

การประยุกต์ใช้ความเป็นจริงเสริมร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อการตรวจสอบงานก่อสร้างจริง: ข้อเสนอกระบวนการส่งมอบโครงการแบบใหม่

Application of augmented reality with building information modeling for as-built verification: A new project handover process proposal

ยุทธนา เกะกิง^{1*} และ สปัน ปันจันท์¹

Yutthana Korking^{1*} and Sapan Panjan¹

บทคัดย่อ

ขั้นตอนการส่งมอบโครงการก่อสร้างเป็นกิจกรรมสำคัญที่ต้องการการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองดิจิทัลกับสภาพการก่อสร้างจริง แม้ว่าอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยจะนำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) มาใช้อย่างแพร่หลาย แต่การตรวจสอบในขั้นการส่งมอบยังคงพึ่งพาการเปรียบเทียบบนหน้าจอคอมพิวเตอร์และความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก โดยยังขาดกระบวนการที่บูรณาการการตรวจสอบในอัตราส่วน 1:1 กับสภาพหน้างานเข้ากับกระบวนการส่งมอบอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกระบวนการส่งมอบโครงการก่อสร้างรูปแบบใหม่ โดยบูรณาการเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (AR) เข้ากับ BIM เพื่อสนับสนุนการตรวจสอบแบบจำลอง BIM ให้สอดคล้องกับสภาพการก่อสร้างจริง สำหรับการเตรียมความพร้อมในการส่งมอบโครงการในระดับ LOD 500 วิเคราะห์นัยยะเชิงปฏิบัติต่อเจ้าของอาคาร และเสนอเงื่อนไขการนำไปใช้ในบริบทอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย การศึกษามีลักษณะเป็นการพิสูจน์แนวคิด (proof-of-concept) ร่วมกับการนำเสนอกระบวนการ (process proposal) โดยใช้อาคารกรณีศึกษาที่อยู่ระหว่างการก่อสร้าง พัฒนาแบบจำลอง BIM ในซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ในระดับ LOD 400 ขึ้นไป แปลงเป็นไฟล์ IFC และแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Gamma AR บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ทดสอบในจุดตรวจสอบ 48 จุด ครอบคลุมงานสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาล ผลการศึกษเป็นการจำแนกเชิงคุณภาพ พบความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและสภาพจริง 5 ลักษณะหลัก ได้แก่ องค์ประกอบที่ปรากฏในแบบจำลองแต่ไม่มีในสภาพจริง ตำแหน่งติดตั้งไม่ตรง องค์ประกอบที่ถูกปกปิด ความคลาดเคลื่อนเชิงแนวของระบบท่อ และขนาดรูปร่างที่ต่างจากผลิตภัณฑ์จริง จากจุดตรวจสอบ 48 จุด พบความสอดคล้อง 32 จุด คิดเป็นร้อยละ 66.70 และพบความคลาดเคลื่อน 16 จุด คิดเป็นร้อยละ 33.30 โดยประเภทที่พบบ่อยที่สุดคือ องค์ประกอบที่ปรากฏในแบบจำลองแต่ไม่มีในสภาพจริง (5 จุด ร้อยละ 31.25) บนพื้นฐานของข้อค้นพบ งานวิจัยเสนอ 4 บทบาทของ AR ได้แก่ เครื่องมือตรวจสอบระหว่างก่อสร้าง กลไกยืนยันความพร้อมในการส่งมอบ LOD 500 เครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการอาคาร และกลไกย้อนปรับแบบจำลองตามสภาพจริง (model reconciliation) การนำกระบวนการนี้ไปใช้อย่างยั่งยืนต้องอาศัยเงื่อนไข 3 ประการ คือ เงื่อนไขเชิงสัญญา เงื่อนไขเชิงการบังคับใช้ และเงื่อนไขเชิงงบประมาณ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า AR ไม่ใช่เครื่องมือที่ทดแทนความเชี่ยวชาญของมนุษย์ แต่มีศักยภาพในการสนับสนุนให้การตรวจสอบในขั้นการส่งมอบมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือมากขึ้น และส่งเสริมการใช้ BIM เป็นระบบเอกสารแบบมีชีวิต (living documentation)

คำสำคัญ: ความเป็นจริงเสริม, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, การส่งมอบโครงการ, LOD 500, การบริหารจัดการอาคาร

¹ คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 25230

¹ Faculty of Industrial Technology and Management, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi Campus, Mueang Prachin Buri, Prachin Buri 25230, Thailand

* Corresponding author. E-mail: yutthana.k@fitm.kmutnb.ac.th

Abstract

Project handover is a critical activity in construction that requires verification of consistency between digital models and actual construction. Although Building Information Modeling (BIM) is widely adopted in the Thai construction industry, handover verification still relies primarily on screen-based comparison and practitioner expertise, lacking a systematic process that integrates 1:1 on-site verification into the handover workflow. This research proposes a new project handover process integrating Augmented Reality (AR) with BIM to support verification of BIM models against actual construction in preparation for LOD 500 handover, analyzes its practical implications for building owners, and suggests implementation conditions for the Thai construction industry. Conducted as a Proof-of-Concept and Process Proposal on a case study building under construction, BIM models were developed in Autodesk Revit at LOD 400 and above, converted to IFC, and displayed through the Gamma AR application on mobile devices. Testing was conducted at 48 inspection points covering architectural and sanitary works. The qualitative findings revealed five main deviation types: elements shown in the model but absent on site, position mismatches, hidden elements, pipe alignment deviations, and discrepancies in size and shape compared with actual products. Of the 48 inspection points, 32 (66.70%) were found consistent with the model and 16 (33.30%) exhibited deviations, with missing elements being the most prevalent issue (5 points, 31.25%). Based on these findings, the research proposes four roles for AR: a stage-based verification tool during construction, a mechanism for confirming readiness for LOD 500 handover, a support tool for facility management, and a model reconciliation mechanism. Sustainable implementation requires three structural conditions: contractual commitment, enforcement throughout construction, and dedicated budget allocation. The findings suggest that AR does not replace human expertise but has the potential to enhance the efficiency and reliability of handover verification and to support the use of BIM as a living documentation system usable throughout a building's lifecycle.

