงสร้างการตัดสินใจตามทฤษฎีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ การสำรวจข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญด้วยแบบสอบถาม การวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องและค่าน้ำหนักของปัจจัยและทางเลือกของการตัดสินใจ

โครงสร้างการตัดสินใจตามกระบวนการ Fuzzy AHP เป็นโครงสร้างการตัดสินใจเป็นแบบลำดับชั้น (Hierarchy) มี 3 ระดับ ได้แก่ เป้าหมาย หลักเกณฑ์หรือปัจจัย และทางเลือก (ดังรูปที่ 4)

โครงสร้างระดับที่ 1 ได้แก่ **เป้าหมาย (Goal)** ได้แก่ การเลือกใช้นวัตกรรมแบบจำลองฐานข้อมูลสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน

โครงสร้างระดับที่ 2 ได้แก่ **หลักเกณฑ์ (Criteria)** เป็นปัจจัยในการจัดลำดับรูปแบบเทคโนโลยีสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ประกอบด้วย 4 ปัจจัย ได้แก่ **ความสามารถของบุคลากร** (Caliber or Worker Performances) หมายถึง บุคคล ผู้บริหาร วิศวกร ผู้ปฏิบัติงาน หรือผู้ที่มีความรู้ความสามารถในงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน **องค์กร** (Organization) หมายถึงการกำหนดนโยบายขององค์กรและเป้าหมายในอนาคตขององค์กรและการพัฒนาองค์กรในด้านเทคโนโลยี **โปรแกรมและคอมพิวเตอร์** (Hardware and Software Limitations) หมายถึงอุปกรณ์ เครื่องมือ โปรแกรม และเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน **การนำไปใช้** (Implementation) หมายถึงการเข้ากันได้ระหว่างบุคลากรกับเทคโนโลยีและองค์กรกับเทคโนโลยีในการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

โครงสร้างระดับที่ 3 ได้แก่ **ทางเลือกของแบบจำลองฐานข้อมูล** สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ 1) แบบจำลองฐานข้อมูลแบบ 2 มิติ 2) การผสมผสานแบบจำลองฐานข้อมูลแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ 3) การผสมผสานแบบจำลองฐานข้อมูลแบบ 3 มิติ และเทคโนโลยีความจริงเสริม และ4) แบบจำลองความจริงเสริม (AR)



รูปที่ 4 โครงสร้างกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

การเก็บข้อมูลการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ งานวิจัยนี้เก็บข้อมูลแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวข้องในงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน จำนวน 30 ท่าน ประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 15 ท่าน กรมทางหลวง 3 ท่าน กรมทางหลวงชนบท 3 ท่าน บริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) 3 ท่าน การประปาส่วนภูมิภาค 3 ท่าน และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น 3 ท่าน ในการวิเคราะห์การตัดสินใจได้จำแนกออกเป็น 3 กลุ่มตามหน้าที่ความรับผิดชอบในการดำเนินการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ กลุ่มหน่วยงานก่อสร้างเคเบิลใต้ดิน กลุ่มหน่วยงานทางและเจ้าของพื้นที่ และกลุ่มหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านมีประสบการณ์หน้าที่ความรับชอบที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน เช่น วิศวกร และช่างเทคนิค โดยมีประสบการณ์ทำงานเฉลี่ย 16 ปี การตัดสินใจเป็นการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญ (wi/wj) (Pairwise Comparison) ระหว่างปัจจัยหรือทางเลือกเป็นรายคู่ i และ j จำนวน n ปัจจัยและทางเลือก โดยใช้ตัวเลขแทนค่าความสำคัญเชิงเปรียบเทียบของส่วนย่อยในแต่ละระดับชั้น เมื่อพิจารณาภายใต้ปัจจัยหรือทางเลือกในระดับที่เหนือกว่าขึ้นไป ค่ามาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบระดับความสำคัญเป็นตัวเลข 1 ถึง 9 แสดงระดับความสำคัญเท่ากันจนถึงความสำคัญที่สูงกว่าสูงสุด (ดังตารางที่ 1) [26]

ตารางที่ 1 มาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบ

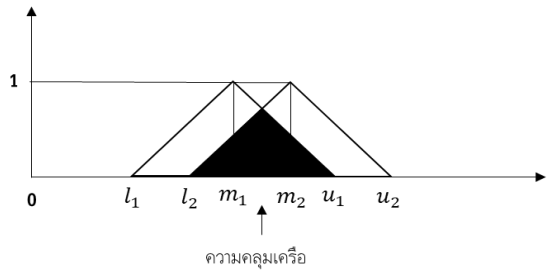
ระดับความความสำคัญ	ความหมาย
1	สำคัญเท่ากัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด
2,4,6,8	ค่าความสำคัญระหว่างกลางของค่าที่กล่าวไว้ข้างต้น

ที่มา: ดัดแปลงจาก [25]

การวิเคราะห์ความสอดคล้องการตัดสินใจ

การทดสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจเป็นการวิเคราะห์เมทริกซ์ค่าน้ำหนักที่ได้จากการเปรียบเทียบรายคู่โดยวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency Ratio, C.R.) จากสัดส่วนระหว่างดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) และค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Index, R.I.) หากมีค่าน้อยกว่า 0.89 แสดงว่าความไม่สอดคล้องของการตัดสินใจมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 หรือขึ้นอยู่กับขนาดของเมตริกซ์ตามหลักเกณฑ์ของ Saaty [25] ทั้งนี้ค่า C.I. มีค่าเท่ากับ $(\lambda max\text{-}n)/(n\text{-}1)$ โดยที่ λmax เป็นค่าสูงสุดของ Eigenvalue ของเมตริกซ์ และค่า R.I. สำหรับจำนวนปัจจัยหรือทางเลือก n ปัจจัยหรือทางเลือก งานวิจัยนี้พิจารณา 4 ปัจจัย ซึ่งค่า C.I. ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.90 [25]

การวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของหลักเกณฑ์ ด้วยวิธี Fuzzy AHP หรือ FAHP เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลการตัดสินใจที่กำหนดให้ความคลุมเคลือในลักษณะของเซตความคลุมเครือแบบสามเหลี่ยม (Triangular Fuzzy Member) ซึ่งเป็นรูปแบบที่แสดงตรรกะให้เป็นตัวเลขที่สอดคล้องต่อการตัดสินใจและประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [26] (ดังรูปที่ 5)



รูปที่ 5 เซตความคลุมเครือแบบสามเหลี่ยม

การคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลในวิธีการ FAHP ทำได้หลายวิธี โดยวิธีของ Chang เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยม [26] โดยการคงรูปแบบการเปรียบเทียบระดับความสำคัญเชิงคู่ของปัจจัย โดยการแปลงระดับความสำคัญในการเปรียบเทียบซึ่งเป็นให้เป็นตัวเลข Fuzzy แบบสามเหลี่ยมมาแทนการใช้ตัวเลขเดี่ยว 1 ถึง 9 โดยใช้รูปแบบตัวเลข Fuzzy เป็นรูปแบบ (l, m, u) โดย x เป็นค่าคะแนน, m เป็นค่ากลางของตัวเลขสามเหลี่ยมฟัซซี และ l, u เป็นค่าขอบเขตล่างและบนตามลำดับ และสามารถแสดงเป็นตัวเลข Fuzzy สามเหลี่ยม (l, m, u) ได้ดังตารางที่ 2 และคำนวณค่าได้ตามแสดงในสมการที่ 1