Keywords: augmented reality, building information modeling, project handover, LOD 500, facility management

บทนำ

การส่งมอบโครงการก่อสร้างเป็นขั้นตอนสำคัญที่เชื่อมระหว่างผู้รับเหมาและเจ้าของอาคาร โดยผู้รับเหมาที่มีพันธะตามสัญญาที่ต้องส่งมอบเอกสารและแบบจำลองที่สะท้อนสภาพจริงของอาคาร (as-built) แก่เจ้าของโครงการ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเข้าใช้งาน การบำรุงรักษา และการบริหารจัดการอาคาร (facility management: FM) ในระยะยาว เอกสารส่งมอบที่ไม่ครบถ้วนหรือไม่สอดคล้องกับสภาพจริงก่อให้เกิดปัญหาระยะยาวต่อทีม FM อย่างมีนัยสำคัญ (Lin et al., 2018) โดยในสหรัฐอเมริกาประมาณการว่าโครงการขนาดใหญ่ต้องใช้งบประมาณราว 4.80 พันล้านดอลลาร์ต่อปีเพื่อปรับข้อมูลให้ตรงกับสิ่งที่ก่อสร้างจริง (Gallaher et al., 2004) ตัวเลขเหล่านี้สะท้อนช่องว่างเชิงโครงสร้างระหว่างเจตนารมณ์ในการออกแบบ สภาพการก่อสร้างจริง และเอกสารที่ส่งมอบให้เจ้าของอาคาร

ขั้นตอนการตรวจสอบแบบก่อสร้างกับสภาพหน้างานจริงถือเป็นกิจกรรมสำคัญในขั้นการส่งมอบโครงการ อย่างไรก็ตาม แม้ในปัจจุบันที่อุตสาหกรรมก่อสร้างได้นำเทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (building information modeling: BIM) เข้ามาใช้อย่างแพร่หลาย กิจกรรมดังกล่าวยังคงต้องพึ่งพาความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก ผู้ตรวจสอบต้องตีความแบบรูปและแบบจำลอง BIM ควบคู่กับการสังเกตหน้างานเพื่อประเมินความสอดคล้อง ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงมนุษย์ที่ไม่แน่นอนและขึ้นกับประสบการณ์ของแต่ละบุคคล จึงอาจทำให้ผลการตรวจสอบไม่สอดคล้องกันระหว่างผู้ตรวจสอบ ดังนั้นแม้ว่า BIM จะได้ยกระดับคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบ แต่ช่องว่างระหว่างแบบจำลองดิจิทัลกับสภาพกายภาพของอาคารยังคงเป็นปัญหาเชิงกระบวนการที่สำคัญ จึงจำเป็นต้องหาวิธีทำงานรูปแบบใหม่ที่ยกระดับประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการตรวจสอบในขั้นส่งมอบ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา BIM ได้เปลี่ยนแปลงวิธีที่อุตสาหกรรมก่อสร้างจัดเก็บ สื่อสาร และจัดการข้อมูล โครงการอย่างมีนัยสำคัญ (McGraw-Hill Construction, 2014) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย BIM ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลายในขั้นตอนการออกแบบ (Ngowtanasawan, 2017) โดยทั่วไปแบบจำลองพัฒนาถึงระดับ level of development 300 (LOD 300) ที่ละเอียดพอสำหรับการประสานงานระหว่างสาขาและการขออนุญาตก่อสร้าง เมื่อเข้าสู่การก่อสร้างมักพัฒนาต่อเป็น LOD 400 ที่เทียบเคียงแบบก่อสร้าง (shop drawing) ดิจิทัลในระดับการผลิตและติดตั้ง ส่วนในขั้นส่งมอบ สัญญามักกำหนดให้ส่งมอบแบบจำลอง LOD 500 ซึ่งผ่านการตรวจสอบกับสภาพจริงและพร้อมสนับสนุนงาน FM ต่อไป (BIMForum, 2019)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่า BIM จะได้รับการยอมรับเพิ่มขึ้นตลอดวงจรชีวิตของโครงการ แต่ยังคงมีช่องว่างที่สำคัญในขั้นตอนการส่งมอบโครงการ แม้ว่า LOD 500 จะถูกนิยามตามสัญญาว่าเป็นแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบในพื้นที่จริง แต่กระบวนการตรวจสอบในปัจจุบันยังคงพึ่งพาการเปรียบเทียบบนหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็นหลัก โดยยังไม่มีกลไกที่เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบแบบจำลองดิจิทัลกับองค์ประกอบทางกายภาพของอาคารในอัตราส่วนตัวต่อตัว ข้อจำกัดนี้ก่อให้เกิดปัญหาสองประการ ประการแรก แบบจำลอง LOD 500 ที่ส่งมอบอาจไม่สะท้อนสภาพจริง เนื่องจากการปรับเปลี่ยนระหว่างก่อสร้างไม่ได้ถูกบันทึกเสมอไป ประการที่สอง การขาดวิธีตรวจสอบที่เชื่อถือได้ตอกย้ำความกังวลว่า BIM ใช้งานได้จริงนอกหน้าจอและเชื่อถือได้ในฐานะตัวแทนอาคารกายภาพหรือไม่

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (augmented reality: AR) นำเสนอแนวทางทางเทคโนโลยีในการแก้ไขช่องว่างนี้ AR ช่วยให้ผู้ใช้มองเห็นเนื้อหาดิจิทัลซ้อนทับบนมุมมองจริงได้ในเวลาเดียวกัน (Azuma, 1997) เมื่อใช้ร่วมกับ BIM จะแสดงแบบจำลองสามมิติในอัตราส่วน 1:1 ซ้อนทับสภาพก่อสร้างจริง ทำให้เปรียบเทียบเชิงพื้นที่ได้ทันที งานวิจัยที่ผ่านมาสำรวจศักยภาพของ AR หลายด้าน เช่น การวางแผนก่อนก่อสร้าง (Carozza et al., 2014) การติดตามความก้าวหน้าของงานในไซต์ (Zollmann et al., 2014) การตรวจสอบข้อบกพร่อง (Kwon et al., 2014) การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและสิ่งที่ก่อสร้างจริง (Chalhoub et al., 2021) ตลอดจนการสนับสนุนกระบวนการยื่นส่งมอบแบบจำลองที่มี BIM เป็นฐาน (Schranz et al., 2021) ภายใต้กรอบ Construction 4.0 AR ได้รับการยอมรับเป็นเทคโนโลยีหลักที่ทำงานร่วมกับ BIM เพื่อเชื่อมสภาพแวดล้อมกายภาพและไซเบอร์ของโครงการ (El Jazzer et al., 2021; Sidani et al., 2021)

แม้มีงานวิจัย AR-BIM จำนวนมาก แต่เฉพาะมิติการส่งมอบโครงการยังมีช่องว่างชัดเจนสามระดับที่งานวิจัยนี้มุ่งเติมเต็ม ในเชิงเทคนิค (technical gap) งานเดิมส่วนใหญ่เน้นความเป็นไปได้ของ AR ในการแสดงผล (visualization) หรือการตรวจจับข้อบกพร่องเฉพาะจุด (defect detection) เช่น Kwon et al., (2014) และ Chalhoub et al., (2021) ซึ่งมักทำในสภาพแวดล้อมควบคุม แต่ยังไม่เชื่อมโยงการตรวจสอบเข้ากับการยืนยันความพร้อมของแบบจำลองเพื่อการส่งมอบ (as-built handover) อย่างเป็นระบบ ในเชิงกระบวนการ (process gap) ยังไม่มีลำดับการทำงาน (workflow) ที่ชัดเจนว่า AR ควรถูกใช้ในช่วงใดของการก่อสร้าง และผลการตรวจสอบจะถูกป้อนกลับเพื่อปรับปรุงแบบจำลอง BIM ให้พร้อมส่งมอบในระดับ LOD 500 อย่างไร และในเชิงการนำไปใช้และเชิงสัญญา (contractual / implementation gap) งานวิจัยส่วนใหญ่ยังดำเนินการในบริบทของทวีปอเมริกาเหนือหรือยุโรป ทำให้ขาดข้อเสนอแนะด้านเงื่อนไขเชิงสัญญา งบประมาณ และการบังคับใช้ที่สอดคล้องกับบริบทของอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ซึ่งมีบรรทัดฐานทางสัญญา ความคาดหวังของเจ้าของโครงการ และระดับความพร้อมของอุตสาหกรรมที่แตกต่างกัน (Ngowtanasuwan & Hadikusumo, 2017)