ตารางที่ 2 การแทนที่ตัวเลขแสดงความสำคัญของการเปรียบเทียบรายคู่

ระดับ	Triangular Fuzzy Scale	Reciprocal Scale
1	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
2	(3/4, 5/4, 7/4)	(4/7, 4/5, 4/3)
3	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
4	(5/4, 7/4, 9/4)	(4/9, 4/7, 4/5)
5	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
6	(7/4, 9/4, 11/4)	(4/11, 4/9, 4/7)
7	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
8	(9/4, 11/4, 13/4)	(4/13, 4/11, 4/9)
9	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

$$\mu(x/\tilde{M}) = \begin{cases} 0 & x < l \\ (x-l)/(m-l) & l \le x \le m \\ (u-x)/(u-m) & m \le x \le u \\ 0 & x > u \end{cases} \quad (1)$$

ค่าความสำคัญของปัจจัยที่ i (Wi) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$W_i = \frac{w_i'}{\sum_{i=1}^{n} w_i'} \quad (2)$$

เวกเตอร์ความสำคัญ (W_i') แสดงดังสมการที่ 3

$$W_i' = \min V(S_i \ge S_j | j = 1,2,\ldots,m;\ i \ne j) \quad (3)$$

ค่าระดับความเป็นไปได้ (V) ของ Si ≥ Sj เมื่อ Si = (l, m, u), และ Sj = (l, m, u); i ≠ j ดังสมการที่ 4

$$V(S_i \ge S_j) = \begin{cases} 1, & m_i \ge m_j \\ 0, & l_j \ge u_i \\ \frac{(l_j - u_i)}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}, & \text{Other} \end{cases} \quad (4)$$

ขอบเขตสังเคราะห์ฟัซซี (S_i) คือขอบเขตสังเคราะห์ของปัจจัยที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจซึ่งเป็นผลคูณของผลรวมตัวเลขฟัซซี่และผลต่างตอบแทนรวมของ l, m, u ทุกเกณฑ์การตัดสินใจ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} \quad (5)$$

4. ผลและวิจารณ์ผล

ผลงานวิจัยประกอบด้วยผลการสร้างแบบจำลอง AR สำหรับงานระบบไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีเจาะดึงท่อลอดใต้ดิน (HDD) และผลการประเมินความเหมาะสมของการเลือกใช้แบบจำลอง ผลการวิจัยมีดังนี้

4.1 แบบจำลอง AR สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน

4.1.1 ผลการรวบรวมข้อมูลและการออกแบบกระบวนการพัฒนา AR

การรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญและท้าทายในการพัฒนา AR สำหรับงานสาธารณูปโภคใต้ดิน [19] ตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนไปอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดและความสูญเสียจากผลกระทบต่อสาธารณูปโภคอื่นได้อย่างรุนแรง เช่น การระเบิดของท่อก๊าซ งานวิจัยนี้จำแนกข้อมูลเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลเชิงพื้นที่ ข้อมูลแบบงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ข้อมูลแบบงานทางและสาธารณูปโภค และข้อมูลขอบเขตการก่อสร้าง ตารางที่ 3 ถึง ตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูล งานวิจัยนี้ได้นำระบบฐานข้อมูล (Database) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographical Information System, GIS) มาใช้เป็นระบบในการรวมรวมและตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งสาธารณูปโภค การปรับแก้ข้อมูลเชิงพื้นที่ในระบบพิกัด UTM จะช่วยให้แบบจำลองสาธารณูปโภคสามารถซ้อนทับและวางแนว (Modeling and Alignment) ของวัตถุจริงและวัตถุเสมือนได้อย่างถูกต้อง

การออกแบบกระบวนการพัฒนา AR กำหนดให้มีขั้นตอนการทำงานโดยคำนึงถึงหลักเกณฑ์ของหน่วยงานที่รับผิดชอบในงานก่อสร้างและหลักเกณฑ์ที่ต้องใช้ในการประสานงานร่วมกับหน่วยงานอื่น เช่น ขั้นตอนการขุดดินระดับลึกจากกฎหมาย พระราชบัญญัติการขุดดินและถมดิน พ.ศ. 2543 มาตรฐานประกอบการปฏิบัติกฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดิน กระทรวงมหาดไทย ปี พ.ศ. 2552 [28] มาตรฐานประกอบการคำนวณหาค่าเสถียรภาพความลาดเอียงที่ปลอดภัยในงานขุดดินและถมดิน (มยผ. 1911-52) มาตรฐานการป้องกันการพังทลายสำหรับงานขุดดินและถมดิน (มยผ.1912-52) คู่มือระบบเคเบิลใต้ดิน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย รวมทั้งหลักเกณฑ์การปฏิบัติงานร่วมกันระหว่าง กฟภ. และกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและคณะทำงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินตามหนังสือข้อตกลงในการทำงาน การวางแผนงานการปิดจราจร การส่งมอบพื้นที่ กระบวนการพัฒนา AR แสดงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 3 ตัวอย่างข้อมูลเชิงพื้นที่และแหล่งที่มา

ข้อมูลเชิงพื้นที่	แหล่งที่มาของข้อมูล
แผนที่ภูมิประเทศ	Google Maps
ข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ของโครงข่ายสาธารณูปโภคและโครงข่ายคมนาคม อาคารและสิ่งปลูกสร้าง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, กรมทางหลวง, กรมทางหลวงชนบท, องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
ข้อมูลจากการสำรวจ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลแบบงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินและแหล่งที่มา

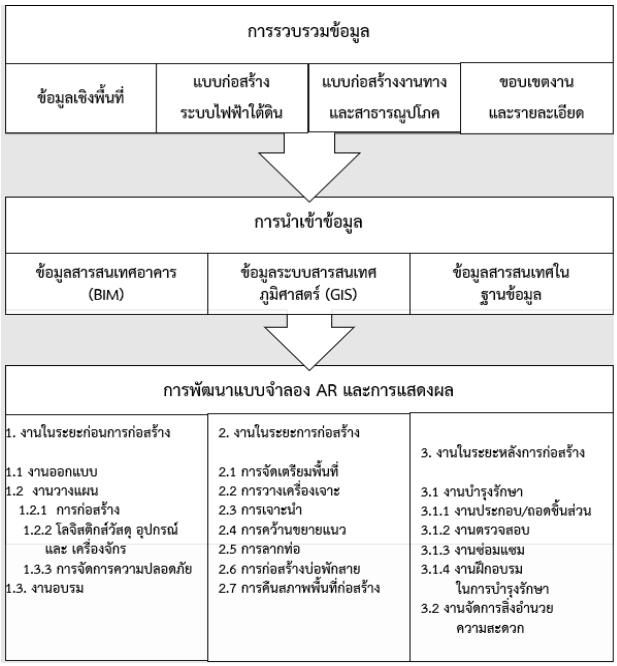
ข้อมูลแบบงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน	แหล่งที่มาของข้อมูล
แบบและข้อมูลการก่อสร้าง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ข้อกำหนดตามกฎหมาย -มาตรฐานงานก่อสร้างและมาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน - กฎหมายอาชีวอนามัยและความปลอดภัย - พรบ.ความปลอดภัยอาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ.2554 - กฎกระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม - ข้อกำหนดมาตรฐานในการบริหารและจัดการด้านความปลอดภัยอาชีว อนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง พ.ศ.2551 และ 2552	กระทรวงมหาดไทย กระทรวงคมนาคม กระทรวงพลังงาน กระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

ตารางที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลแบบงานทางและสาธารณูปโภคและแหล่งที่มา

ข้อมูลแบบงานทางและสาธารณูปโภค	แหล่งที่มาของข้อมูล
แบบงานก่อสร้างถนน ข้อตกลงการขอใช้พื้นที่	กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
แบบงานก่อสร้างระบบประปา	การประปาส่วนภูมิภาค
แบบงานก่อสร้างระบบสื่อสาร	บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด(มหาชน)
แบบงานก่อสร้างระบบระบายน้ำ	องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

ตารางที่ 6 ข้อมูลขอบเขตงานก่อสร้างและข้อมูลที่เกี่ยวข้องและแหล่งที่มา

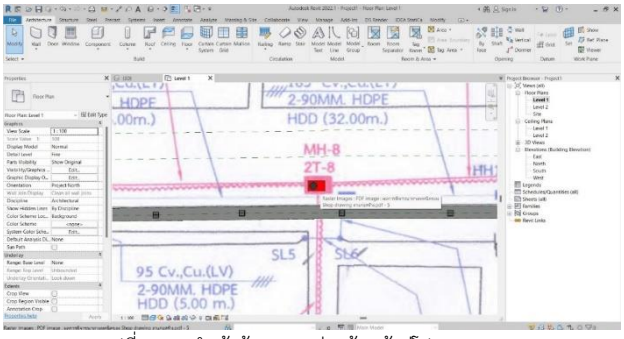
ข้อมูลขอบเขตงานก่อสร้างและข้อมูลรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง	แหล่งที่มาของข้อมูล
ขอบเขตงานก่อสร้าง ข้อตกลงการขอใช้พื้นที่ หนังสือราชการ/บันทึกข้อความ, คำสั่ง, ระเบียบ และข้อตกลง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น การประปาส่วนภูมิภาค บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)



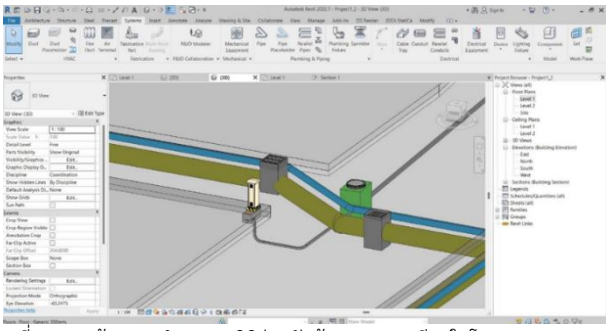
รูปที่ 6 ขั้นตอนการรวมรวมข้อมูล การนำเข้าข้อมูลและการพัฒนา AR

4.1.2 ผลการนำเข้าข้อมูล

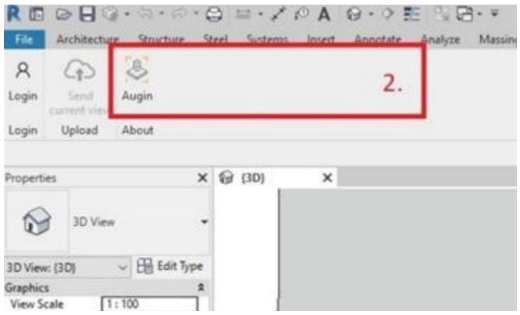
ข้อมูลที่รวบรวมได้สามารถนำเข้าได้หลายรูปแบบทั้งนำเข้าผ่านฐานข้อมูลเทคโนโลยีสารสนเทศอาคาร (BIM) แล้วจึงนำเข้าสู่แบบจำลอง AR หรือสามารถนำเข้าสู่แบบจำลอง AR ได้โดยตรง การนำเข้าข้อมูลแบบก่อสร้างโดยผ่าน BIM จะช่วยให้แบบจำลอง AR มีรายละเอียดมากขึ้นและสามารถปฏิบัติการและปรับการแสดงผลได้อย่างรวดเร็วมากกว่าข้อมูลที่นำเข้า AR โดยรูปแบบไฟล์ (.dwg) หรือ (.skp) อย่างไรก็ตามการนำเข้าข้อมูลจาก Sketch Up มีข้อดีในด้านความสะดวกและรวดเร็วในการนำเข้าเพราะมีรายละเอียดน้อย ทั้งนี้จะมีข้อจำกัดในการแสดงรายละเอียดและการปรับการแสดงผลที่จะมีความเสมือนจริงน้อยกว่าข้อมูลที่นำเข้าจาก BIM แบบจำลอง AR ในงานวิจัยนี้จึงนำเข้าข้อมูลแบบก่อสร้างผ่าน BIM และนำเข้าข้อมูลอุปกรณ์และเครื่องจักรผ่าน Sketch Up เป็นหลัก ตัวอย่างการนำเข้าข้อมูลผ่าน BIM แสดงดังรูปที่ 7 การสร้างแบบจำลองและข้อมูลรายละเอียดใน BIM แสดงดังรูปที่ 8 และการนำเข้าข้อมูลจาก BIM เข้าสู่แบบจำลอง AR โดยการติดตั้งโปรแกรม Augin เพื่อนำเข้าและแสดงผล AR ดังรูปที่ 9 โดยสรุปกระบวนการรวบรวมและนำเข้าข้อมูลในแบบจำลอง AR ดังรูปที่ 10



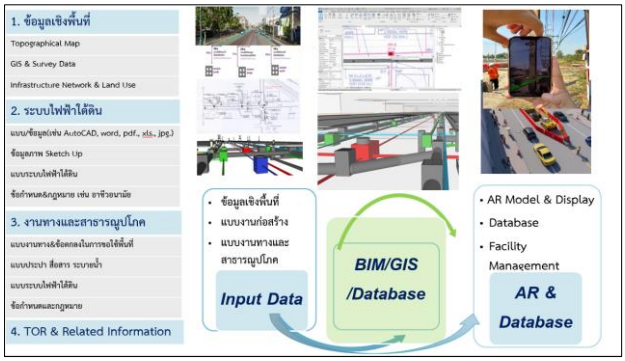
รูปที่ 7 การนำเข้าข้อมูลการก่อสร้างเข้าสู่โปรแกรม BIM



รูปที่ 8 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติร่วมกับข้อมูลรายละเอียดในโปรแกรม BIM



รูปที่ 9 การนำเข้าข้อมูลจาก BIM เข้าสู่แบบจำลอง AR ผ่านโปรแกรม Augin



รูปที่ 10 กระบวนการรวบรวมและนำเข้าข้อมูลในแบบจำลอง AR

ผลการรวบรวมข้อมูลทำให้ทราบข้อจำกัดในการรวบรวมและนำเข้าข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง AR ดังนี้