เมื่อเทียบกับ Chalhoub et al., (2021) ที่เสนอใช้ AR ให้ผู้ใช้ระบุความคลาดเคลื่อนเพื่อปรับคืนแบบจำลอง (model reconciliation) ในเชิงเทคนิคเป็นหลัก งานวิจัยนี้แตกต่างออกไปโดยไม่ได้มุ่งวัดความแม่นยำของ AR เพียงอย่างเดียว แต่วาง AR เป็นองค์ประกอบหนึ่งของกระบวนการส่งมอบที่ปรับโครงสร้างใหม่ทั้งระบบ และเชื่อมโยงข้อค้นพบ เชิงเทคนิคเข้ากับ

เงื่อนไขเชิงสัญญาและเชิงกระบวนการในบริบทไทย ทั้งนี้ พึ่งเน้นว่างานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแนวทางกระบวนการ (process proposal) บนฐานของการพิสูจน์แนวคิด มิใช่การประเมินประสิทธิภาพเชิงปริมาณของระบบ AR อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือยังไม่ได้เปรียบเทียบเวลา ต้นทุน ความแม่นยำ หรือผลผลิตภาพ (productivity) กับวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม อย่างเป็นระบบ

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการส่งมอบแบบใหม่ที่ใช้ AR เป็นกลไกตรวจสอบและส่งมอบ โดยเป็นส่วนขยายของ BIM สู่สภาพแวดล้อมกายภาพ เพื่อสนับสนุนการยืนยันความสอดคล้องของแบบจำลองกับสภาพหน้างานจริง และเตรียมความพร้อมสำหรับการส่งมอบในระดับ LOD 500 และมีศักยภาพในการสนับสนุนการใช้ BIM ในรูปแบบของระบบเอกสารแบบมีชีวิต (living documentation) โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังนี้

1. เพื่อนำเสนอกระบวนการบูรณาการระหว่าง AR และ BIM ในการสนับสนุนการตรวจสอบสภาพการก่อสร้างจริง (as-built) และการปรับปรุงแบบจำลอง BIM สำหรับการเตรียมความพร้อมในการส่งมอบโครงการในระดับ LOD 500
2. เพื่อวิเคราะห์หัยยะเชิงปฏิบัติของกระบวนการบูรณาการนี้ต่อเจ้าของอาคาร โดยเฉพาะในขั้นการเข้าใช้งานและการบำรุงรักษา
3. เพื่อเสนอเงื่อนไขเชิงสัญญาและเชิงกระบวนการที่จำเป็นต่อการนำกระบวนการส่งมอบรูปแบบใหม่นี้ไปใช้จริง ในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงพิสูจน์แนวคิด (proof-of-concept) ร่วมกับการนำเสนอกระบวนการ (process proposal) โดยใช้กรณีศึกษาในไซต์งานจริง มิได้มุ่งวัดประสิทธิภาพของ AR อย่างเต็มรูป เช่น ความแม่นยำ เวลา ผลผลิตภาพ หรือต้นทุน แต่เน้นการจำแนกประเภทความคลาดเคลื่อนเชิงคุณภาพและข้อเสนอเชิงกระบวนการเป็นหลัก ขั้นตอนการดำเนินงานประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การคัดเลือกอาคารกรณีศึกษาและการเก็บข้อมูล (2) การพัฒนาแบบจำลอง BIM (3) การแปลงแบบจำลองเข้าสู่สภาพแวดล้อม AR และ (4) การทดสอบในไซต์งานจริง

1. อาคารกรณีศึกษา

อาคารกรณีศึกษาเป็นอาคาร 5 ชั้น พื้นที่ใช้สอยประมาณ 1,800 ตารางเมตร ที่อยู่ระหว่างก่อสร้างจริง สถานะการก่อสร้างขณะตรวจสอบ งานสถาปัตยกรรมแล้วเสร็จประมาณร้อยละ 97 และงานระบบสุขาภิบาลแล้วเสร็จประมาณร้อยละ 95 พื้นที่ที่เลือกตรวจสอบครอบคลุมพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ ณ ชั้น 1, 2, 4, 4M และชั้น 5 ของอาคาร การคัดเลือกพิจารณาจากสามเงื่อนไข คือ (1) อยู่ระหว่างก่อสร้างและเข้าถึงได้ (2) มีแบบจำลองสถาปัตยกรรมและระบบที่สามารถนำมาพัฒนาต่อได้ และ (3) มีความซับซ้อนของงานระบบที่สมเหตุสมผลสำหรับการตรวจสอบด้วย AR ทั้งนี้ ขอบเขตจำกัดเฉพาะงานสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาล เนื่องจากอยู่ในช่วงติดตั้ง ยังมองเห็นองค์ประกอบได้ขณะตรวจสอบ และมีความหลากหลายของความคลาดเคลื่อนเพียงพอต่อการพิสูจน์แนวคิด ส่วนชื่อโครงการและ ข้อมูลระบุตัวตนของผู้เกี่ยวข้องทั้งหมดได้รับการปกปิด เพื่อรักษาความเป็นส่วนตัวของโครงการ

2. การพัฒนาแบบจำลอง BIM และการนิยามระดับ LOD

แบบจำลอง BIM พัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Revit ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานในอุตสาหกรรมปัจจุบัน (Eastman et al., 2018) โดยพัฒนาจากแบบรูป 2 มิติ ครอบคลุมงานสถาปัตยกรรม (ผนัง ประตู หน้าต่าง พื้น ฝ้าเพดาน) และงานระบบสุขาภิบาล (ท่อน้ำดี ท่อน้ำทิ้ง สุขาภัณฑ์) การพัฒนาแบบจำลองดำเนินการในระดับ LOD ที่เทียบเคียงกับ LOD 400 ขึ้นไป เพื่อให้สามารถใช้เป็นฐานในการตรวจสอบกับสภาพหน้างานได้อย่างเที่ยงตรง