1. ข้อจำกัดด้านการรวบรวมข้อมูลและการวางแนวและการจำลอง (Alignment and Modeling)

ข้อมูลงานสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องมีหลากหลาย สาธารณูปโภคทั้งบนดินและใต้ดินมีหลายอย่างและข้อมูลถูกจัดเก็บในหลายรูปแบบ ทั้ง 2 มิติ 3 มิติ แบบกระดาษและแบบดิจิตอลจึงทำให้ต้องแปลงรูปแบบไฟล์ รวมทั้งความถูกต้องของพิกัดและรายละเอียดในแบบก่อสร้างมีความคลาดเคลื่อนไปจากสภาพจริงและแตกต่างจากข้อมูลแบบก่อสร้าง (As-built Drawing) ทำให้การซ้อนทับกับสภาพจริงได้อย่างแม่นยำทำได้ยาก

การวางแนวสาธารณูปโภคในแบบจำลองให้มีตำแหน่งที่ถูกต้องต้องคำนึงถึงระดับการพัฒนา (Level of Development, LOD) การพัฒนาให้ถูกต้องแม่นยำมากต้องอาศัยเวลาและคำนึงถึงการนำไปใช้ โดยแบบจำลองที่เหมาะสมต้องมีระดับความถูกต้องที่ช่วยป้องกันความผิดพลาดที่กระทบต่อแนวสาธารณูปโภคที่อันตรายและกระทบต่อประชาชนในบริเวณกว้างหรือมีความรุนแรง เช่น ไฟฟ้าดับ ท่อประปาแตก ก๊าซระเบิด เป็นต้น

2. ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และโปรแกรม (Hardware and Software) ซึ่งแบบจำลอง AR สามารถพัฒนาให้ใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่หลายหลาย สำหรับงานระบบไฟฟ้าใต้ดินนั้นควรคำนึงถึงการศึกษาภาพของการนำ AR ไปใช้งาน ขนาดเครื่อง ความจุ การแสดงผลในพื้นที่หน้างานที่มีความสว่างในตอนกลางวันและในบ่อพักที่มีแสงสว่างน้อย อุปกรณ์ที่เลือกใช้งานต้องมีน้ำหนักเบาเพื่อให้ทำงานในพื้นที่จำกัดได้ และแสดงรายละเอียดของแบบและอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าใต้ดินได้

4.1.3 ผลการพัฒนาแบบจำลอง AR และการแสดงผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลอง AR สำหรับระบบไฟฟ้าใต้ดิน จำแนกตามช่วงอายุโครงการ (Project Life Cycle) ออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะก่อนการก่อสร้าง (Pre-construction) ระยะการก่อสร้าง (Construction) และระยะหลังการก่อสร้าง (Post-construction)

แบบจำลอง AR สำหรับงานในระยะก่อนการก่อสร้าง

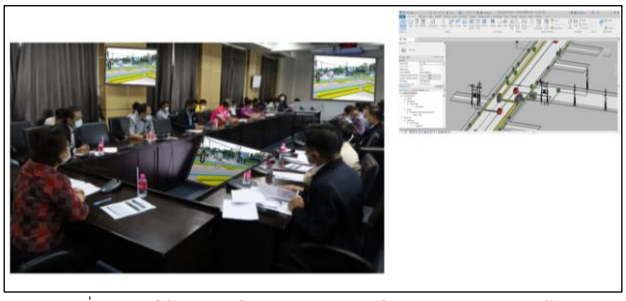
แบบจำลอง AR ระยะก่อนการก่อสร้าง ประกอบด้วย งานออกแบบ งานวางแผน (งานวางแผนการก่อสร้าง งานโลจิสติกส์วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องจักร และการจัดการความปลอดภัย) และงานอบรม (งานอบรมให้ความรู้ และอบรมการทำงาน; On-the-Job Training or On-site Training)

ผลการใช้แบบจำลอง AR ในงานออกแบบ พบว่า AR ช่วยในการออกแบบและการตรวจประเมินแบบสมบูรณ์ ตัวอย่างแบบจำลอง AR ในงานวางแผนแสดงดังรูปที่ 11 ผลการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงาน กองวิศวกรรมและวางแผน ของ กฟภ. เขต 1 ภาคใต้ จังหวัดเพชรบุรี พบว่า AR ที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มคุณภาพงานออกแบบที่เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับหลายฝ่ายให้มีความเข้าใจงานวิศวกรรมและสภาพแวดล้อมการทำงานดีขึ้น



รูปที่ 11 แบบจำลองการวางออกแบบก่อสร้างบ่อพักสายไฟฟ้า

ผลการใช้ AR ในงานวางแผนและงานโลจิสติกส์ของวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องจักร (ตัวอย่างแบบจำลอง AR แสดงดังรูปที่ 12 ถึง 15) พบว่าผู้ปฏิบัติงานกองก่อสร้างและบริหาร ของ กฟภ. เขตภาคใต้ 1 จังหวัดเพชรบุรี สามารถนำไปประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ดีขึ้น ผู้ปฏิบัติงานหลายฝ่ายมีความเข้าใจแบบงานก่อสร้างที่ตรงกันมากขึ้นสามารถวางแผนงานร่วมกันและลดความขัดแย้งระหว่างหน่วยงานได้ โดย AR สามารถจำลองการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องจักรใช้ในงานระบบไฟฟ้าใต้ดิน เช่น รถขุดเครื่องเจาะดันดึงท่อ รถน้ำเพื่อฉีดล้าง เครน เครื่องจักรที่มีหลายขนาด เช่น เครนขนาด 25 ตัน และ50 ตัน ได้อย่างดี



รูปที่ 12 การใช้งาน AR ในงานวางแผนงานในระยะก่อนการก่อสร้าง



รูปที่ 13 แบบจำลอง AR ในการวางตำแหน่งเครื่องจักรขุดเปิดหน้าดิน



รูปที่ 14 แบบจำลอง AR ของเครื่องเจาะดันดึงท่อ (Reamer) ในงาน HDD



รูปที่ 15 แบบจำลอง AR ในการติดตั้งเครนเพื่อเตรียมยกบ่อพักสายไฟฟ้า

ผลการใช้ AR ในการจัดการความปลอดภัยด้วยการจัดการพื้นที่สาธารณูปโภคใต้ดิน พบว่า AR ช่วยในการจัดการสาธารณูปโภคใต้ดินที่มีอยู่เดิมและที่จะก่อสร้างเพิ่มเติม ตามข้อกำหนดของ กฟภ. (ตามตารางที่ 7) แสดงดังรูปที่ 16 โดยแบบจำลอง AR สามารถช่วยกำหนดและตรวจสอบตำแหน่งสาธารณูปโภคให้มีระยะห่างตามข้อกำหนดของ กฟภ.และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่สามารถเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการจัดวาง การขุด และกิจกรรมที่อาจมีอันตรายรุนแรงต่อทั้งผู้ปฏิบัติงานและประชาชน เช่น การระเบิดท่อก๊าซ เป็นต้น

ตารางที่ 7 ระยะห่างระหว่างแนวสายไฟฟ้าใต้ดินกับแนวสาธารณูปโภคอื่น

สาธารณูปโภค	ระยะห่างต่ำสุด (เมตร)	
	แนวขนานกัน	แนวตัดกัน
ท่อระบายน้ำ	0.30	0.30
ท่อน้ำ	0.45	0.45
ท่อแก๊ส	0.30	0.30 (บริษัท ปตท. ให้ใช้ค่า 1.50)
ท่อร้อยสายระบบไฟฟ้า	3.00	0.60
ท่อร้อยสายโทรศัพท์	0.30	0.30
ท่อไอน้ำ	3.00	1.20

ที่มา: ดัดแปลงจากคู่มือระบบเคเบิลใต้ดินไฟฟ้า [1]



รูปที่ 16 แบบจำลอง AR ในการจัดวางสาธารณูปโภคใต้ดินอย่างปลอดภัย

ผลการใช้ AR ในงานอบรม (ตัวอย่างแบบจำลอง AR แสดงดังรูปที่17) พบว่าผู้ปฏิบัติงานของ กฟภ. เขต 1 ภาคใต้จังหวัดเพชรบุรี สามารถเข้าใจงานได้ดีขึ้นโดยเปรียบเทียบการอบรมในปัจจุบันที่ยังมีข้อจำกัดในการแสดงขั้นตอนการทำงานที่เสมือนจริง อุปสรรคปัญหาจริงที่เกิดขึ้นหรือเทคโนโลยีที่ใช้งานจริงซึ่งมีความก้าวหน้าขึ้น การนำ AR มาใช้ในการอบรมจะช่วยนำเสนอกระบวนการทำงานจริงที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ โดยสามารถแสดงพร้อมกับข้อมูลงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินที่ซับซ้อนได้ นอกจากนี้ AR สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาคู่มือการทำงานและการบำรุงรักษาให้ชัดเจนมากขึ้น ผลสรุปของการใช้ AR ในการอบรมได้ช่วยให้ระยะเวลาในการอบรมสั้นลง เนื่องจากสามารถถ่ายทอดได้ดีขึ้น และการอบรมเพื่อพัฒนาทักษะที่ดีขึ้นช่วยส่งเสริมให้ความปลอดภัยในการทำงานสูงขึ้น ลดความเสียหายจากอุบัติเหตุและค่าใช้จ่ายในการอบรมลดลง



รูปที่ 17 การใช้ AR ในการอบรมระบบไฟฟ้าใต้ดิน

แบบจำลอง AR สำหรับงานในระยะการก่อสร้าง

งานวิจัยนี้พัฒนา AR ในกระบวนการระยะการก่อสร้างด้วยวิธี HDD ทั้ง 7 ขั้นตอน ได้แก่ 1.การจัดเตรียมพื้นที่ 2.การวางเครื่องเจาะ 3.การเจาะนำ 4.การคว้านขยายแนว 5.การลากท่อ 6.การก่อสร้างบ่อพักสาย 7.การคืนสภาพพื้นที่ก่อสร้าง ซึ่งคู่มือระบบเคเบิลใต้ดินของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [1]

กำหนดไว้ 6 ขั้นตอน โดยงานวิจัยนี้ได้เพิ่มขั้นตอนการคืนสภาพพื้นที่ก่อสร้าง โดยพัฒนาให้สอดคล้องกับหลักเกณฑ์ของหน่วยงานผู้รับผิดชอบพื้นที่ เช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับหน่วยงานพื้นที่ และหน่วยงานสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้อง เช่น การประปา บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ตัวอย่าง AR ในระยะการก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18 แบบจำลอง AR ขั้นตอนขุดเบิดหน้าดินเพื่อเตรียมวางบ่อพักสายไฟ

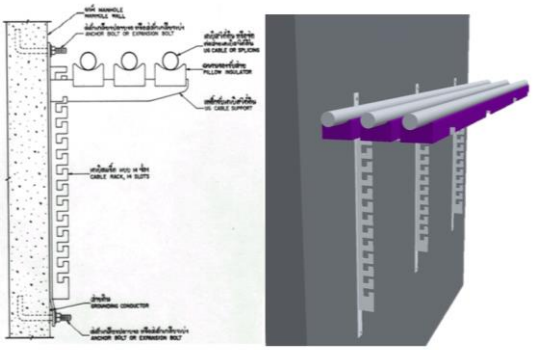


(a) เครื่องเจาะในพื้นที่จริง (b) แบบจำลอง AR ของเครื่องเจาะ

รูปที่ 19 สภาพการทำงานระยะก่อสร้างเปรียบเทียบกับแบบจำลอง AR

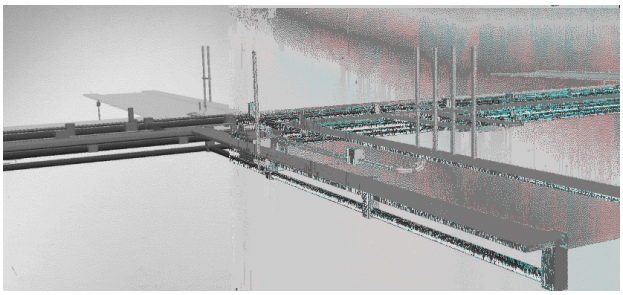
แบบจำลอง AR สำหรับงานในระยะหลังการก่อสร้าง

แบบจำลอง AR สำหรับการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (Facilities Management, FM) เพื่อให้เกิดคุณค่าของสินทรัพย์ (Asset Value) การจัดการ FM เพื่อสร้างคุณค่าของสินทรัพย์ของระบบไฟฟ้าใต้ดินและสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้องทำโดยการประยุกต์ใช้ AR ร่วมกับระบบสารสนเทศอาคาร (BIM) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อจัดเก็บและจัดการข้อมูลที่มีให้สามารถนำใช้ในงานการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (Facilities Management, FM) เพื่อให้เกิดคุณค่าของสินทรัพย์ (Asset Value) แก่องค์กรได้ เช่น ระบบฐานข้อมูลทั้งในรูปแบบ 2 มิติ 3 มิติ รวมถึงข้อมูลที่จำเป็นในการวางแผนและวิเคราะห์ต้นทุนการก่อสร้างในระยะยาวและต้นทุนบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost) ตัวอย่าง AR ในระยะการก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 20 และ 21



(a) แบบต่อลงดินเพื่อป้องกันสำหรับสายไฟฟ้า (b) แบบจำลองต่อลงดินเพื่อป้องกันสำหรับสายไฟฟ้า