เพื่อความชัดเจนของคำว่า LOD 500 งานวิจัยนี้นิยามว่า แบบจำลองเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบอยู่ในระดับ LOD 400 (หรือ 400+) ซึ่งมีรายละเอียดเชิงเรขาคณิตระดับการติดตั้ง การตรวจสอบด้วย AR ทำหน้าที่เป็นกลไกสนับสนุน การตรวจสอบและการปรับปรุงแบบจำลองให้สอดคล้องกับสภาพจริง เพื่อเตรียมความพร้อมในการยกระดับเป็น LOD 500 มิใช่การยืนยันว่าแบบจำลองอยู่ในระดับ LOD 500 โดยตรงในขณะตรวจสอบ ทั้งนี้ เกณฑ์พิจารณาว่าองค์ประกอบ “พร้อม” สำหรับ LOD 500 เน้นความถูกต้องเชิงเรขาคณิต (geometry) และตำแหน่งติดตั้งที่ตรงกับสภาพจริงเป็นหลัก ส่วนการบรรจุข้อมูลคุณลักษณะ (attribute data) สำหรับงาน FM อย่างครบถ้วนถือเป็นขอบเขตที่ควรพัฒนาต่อในงานวิจัยอนาคต แบบจำลอง BIM ของอาคารกรณีศึกษา ดัง (Figure 1) โดยประกอบด้วยแบบจำลอง งานสถาปัตยกรรม (ซ้าย) และแบบจำลองงานระบบสุขาภิบาล (ขวา)

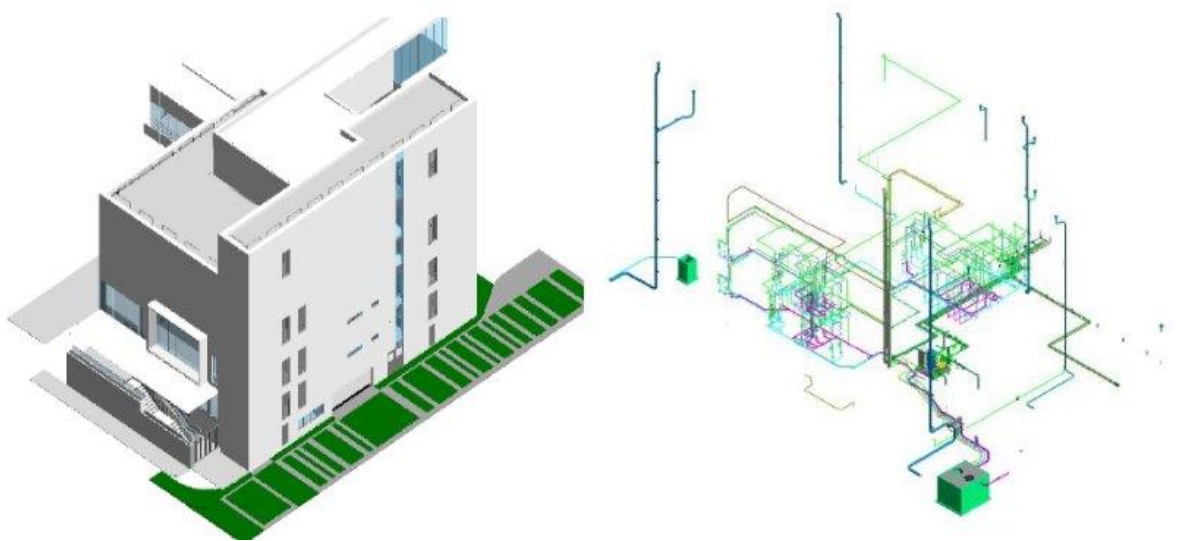


Figure 1 BIM models of the case study building: architectural model (left) and sanitary system model (right).

3. การคัดเลือกจุดตรวจสอบและการเลือกตัวอย่าง

การทดสอบดำเนินการใน 48 จุด โดยเลือกตัวอย่างตามความสะดวกบนฐานการเข้าถึงพื้นที่ (convenience sampling based on accessibility) มิใช่การสุ่มแบบความน่าจะเป็น แม้ตั้งใจตรวจให้ครอบคลุมทุกห้องทุกชั้น แต่บางพื้นที่เข้าถึงไม่ได้เพราะเจ้าของอาคารเข้าใช้งานแล้ว จุดตรวจสอบจำแนกเป็นงานสถาปัตยกรรม 35 จุด และงานระบบสุขาภิบาล 13 จุด โดยงานสถาปัตยกรรมมีสัดส่วนมากกว่าเพราะองค์ประกอบกระจายทั่วพื้นที่ การเลือกตัวอย่างวิธีนี้ทำให้บางพื้นที่ที่อาจมีความคลาดเคลื่อนไม่ถูกตรวจสอบ จึงเป็นข้อจำกัดด้านการเป็นตัวแทน (representativeness) ของผลการศึกษา และจุดตรวจสอบ 48 จุด ยังไม่อาจเป็นตัวแทนเชิงสถิติของอาคารทั้งหลังได้ ซึ่งถือเป็นข้อจำกัด ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อข้อจำกัด

4. ขั้นตอนการตรวจสอบและการจัดตำแหน่งแบบจำลองด้วย AR

การแปลงแบบจำลอง BIM เข้าสู่ AR ดำเนินการโดยแปลงไฟล์เป็นรูปแบบ IFC และนำเข้าสู่แอปพลิเคชัน Gamma AR บนแท็บเล็ต การทดสอบดำเนินการในพื้นที่จริง โดยผู้ทดสอบเป็นบุคลากรของโครงการฝั่งผู้รับเหมา ทำหน้าที่เป็นตัวแทนผู้ตรวจสอบงานก่อสร้างจริง (as-built inspector) ขั้นตอนการตรวจสอบในแต่ละจุดประกอบด้วย สามขั้นตอนหลัก ดัง (Figure 2)

ขั้นตอนแรก คือ การโหลดแบบจำลองเฉพาะส่วนที่ต้องการตรวจสอบเข้าสู่แอปพลิเคชัน เช่น เลือกเฉพาะงานระบบสุขาภิบาลของห้องนั้น แทนการโหลดทั้งอาคาร เพื่อให้แอปพลิเคชันประมวลผลได้รวดเร็วและแสดงผลคมชัด

ขั้นตอนที่สอง กำหนดพิกัดอ้างอิงระหว่างแบบจำลองกับพื้นที่จริง โดยใช้จุดอ้างอิงเชิงสถาปัตยกรรมที่สังเกตได้ชัด เช่น มุมห้องและตำแหน่งเสา อย่างน้อย 2-3 จุด เพื่อให้แบบจำลองซ้อนทับตำแหน่งถูกต้อง การตรวจสอบความถูกต้องของการจัดตำแหน่ง (alignment) ทำโดยการเทียบขอบผนังและแนวองค์ประกอบหลักว่าซ้อนทับกันสนิทก่อนเริ่มบันทึกภาพพบการเลื่อนไถล (drift) ระหว่างเคลื่อนกล้อง ผู้ตรวจสอบจะหยุดและจัดตำแหน่งใหม่ เพราะ alignment มีผลโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือของผล ทั้งนี้ ปัญหาการเลื่อนไถลและการขาดความต่อเนื่องของการจัดตำแหน่ง (registration) สอดคล้องกับข้อจำกัดที่ Messi et al., (2024) ระบุว่า เป็นอุปสรรคสำคัญของการนำ AR ไปใช้ในสภาพแวดล้อมจริง

ขั้นตอนที่สาม เล็งกล้องที่เบิ้ลไปยังองค์ประกอบที่ตรวจสอบ และบันทึกภาพคู่ระหว่างภาพแบบจำลอง AR ซ้อนทับสภาพจริง กับภาพสภาพจริงในมุมมองเดียวกัน เพื่อใช้เป็นหลักฐานเชิงภาพในการเปรียบเทียบและปรับปรุงแบบจำลองต่อไป ตัวอย่างของภาพคู่ที่ได้จากกระบวนการนี้ปรากฏใน (Figures 3-5)



Figure 2 On-site AR inspection workflow using a tablet device with the Gamma AR application: loading the selected BIM model, aligning coordinates with the actual space (left), and capturing paired images of the AR overlay and actual installation for verification (right).