รูปที่ 20 การต่อลงดินเพื่อป้องกันสำหรับสายไฟฟ้าและแบบจำลองการต่อลงดิน

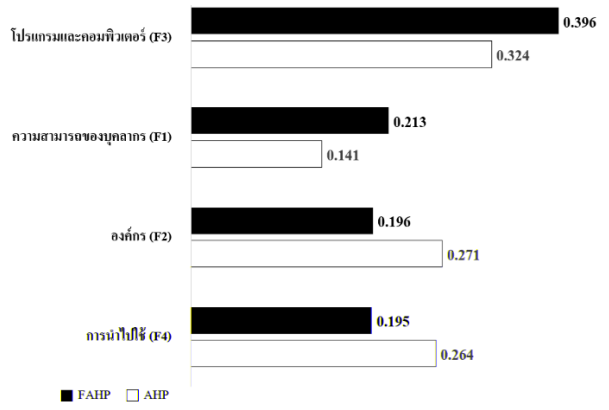


รูปที่ 21 ฐานข้อมูลที่มีความถูกต้องของระบบสาธารณูปโภค

4.2 ผลการประเมินการเลือกใช้แบบจำลอง

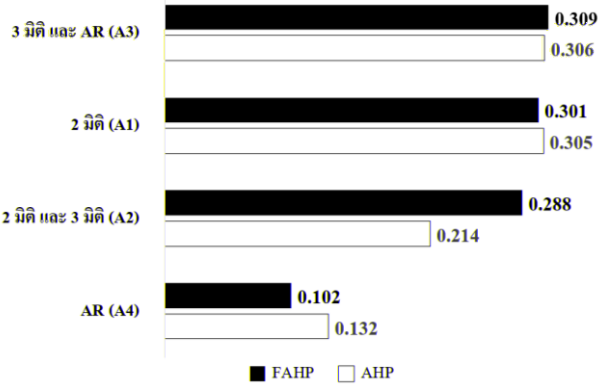
ผลการประเมินความเหมาะสมแบบจำลอง AR โดยใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี (FAHP) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลองจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 30 ท่าน ประสบการณ์เฉลี่ย 16 ปี ซึ่งแบ่งตามหน้าที่รับผิดชอบแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มหน่วยงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กลุ่มหน่วยงานทางและเจ้าของพื้นที่ ได้แก่ กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และกลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคและส่วนเกี่ยวข้องในการดำเนินงาน ได้แก่ การประปาส่วนภูมิภาค และบริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) ผลการวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องการตัดสินใจ (C.R.) พบว่าค่า C.R. อยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.080 ซึ่งข้อมูลการตัดสินใจที่รวบรวมได้มีความสอดคล้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ค่า C.R. น้อยกว่า 0.08) โดยค่าความสอดคล้องการตัดสินใจ (C.R.) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนของค่าดัชนีความสอดคล้อง (C.I) ต่อค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (R.I.) มีค่าไม่เกิน 0.08 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลการตัดสินใจมีความสอดคล้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในการเลือกใช้แบบจำลองสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่ โปรแกรมและคอมพิวเตอร์ (0.396) ความสามารถของบุคลากร (0.213) องค์กร (0.196) และ การนำไปใช้ (0.195) ตามลำดับ ดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในการเลือกใช้แบบจำลอง

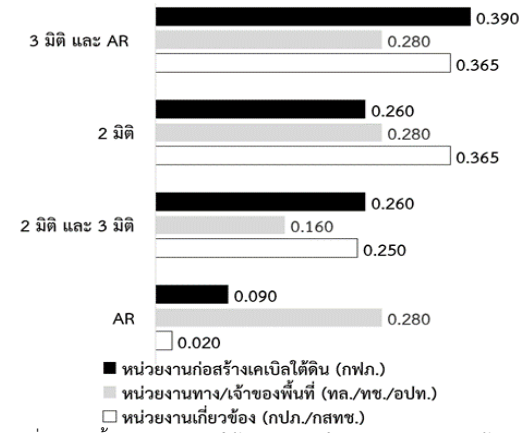
ผลการวิเคราะห์การตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าค่าน้ำหนักของการเลือกใช้แบบจำลองสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ได้แก่การผสมผสานแบบจำลองรูปแบบ 3มิติ และ AR (0.309) แบบจำลองรูปแบบ 2 มิติ (0.301) การผสมผสานแบบจำลองรูปแบบแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ (0.288) และแบบจำลองรูปแบบ AR (0.102) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาทางเลือก 3 มิติ และ AR ซึ่งมีค่าน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกสูงที่สุด พบว่า สำหรับทางเลือกนี้ ค่าน้ำหนักปัจจัยด้านโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ มีค่าสูงที่สุด (0.467) รองลงมาเป็นปัจจัยด้านองค์กร (0.397) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ทางเลือก 3 มิติ และ AR มีความเหมาะสมที่สุด (รูปที่ 23)



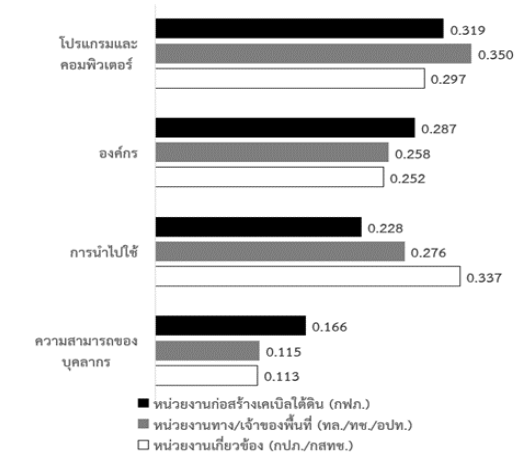
รูปที่ 23 ค่าน้ำหนักของทางเลือกในการเลือกใช้แบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์การเลือกใช้แบบจำลองโดยจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มผู้ก่อสร้างระบบไฟฟ้าตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลอง 3 มิติ และ AR (3D และ AR) (0.390) รองลงมาเป็นแบบจำลอง 2 มิติ (2D) และแบบจำลองที่ผสมผสาน 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน (2D และ 3D) (ประมาณ 0.260 สำหรับแต่ละทางเลือก) และความจริงเสริม (AR) (0.090) กลุ่มผู้รับผิดชอบงานทางตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลอง 3 มิติ และ AR (3D และ AR) ความจริงเสริม (AR) และแบบจำลอง 2 มิติ (2D) ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.280 สำหรับแต่ละทางเลือก) และแบบจำลองที่ผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ (2D และ 3D) (0.160) กลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคอื่นตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลอง 3 มิติ และ AR (3D และ AR) และแบบจำลอง 2 มิติ (2D) ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.365 สำหรับแต่ละทางเลือก) และการผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ (2D และ 3D) (0.250) และความจริงเสริม (AR) (0.020) ดังรูปที่ 24

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักปัจจัยในการเลือกใช้โดยจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดในการจัดลำดับรูปแบบเทคโนโลยีสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ดังรูปที่ 25 กลุ่มหน่วยงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน เห็นว่า ให้ความสำคัญปัจจัยองค์กร (0.287) การนำไปใช้ (0.228) และความสามารถของบุคลากร (0.166) ตามลำดับ กลุ่มหน่วยงานทางและเจ้าของพื้นที่ พบว่าให้ความสำคัญปัจจัยการนำไปใช้ (0.276) องค์กร (0.258) และความสามารถของบุคลากร (0.115) ตามลำดับ กลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคและส่วนเกี่ยวข้อง พบว่าให้ความสำคัญปัจจัยการนำไปใช้ (0.337) องค์กร (0.252) และความสามารถของบุลากร (0.113) ตามลำดับ กลุ่มหน่วยงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินให้ความสำคัญกับปัจจัยองค์กรมากกว่ากลุ่มหน่วยงานทางและเจ้าของพื้นที่เช่นเดียวกับกลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคและส่วนเกี่ยวข้อง เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีภารกิจหลักในการก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน ซึ่งมีแผนและมีดัชนีชี้วัดผลงานหรือความสำเร็จของงาน (Key Performance Indicator, KPI) ให้เป็นไปตามเป้าหมายขององค์กร