5. เกณฑ์การพิจารณาความคลาดเคลื่อนและรายการตรวจสอบ

เนื่องจากการตรวจสอบเชิงคุณภาพด้วยการสังเกตและภาพถ่ายซ้อนทับ การพิจารณาว่าจุดใดเป็น “ความคลาดเคลื่อน” จึงใช้เกณฑ์เชิงคุณภาพ (visual / qualitative deviation) มากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข (numerical tolerance) กล่าวคือ จุดตรวจสอบจะถูกบันทึกว่าเป็นความคลาดเคลื่อนเมื่อสังเกตเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างตำแหน่ง แนว ขนาด หรือการมีอยู่ขององค์ประกอบในแบบจำลอง AR กับสภาพจริงจากภาพคู่ที่บันทึกได้ในกรณีที่ต้องการประเมินระยะเบื้องต้น ผู้ตรวจสอบใช้เครื่องมือวัดระยะในแอปพลิเคชันเป็นตัวช่วยเท่านั้น และจะยืนยันด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐานเมื่อจำเป็น รายการสิ่งที่ผู้ตรวจสอบต้องพิจารณาในแต่ละจุด ดัง (Table 1)

Table 1 Inspection checklist items applied at each inspection point by work category.

work category	inspection checklist items
architectural	existence, position/alignment, size/shape
sanitary	existence/position, pipe alignment/slope, hidden elements

6. ผู้ตรวจทานและยืนยันผล

การตรวจทานความน่าเชื่อถือดำเนินการโดยผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญจากบริษัทผู้รับเหมา 10 คน ซึ่งเป็นวิศวกรโยธาหลากหลายบทบาท เช่น วิศวกรอาวุโส (senior engineer) จำนวน 3 คน ผู้จัดการโครงการ (project manager) จำนวน 2 คน และวิศวกร BIM จำนวน 5 คน โดยมีทั้งผู้ที่มีและไม่มีประสบการณ์การใช้งาน AR มาก่อน การประเมินทำผ่านวิดีโอสารัตถะกระบวนการและการตรวจทานรายงานผล โดยนำผลรายจุด (ตรง/ไม่ตรง) มาตรวจทานความคลาดเคลื่อนเชิงคุณภาพและความถูกต้องของการจัดหมวดหมู่ เพื่อยืนยันสาเหตุและประเภทของความคลาดเคลื่อนก่อนเชื่อมโยงสู่ข้อเสนอเชิงกระบวนการ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลจึงไม่อยู่ในขอบเขตที่ต้องผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) การพัฒนาแบบจำลองและการแสดงผลผ่าน AR (2) ภาพรวมเชิงปริมาณของผลการตรวจสอบ และ (3) ลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่พบจากการตรวจสอบในไซต์งานจริง โดยส่วนของการตีความและการเชื่อมโยงกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แยกนำเสนอในหัวข้ออภิปรายผล ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่น่าเสนอในส่วนนี้เป็นข้อค้นพบเชิงคุณภาพบนพื้นฐานการพิสูจน์แนวคิด โดยอาศัยภาพถ่ายคู่ระหว่างแบบจำลอง AR ที่ซ้อนทับกับสภาพการติดตั้งจริงดัง (Figures 3-5) เป็นหลักฐานประกอบการจำแนกประเภทของความคลาดเคลื่อน

1. การพัฒนาแบบจำลองและการแสดงผลผ่าน AR

แบบจำลอง BIM ของอาคารกรณีศึกษาได้รับการพัฒนาจนครอบคลุมองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาลตามที่กำหนด เมื่อแปลงเป็นไฟล์ IFC และนำเข้าสู่แอปพลิเคชัน Gamma AR แล้ว แบบจำลองสามารถแสดงผลในอัตราส่วน 1:1 ซ้อนทับกับสภาพหน้างานจริงได้ตามวัตถุประสงค์ ผู้ทดสอบสามารถเห็นผนัง ประตู หน้าต่าง ตลอดจนท่อและสุขภัณฑ์ของแบบจำลองปรากฏอยู่ในตำแหน่งเดียวกับสภาพการก่อสร้างจริง ผ่านหน้าจอ แท็บเล็ตและสมาร์ตโฟน โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ AR เฉพาะทางราคาสูง

2. ภาพรวมเชิงปริมาณของผลการตรวจสอบ

จากจุดตรวจสอบทั้งสิ้น 48 จุด ผลการตรวจสอบพบว่าจุดตรวจสอบจำนวน 32 จุด (คิดเป็นร้อยละ 66.70) มีความสอดคล้องระหว่างแบบจำลองและสภาพการก่อสร้างจริง และพบความคลาดเคลื่อนจำนวน 16 จุด (คิดเป็น ร้อยละ 33.30) ของจุดตรวจสอบทั้งหมด โดยสามารถจำแนกประเภทของความคลาดเคลื่อนที่พบและค่าร้อยละ ดัง (Table 2)

Table 2 Frequency of deviation types identified across the 48 inspection points.

no.	type of deviation	points	%
1	element in model, absent on site	5	31.25
2	position mismatch	3	18.75
3	hidden element	2	12.50
4	pipe alignment deviation	2	12.50
5	size & shape discrepancy	4	25.00
total deviations		16	100.00

3. ลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่พบ

ผู้วิจัยจำแนกลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่พบออกเป็น 5 ลักษณะหลัก ดังนี้

ลักษณะแรก คือ องค์ประกอบที่ปรากฏในแบบจำลองแต่ไม่ปรากฏในการก่อสร้างจริง ตัวอย่างที่พบในการทดสอบคือ เครื่องกั้นน้ำและก๊อกน้ำที่ปรากฏในแบบจำลอง AR แต่ไม่ได้ถูกติดตั้งในสภาพจริง ดัง (Figure 3a) ซึ่ง AR แสดงเครื่องกั้นน้ำในตำแหน่งที่สภาพจริงเป็นผนังโล่ง

ลักษณะที่สอง คือ องค์ประกอบที่ถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับแบบจำลอง ตัวอย่างเช่น ตำแหน่งของกล่องกระดาษชำระในห้องน้ำที่แตกต่างจากตำแหน่งที่ระบุไว้ในแบบจำลอง ดัง (Figure 3b)

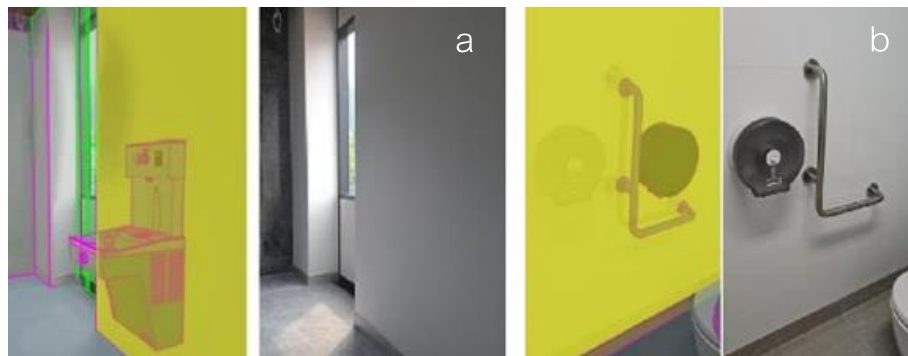


Figure 3 Examples of deviations detected through AR: water dispenser shown in AR but absent on actual site (a); toilet paper holder position mismatch between AR and actual installation (b).

ลักษณะที่สาม คือ องค์ประกอบที่ถูกปกปิดโดยงานก่อสร้างชั้นต่อมา ซึ่งพบมากในงานระบบสุขาภิบาล เช่น ท่อที่เดินอยู่ภายในผนังหรือฝ้าเพดานซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้จากพื้นที่ใช้สอย ในกรณีเหล่านี้ ผู้ทดสอบทำได้เพียงเปรียบเทียบตำแหน่งของสุขภัณฑ์ที่ปลายท่อนั้น ตัวอย่างของคุณค่าในเชิงการซ่อมบำรุงปรากฏใน (Figure 4) ซึ่งแสดงการตรวจสอบสุขภัณฑ์ด้วย AR ร่วมกับแบบจำลองที่เปิดเผยตำแหน่งของท่อใต้พื้น ซึ่งในสภาพอาคารที่ใช้งานแล้วจะถูกปกปิดโดยพื้นและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

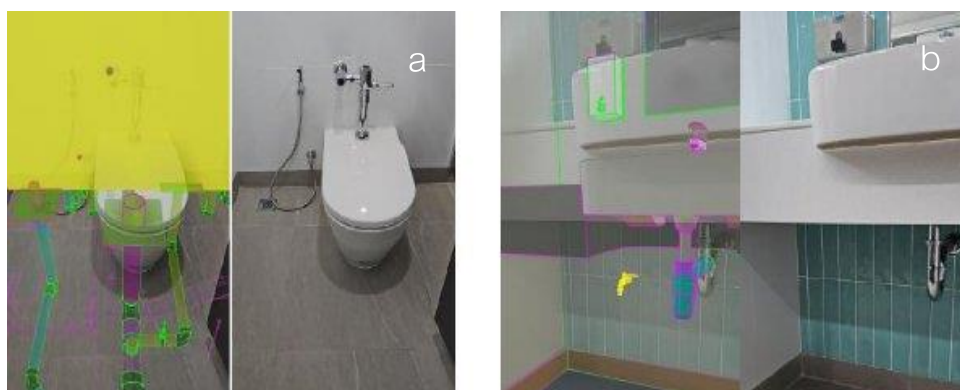


Figure 4 AR visualization of sanitary fixtures revealing underfloor piping: toilet (a) and washbasin (b). This view shows the pipes buried beneath the floor, which are essential references for future maintenance.

ลักษณะที่สี่ ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้บ่อยในงานระบบท่อ คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงแนวระหว่างท่อในแบบจำลองกับการติดตั้งจริง โดยเฉพาะในมิติของความลาดเอียง (slope) ของท่อ ตำแหน่งของอุปกรณ์ยึดโยง (hanger) และอุปกรณ์รองรับท่อในพื้นที่จริง ดัง (Figure 5)



Figure 5 AR overlay of the sanitary piping system showing alignment issues between the BIM model and actual installation, particularly in pipe slope, hanger positions, and support fixtures.

ลักษณะที่ห้า คือ ความคลาดเคลื่อนในมิติของขนาดและรูปร่างขององค์ประกอบในแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งที่ติดตั้งจริง ลักษณะนี้พบได้ทั้งในงานสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาล เช่น ประตู หน้าต่าง และสุขภัณฑ์ ซึ่งในแบบจำลองมีรูปทรงที่คล้ายคลึงแต่ไม่ตรงกันอย่างสมบูรณ์กับผลิตภัณฑ์ที่ถูกเลือกใช้ในการติดตั้งจริง

อภิปรายผล

การอภิปรายผลในส่วนนี้จัดโครงสร้างให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยทั้งสามข้อ ได้แก่ (1) นัยยะต่อกระบวนการตรวจสอบและการตีความความคลาดเคลื่อน (2) นัยยะต่อเจ้าของอาคารและการบริหารจัดการอาคาร และ (3) เงื่อนไขการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย โดยเชื่อมโยงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและกรอบแนวคิด เชิงทฤษฎี

1. นัยยะต่อกระบวนการตรวจสอบและการตีความความคลาดเคลื่อน

ความสามารถในการแสดงผลในอัตราส่วน 1:1 บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ทั่วไปเป็นจุดแข็งที่ทำให้การประยุกต์ใช้ในไซต์งานจริงมีความเป็นไปได้ทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบ head-mounted display ที่พบในงานวิจัยเชิงวิชาการจำนวนมาก แต่ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งชี้ให้เห็นว่า AR สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมระหว่างแบบจำลองดิจิทัลและสภาพแวดล้อมทางกายภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zollmann et al., 2014; Chalhoub et al., 2021) และสอดคล้องกับ Pan & Isnaeni (2024) ที่ชี้แนวทาง AR-BIM บนอุปกรณ์เคลื่อนที่เพื่อยกระดับการตรวจสอบงานก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในเชิงการตีความ ความคลาดเคลื่อนลักษณะแรก (องค์ประกอบในแบบจำลองแต่ไม่มีในสภาพจริง) มีนัยยะโดยตรงต่อปริมาณงานและพันธะทางสัญญาของผู้รับเหมา โดยอาจเกิดจากสองสาเหตุที่นำไปสู่แนวทางจัดการต่างกัน สาเหตุแรก คือ การขาดปริมาณงานตามรายการประกอบแบบ (bill of quantities: BOQ) ซึ่งผู้รับเหมาต้องมีพันธะตามสัญญาที่ต้องดำเนินการติดตั้งให้ครบก่อนการส่งมอบ สาเหตุที่สอง คือ การเปลี่ยนแปลงงานระหว่างการก่อสร้าง (variation order) แบบลดงาน (omission) ที่ตกลงร่วมกันแล้วแต่ยังไม่ได้ปรับปรุงแบบจำลอง ซึ่งแนวทางที่ถูกต้องคือการปรับแบบจำลองให้สอดคล้องกับสัญญาที่แก้ไขแล้ว การแยกแยะสองสาเหตุนี้ยังคงต้องอาศัยการวินิจฉัยโดยผู้เชี่ยวชาญที่เทียบเคียงข้อมูล