รูปที่ 24 ค่าน้ำหนักการเลือกใช้แบบจำลองโดยจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ



รูปที่ 25 ค่าน้ำหนักปัจจัยสำคัญโดยจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองความจริงเสริม (AR) สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีเจาะดึงท่อลอดใต้ดิน (HDD) และทำการประเมินความเหมาะสมการเลือกใช้แบบจำลอง AR โดยทำการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) และการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นแบบฟัซซี (Fuzzy AHP) สรุปผลดังนี้

5.1 การสร้างแบบจำลอง AR

ผลการสร้างแบบจำลอง AR สำหรับงานระบบไฟฟ้าใต้ดินได้นำเสนอแบบจำลองแบบจำลอง AR สำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินด้วยวิธีเจาะดึงท่อลอดใต้ดิน (HDD) ซึ่งแสดงถึงผลวิจัย 3 ส่วน ได้แก่ ผลการรวบรวมข้อมูลและการออกแบบกระบวนการทำงาน ผลการนำเข้าข้อมูลแบบจำลอง AR และผลการพัฒนาแบบจำลอง AR และการแสดงผล ข้อมูลที่รวบรวมและนำเข้าแบบจำลองประกอบด้วย ข้อมูลเชิงพื้นที่ แบบงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน แบบงานทางและสาธารณูปโภค รวมทั้งข้อมูลขอบเขตงานก่อสร้างและข้อมูลรายละเอียดที่เกี่ยวข้องจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ผลการนำเข้าข้อมูลเป็นการนำเข้าข้อมูลที่รวบรวมได้ในหลากหลายรูปแบบเข้าสู่แบบจำลอง AR และระบบฐานข้อมูล (Database) ระบบสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling, BIM) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographical Information System, GIS) เพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลในการนำเข้าสู่แบบจำลอง AR และเป็นฐานข้อมูลสำหรับใช้ในงานระบบไฟฟ้าใต้ดิน

ผลการพัฒนาแบบจำลองและการแสดงผลของงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลอง AR สำหรับงาน 3 ระยะ ได้แก่ แบบจำลอง AR สำหรับงานระยะก่อนการก่อสร้าง แบบจำลอง AR สำหรับงานระยะการก่อสร้าง และแบบจำลอง AR สำหรับงานระยะหลังการก่อสร้าง ประกอบด้วย

แบบจำลอง AR สำหรับงานระยะก่อนการก่อสร้าง ได้แก่ แบบจำลอง AR สำหรับงานออกแบบ และงานวางแผน (ประกอบด้วย งานวางแผนงานก่อสร้าง งานวางแผนโลจิสติกส์ของวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องจักร และงานวางแผนการจัดการความปลอดภัย) และงานอบรม (ประกอบด้วย งานอบรมให้ความรู้ และงานอบรมการทำงาน) แบบจำลอง AR สำหรับงานระยะการก่อสร้าง ได้แก่ แบบจำลองงานก่อสร้าง 7 ขั้นตอน การจัดเตรียมพื้นที่ การวางเครื่องเจาะ การเจาะนำ การคว้านขยายแนว การลากท่อ การก่อสร้างบ่อพักสาย และการคืนสภาพพื้นที่ก่อสร้าง แบบจำลอง AR สำหรับงานระยะหลังการก่อสร้าง ได้แก่ แบบจำลองสำหรับการบำรุงรักษา และการจัดการสิ่งอำนวยความสะดวก (Facility Management)

5.2 การประเมินผลการเลือกใช้แบบจำลอง AR

ผลการวิจัยในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการเลือกใช้แบบจำลอง AR ได้จากการข้อมูลการสำรวจด้วยแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องในงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดินจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) กรมทางหลวง (ทล.) กรมทางหลวงชนบท (ทช.) บริษัทโทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) การประปาส่วนภูมิภาค และองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น (อบจ. อบต. เทศบาล) รวม 30 ท่าน ประสบการณ์เฉลี่ย 16 ปี (5 ถึง 40 ปี) ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นรูปแบบผสมผสานระหว่าง 3 มิติ และแบบความจริงเสริม (ค่าน้ำหนักของทางเลือกมากที่สุด) ทั้งนี้หน่วยงานส่วนมากยังเห็นว่าแบบจำลอง 2 มิติ และแบบจำลองที่ผสมผสานระหว่าง 2 มิติ และ 3 มิติ ยังคงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในลำดับรองลงมา โดยหน่วยงานส่วนมากยังไม่พร้อมในพร้อมในการใช้แบบจำลอง AR เพียงรูปแบบเดียว (ค่าน้ำหนักของทางเลือกน้อยที่สุด) เมื่อพิจารณาปัจจัยในการเลือกใช้พบว่าผู้เชี่ยวชาญส่วนมากเห็นว่าปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้ ได้แก่ ปัจจัยด้านโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ รองลงมาเป็นปัจจัยด้านองค์กร บุคลากร และการนำไปใช้ตามลำดับ เมื่อหน่วยงานสามารถเตรียมความพร้อมในด้านโปรแกรมและคอมพิวเตอร์และได้รับการผลักดันจากองค์กรที่มีบุคลากรที่มีความพร้อมและทักษะในการปฏิบัติงาน และนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เหมาะสมจะมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้แบบจำลองนั้นมีความเหมาะสมต่อการเลือกใช้

ผลการวิเคราะห์โดยจำแนกกลุ่มผู้ตัดสินใจซึ่งแบ่งออกแป็นกลุ่มผู้ก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน (กฟภ.) กลุ่มสาธารณูปโภคงานทางและผู้รับผิดชอบพื้นที่ (ทล. ทช. อบต. อบจ. เทศบาล) และกลุ่มสาธารณูปโภคอื่นแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่ผสมผสานระหว่าง 3 มิติ และ AR เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับ กฟภ. ทางเลือกที่เหมาะสม ได้แก่ แบบจำลองที่ผสมผสานระหว่าง 3 มิติ และ AR รองลงมาคือ แบบจำลอง 2 มิติ และการผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน (AR) และความจริงเสริม เพียงอย่างเดียว เป็นลำดับสุดท้าย กลุ่มสาธารณูปโภคงานทางและผู้รับผิดชอบพื้นที่ (ทล. ทช. อบต. อบจ. เทศบาล) เลือกใช้แบบจำลอง 3 มิติ และ AR ความจริงเสริม (AR) และแบบจำลอง 2 มิติ ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน และการผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ เป็นลำดับสุดท้าย สำหรับกลุ่มหน่วยงานสาธารณูปโภคอื่นตัดสินใจเลือกใช้แบบจำลองผสม 3 มิติ ร่วมกับ AR และแบบจำลอง 2 มิติ ด้วยค่าน้ำหนักใกล้เคียงกัน รองลงมาเป็นการผสมผสานแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ และความจริงเสริม ตามลำดับ สำหรับผลการวิเคราะห์ปัจจัยในการเลือกใช้แบบจำลองโดยจำแนกตามกลุ่มผู้ตัดสินใจ พบว่าผู้ก่อสร้างงานระบบไฟฟ้าใต้ดินและผู้รับผิดชอบงานทางพิจารณาปัจจัยด้านโปรแกรมและคอมพิวเตอร์เป็นสำคัญ รองลงมาเป็นปัจจัยด้านการประยุกต์ใช้ องค์กร และความสามารถของบุคลากร ในขณะที่กลุ่มผู้รับผิดชอบสาธารณูปโภคอื่นพิจารณาการประยุกต์ใช้เป็นสำคัญรองลงเป็นปัจจัยด้านโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ องค์กร และความสามารถของบุคลากร

แบบจำลอง AR ที่พัฒนาขึ้นและการนำไปประยุกต์ใช้ ในการก่อสร้างแสดงให้เห็นว่า AR สามารถช่วยสนับสนุนงานก่อสร้างใต้ดินได้อันเนื่องด้วยปัจจัยหลายประการที่ต้องเหมาะสมกับบริบทองค์กรในการนำเทคโนโลยีมาใช้งาน (Technology Adoption) ความเข้ากันได้กับอุปกรณ์ ความพร้อมขององค์กรและบุคลากร และการนำไปใช้ การเชื่อมโยงฐานข้อมูลสาธารณูปโภคระหว่างหน่วยงานจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการพัฒนาแบบจำลองและลดต้นทุนได้ โดยคำนึงถึงระดับการพัฒนา (Level of Development) ที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งอาจแบ่งแบบจำลอง AR จากระดับข้อมูลพื้นฐานไปจนถึงระดับความละเอียดถูกต้องสูงตามการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) การประปาส่วนภูมิภาค และองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

เอกสารอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2548). คู่มือระบบเคเบิลใต้ดิน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. หน้า 1-176.

[2] กระทรวงมหาดไทย. (2562). การคัดเลือกงานเข้าดำเนินงานแผนงานปรับปรุงระบบไฟฟ้าเป็นเคเบิลใต้ดิน 1 จังหวัด 1 ถนนเฉลิมพระเกียรติ. (มท 5304.3/24306). กระทรวงมหาดไทย.

[3] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2565). แผนยุทธศาสตร์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ. 2565 - 2569. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

[4] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2561). ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561 - 2580.

[5] Qian, Q. and Lin, P. (2016). Safety risk management of underground engineering in China: Progress, challenges and strategies, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 8, pp. 423-442.

[6] Milgram, P., and Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 12, pp. 1321-1329.

[7] Milgram, P., and Colquhoun, H. (1999). A taxonomy of real and virtual world display integration. In Ohta, Y., and Tamura, H. (Ed.), *Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds,* Springer. pp. 1-26.

[8] สรรเพชร คงถาวร, ฆนิศา รุ่งแจ้ง, พงษ์ศักดิ์ สุริยวนากุล (2565). การตัดสินใจเลือกใช้นวัตกรรมแบบจำลองฐานข้อมูลสำหรับงานก่อสร้างระบบไฟฟ้าใต้ดิน. *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ครั้งที่ 5*, ชลบุรี. 24 สิงหาคม 2565 หน้า 214-222.

[9] Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., and MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *Computer Graphics and Applications IEEE*, 21(6), pp.34-47.

[10] Muthalif, M., Shojaei, D., and Khoshelham, K. (2022). A review of augmented reality visualization methods for subsurface utilities. *Advanced Engineering Informatics*, 51, https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.1014

[11] Casari, F., Navab, N., Hruby, L., Kriechling, P., Nakamura, R., Tori, R., de Lourdes Dos Santos Nunes, F., Queiroz, M., Furnstahl, P., and Farshad, M. (2021). Augmented reality in orthopedic surgery is emerging from proof of concept towards clinical studies: a literature review explaining the technology and current state of the art. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 14, pp.192-203.

[12] Kim, J., Wang, Y., Wang, H., Lee, S., Yokota, T., and Someya, T. (2021). Skin electronics: Next-generation device platform for virtual and augmented reality. *Advanced Functional Materials*, https://doi.org/10.1002/adfm.202009602.

[13] Osadchyi, V., Valko, N., & Kuzmich, L. (2021). Using augmented reality technologies for STEM education organization. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012027.

[14] Gabbard, J., Fitch, G., and Kim, H. (2014). Behind the glass: Driver challenges and opportunities for AR automotive applications. *Proceedings of the IEEE*, 102(2), pp.124-136.

[15] Regenbrecht, H., Baratoff, G., and Wilke, W. (2005). Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries. *Computer Graphics and Applications IEEE,* 25(6), pp.48-56.

[16] Livingston, M., Ai, Z., Karsch, K., and Gibson, G. (2011). User interface design for military AR applications. *Virtual Reality*, 15, pp.175-184.

[17] Matysczok, C., Radkowski, R., & Berssenbruegge, J. (2004). AR-bowling: immersive and realistic game play in real environments using augmented reality. *The 2004 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology.* 2 September 2024, pp. 269-276.

[18] Palmarini, R., Erkoyuncu, J., Roy, R., and Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, pp.215-228.

[19] Fenais, A., Ariaratnam, S., Ayer, S., and Smilovsky, N. (2020). A review of augmented reality applied to underground construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 25, pp.308-324.

[20] Santos, M., Chen, A., Taketomi, T., Yamamoto, G., Miyazaki, J., and Kato, H. (2013). Augmented reality learning experiences: Survey of prototype design and evaluation. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 7(1), pp.38-56.

[21] กระทรวงมหาดไทย (2563) สำนักงานปลัดกระทรวงมหาดไทย (สนผ.). การขับเคลื่อนแผนการดำเนินงานก่อสร้างตามแผนปรับปรุง

ระบบไฟฟ้าเป็นเคเบิลใต้ดิน 1 จังหวัด 1 ถนน เพื่อเฉลิมพระเกียรติ. (มท.0211.9/9848). กระทรวงมหาดไทย.

[22] Li, X., Yi, W., Chi, H., Wang, X., and Chan, A. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*, 86, pp.150-162.

[23] Chen, H., Hou, L., Zhang, G., and Moon, S. (2021). Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, 125, 103631. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103631

[24] Tulenheimo, R. (2015). Challenges of implementing new technologies in the world of BIM–Case study from construction engineering industry in Finland. Procedia Economics and Finance, 21, pp.469-477.

[25] Saaty, T., and Vargas, L. (2012). *Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process*, Springer, pp.23-40.

[26] Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., and Le Traon, Y. (2016). A state-of the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Expert Systems with Applications*, 65, pp.398-422.

[27] Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), pp.83-98.

[28] กระทรวงมหาดไทย (2522) มาตรฐานประกอบการปฏิบัติกฎหมายว่าด้วยการขุดดินและถมดิน กระทรวงมหาดไทย ปี พ.ศ. 2552. กระทรวงมหาดไทย.