จาก AR เข้ากับเอกสารโครงการ อย่างไรก็ตาม AR มีศักยภาพในการช่วยลดภาระของการตรวจสอบ กล่าวคือ ในแนวปฏิบัติปัจจุบันผู้ตรวจสอบต้องไล่ตรวจทุกองค์ประกอบตาม BOQ แต่ด้วย AR ผู้ตรวจสอบสามารถ มุ่งความสนใจไปที่เฉพาะจุดที่ AR ชี้ให้เห็นความคลาดเคลื่อนได้ การใช้ AR จึงไม่ได้แทนที่การตัดสินใจของมนุษย์ แต่มีศักยภาพในการสนับสนุนให้การยืนยันความพร้อมก่อนส่งมอบมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ความคลาดเคลื่อนลักษณะที่สอง (ตำแหน่งไม่ตรง) สามารถแยกได้สองกรณี กรณีแรก การติดตั้งจริงไม่ตรงกับแบบรูปต้นฉบับ ซึ่งต้องปรับแก้ที่หน้างาน และกรณีที่สอง การติดตั้งจริงตรงกับแบบรูปแต่แบบจำลองคลาดเคลื่อนซึ่งต้องปรับปรุงแบบจำลองให้สะท้อนสภาพจริง โดยผู้พัฒนาแบบจำลอง (modeler) สามารถใช้ภาพซ้อนทับจาก AR เป็นหลักฐานเชิงพื้นที่ ส่วนความคลาดเคลื่อนลักษณะที่สาม (องค์ประกอบที่ถูกปกปิด) นำไปสู่ระยะเชิงกระบวนการที่สำคัญ คือ การตรวจสอบด้วย AR ไม่ควรเป็นกิจกรรมที่ทำเพียงครั้งเดียวในขั้นส่งมอบ แต่ควรเป็นการตรวจสอบแบบเป็นขั้นตอน (stage-based verification) ตลอดช่วงการก่อสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Chalhoub et al., (2021) และความคลาดเคลื่อนลักษณะที่สี่ (เชิงแนวของท่อ) ชี้ให้เห็นความจำเป็นของกระบวนการย้อนกลับ (feedback loop) จากไทม์ไลน์เข้าสู่การปรับปรุงแบบจำลอง

2. นัยยะต่อเจ้าของอาคารและการบริหารจัดการอาคาร

ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและการเปิดเผยองค์ประกอบที่ถูกปกปิด เช่น ท่อใต้พื้นใน (Figure 4) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการอาคารในระยะยาว เนื่องจากตำแหน่งที่ถูกต้องขององค์ประกอบมีผลต่อการเข้าถึงการซ่อมบำรุงและการวางแผนการใช้พื้นที่ ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับ Kwon et al., (2014) ที่รายงานว่า AR สามารถใช้เป็นเครื่องมือตรวจจับความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนแนวคิดของ Fan et al., (2023) ที่ชี้ว่า AR มีศักยภาพสูงในการใช้งานในขั้นการบริหารจัดการอาคาร และสอดคล้องกับ Messi et al., (2024) ที่พัฒนาระบบ AR สำหรับงานบริหารจัดการอาคารโดยลดข้อจำกัดด้านการจัดตำแหน่งในสภาพแวดล้อมจริง เมื่อพิจารณาในเชิงทฤษฎี กระบวนการที่เสนอนี้สอดคล้องกับแนวคิด digital twin และระบบเอกสารแบบมีชีวิต (living documentation) ซึ่งมองแบบจำลองดิจิทัลเป็นตัวแทนของอาคารทางกายภาพที่ถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับสภาพจริงอย่างต่อเนื่อง การตรวจสอบและการย้อนปรับแบบจำลองด้วย AR จึงเป็นกลไกหนึ่งที่ทำให้แนวคิด digital twin มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติมากขึ้น สอดคล้องกับ Song et al., (2023) ที่เสนอการใช้ AR เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ของข้อมูล BIM สำหรับการพัฒนา digital twin

3. เงื่อนไขการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

ความคลาดเคลื่อนลักษณะที่ห้า (ขนาดและรูปร่างไม่ตรงกับผลิตภัณฑ์จริง) สะท้อนข้อจำกัดเชิงโครงสร้างของแนวปฏิบัติปัจจุบัน กล่าวคือ ผู้พัฒนาแบบจำลองมักต้องสร้างองค์ประกอบด้วยตนเองจากภาพถ่ายหรือข้อมูลพื้นฐานซึ่งไม่สะท้อนรายละเอียดทางเรขาคณิตและคุณลักษณะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์อย่างครบถ้วน จากข้อค้นพบนี้ผู้วิจัยจึงเสนอเป็นแนวทางเชิงอนาคต (มีข้อค้นพบที่พิสูจน์แล้วในงานวิจัยนี้) ว่าผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง (manufacturer) ควรเป็นผู้พัฒนาแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ตนเองพร้อมข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ (specification) ในลักษณะของ BIM object ที่พร้อมใช้งาน ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางของ BIM object library ที่พัฒนาในหลายประเทศ

นอกจากนี้ ในหลายช่วงของการอภิปราย จำเป็นต้องระมัดระวังการสรุปเกินหลักฐาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ยังไม่ได้วัดเวลา ต้นทุน ผลผลิตภาพ หรือความแม่นยำอย่างเป็นระบบ ดังนั้นการกล่าวถึงประโยชน์ของ AR จึงควรอยู่ในกรอบของ “ศักยภาพในการช่วยลดภาระและสนับสนุนประสิทธิภาพ” มากกว่าการยืนยันว่า AR “ลดต้นทุน” หรือ “เพิ่มประสิทธิภาพ” ได้แล้วอย่างพิสูจน์ชัด การนำกระบวนการที่เสนอไปใช้จริงในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยให้เกิดผลอย่างยั่งยืน จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขเชิงโครงสร้างสามประการที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ เงื่อนไขเชิงสัญญา เงื่อนไขเชิงการบังคับใช้ และเงื่อนไขเชิง

งบประมาณ เหตุผลที่ทั้งสามเงื่อนไขมีความจำเป็นสืบเนื่องโดยตรงจากข้อค้นพบ กล่าวคือ ข้อค้นพบเรื่ององค์ประกอบที่ถูกปิด (ลักษณะที่สาม) แสดงว่าหากไม่มีการบังคับใช้ให้ตรวจสอบตลอดช่วงการก่อสร้าง องค์ประกอบสำคัญจำนวนมากจะถูกปิดทับก่อนได้รับการตรวจสอบ ข้อค้นพบเรื่องการย้อนปรับแบบจำลอง (ลักษณะที่สองและสี่) แสดงว่าหากไม่มีการระบุพันธะในสัญญาและจัดสรรงบประมาณสำหรับการปรับปรุงแบบจำลอง การส่งมอบ LOD 500 ที่สะท้อนสภาพจริงจะไม่เกิดขึ้น นอกจากนี้ พันธะผูกพันตามสัญญายังจำเป็นเพราะการตรวจสอบต้องอาศัยการเข้าถึงพื้นที่ในช่วงเวลาที่เหมาะสม ดังที่พบว่าบางพื้นที่ไม่สามารถเข้าตรวจสอบได้เมื่อเจ้าของอาคารเข้าครอบครอง แล้ว ทั้งนี้สอดคล้องกับ Rawdin et al., (2026) ที่ชี้ว่าการนำเทคโนโลยีและมาตรฐานไปใช้ให้เกิดผลในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีกลไกการกำกับและการบังคับใช้ที่ชัดเจน ด้วยเหตุนี้ หากปราศจากเงื่อนไขเชิงโครงสร้างทั้งสามประการ ศักยภาพของ AR ในการสนับสนุนการตรวจสอบงานส่งมอบย่อมเกิดขึ้นได้ยากอย่างยิ่ง

เมื่อสังเคราะห์จากข้อค้นพบและการอภิปรายข้างต้น ผู้วิจัยเสนอให้พิจารณา AR ใน 4 บทบาทที่เชื่อมโยงกันตามระยะของวงจรชีวิตโครงการ ได้แก่ บทบาทแรก เครื่องมือตรวจสอบระหว่างการก่อสร้างในลักษณะการตรวจสอบแบบเป็นขั้นตอน บทบาทที่สอง กลไกยืนยันความพร้อมในการส่งมอบแบบจำลอง LOD 500 ซึ่งสอดคล้องกับคำนิยามของ LOD 500 ตาม BIMForum (2019) บทบาทที่สาม เครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการอาคารหลังการส่งมอบ โดยช่วยระบุตำแหน่งองค์ประกอบที่ถูกปิดบัง (Chung et al., 2018; Fan et al., 2023) และบทบาทที่สี่ กลไกการย้อนปรับแบบจำลองตามสภาพจริง (model reconciliation) ซึ่งอาศัยภาพบันทึกซ้อนทับจาก AR เป็นหลักฐานเชิงพื้นที่ให้ผู้พัฒนาแบบจำลองนำไปปรับปรุงทั้งสี่บทบาทนี้ร่วมกันเปลี่ยนสถานะของ BIM จากเอกสารที่ใช้เฉพาะในขั้นตอนออกแบบและก่อสร้าง ให้มีศักยภาพกลายเป็นระบบเอกสารแบบมีชีวิตที่ใช้งานได้ตลอดอายุของอาคาร

ข้อจำกัดของเครื่องมือและกระบวนการ

แม้กระบวนการตรวจสอบด้วย AR จะแสดงศักยภาพที่ชัดเจน แต่ผู้วิจัยพบข้อจำกัดสำคัญที่ควรพิจารณา ประการแรก ข้อจำกัดของมุมมองและพื้นที่ใช้งาน ในพื้นที่แคบหรือมีสิ่งกีดขวาง ผู้ทดสอบไม่สามารถถอยออกได้มากพอที่จะเก็บภาพในมุมมองกว้าง ส่งผลต่อการซ้อนทับและอาจเกิดความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง ประการที่สอง ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดระยะในแอปพลิเคชัน ซึ่งให้ผลคลาดเคลื่อนในระดับที่ไม่ควรใช้เป็นตัววัดหลัก จึงควรใช้คู่กับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ประการที่สาม ข้อจำกัดของกระบวนการแปลงไฟล์จาก Revit เป็น IFC ที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลบางส่วน ประการที่สี่ ข้อจำกัดเชิงคุณสมบัติเฉพาะของแอปพลิเคชัน Gamma AR ซึ่งทำให้ผลที่ได้สะท้อนคุณลักษณะเฉพาะของแอปพลิเคชันนี้ในระดับหนึ่ง ประการที่ห้า การศึกษาบนกรณีศึกษาเดียว ซึ่งยังไม่ครอบคลุมความหลากหลายของรูปแบบอาคารและบริบทโครงการ ประการที่หก ขอบเขตของระบบงานที่ศึกษาครอบคลุมเฉพาะงานสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาล ไม่ครอบคลุมงานระบบไฟฟ้า ปรับอากาศ ดับเพลิง หรือโครงสร้าง และประการที่เจ็ด ลักษณะข้อมูลเชิงคุณภาพ ซึ่งใช้การสังเกตและบันทึกภาพเป็นหลัก โดยไม่ได้ใช้การวัดเชิงปริมาณที่เป็นระบบหรือการศึกษาผู้ใช้งานในวงกว้าง ผลการศึกษาจึงเน้นการนำเสนอลักษณะของปัญหาและข้อเสนอเชิงกระบวนการมากกว่าการวัดประสิทธิภาพเชิงตัวเลข

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการบูรณาการเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (AR) ร่วมกับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อสนับสนุนการตรวจสอบสภาพการก่อสร้างจริงในขั้นการส่งมอบโครงการ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อแบบจำลอง BIM ที่พัฒนาในระดับ LOD 400 ขึ้นไปถูกแปลงเป็นรูปแบบ IFC และแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Gamma AR บน อุปกรณ์เคลื่อนที่ทั่วไป สามารถซ้อนทับกับสภาพการก่อสร้างจริงในอัตราส่วน 1:1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยให้ตรวจพบ

ความคลาดเคลื่อนได้อย่างเป็นระบบใน 5 ลักษณะหลัก บนพื้นฐานของข้อค้นพบ งานวิจัยเสนอกระบวนการส่งมอบรูปแบบใหม่ที่วาง AR ไว้ใน 5 บทบาทที่เชื่อมโยงกันได้แก่ เครื่องมือตรวจสอบแบบเป็นขั้นตอนระหว่างก่อสร้าง กลไกยืนยันความพร้อมในการส่งมอบ LOD 500 เครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการอาคาร และกลไกการย้อนปรับแบบจำลองตามสภาพจริง ซึ่งร่วมกันมีศักยภาพในการเปลี่ยน BIM ให้กลายเป็นระบบเอกสารแบบมีชีวิต

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาข้างต้นตั้งอยู่บนข้อจำกัดที่ควรเน้นย้ำอีกครั้ง ได้แก่ การเป็นกรณีศึกษาเพียงโครงการเดียว ขอบเขตที่จำกัดเฉพาะงานสถาปัตยกรรมและงานระบบสุขาภิบาล การเก็บข้อมูลที่เป็นเชิงคุณภาพด้วยการสังเกตและภาพถ่ายโดยไม่มีการวัดเชิงปริมาณอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุนี้ ข้อสรุปของงานวิจัยจึงควรถูกตีความในฐานะข้อเสนอเชิงกระบวนการบนพื้นฐานการพิสูจน์แนวคิด มากกว่าการยืนยันประสิทธิภาพเชิงปริมาณ

การนำกระบวนการนี้ไปใช้ให้เกิดผลอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยจำเป็นต้องมีเงื่อนไขเชิงโครงสร้างสามประการ คือ เงื่อนไขเชิงสัญญาที่ระบุพันธะการใช้ AR ในเอกสารสัญญาตั้งแต่เริ่มโครงการ เงื่อนไขเชิงการบังคับใช้ที่ดำเนินการตลอดช่วงการก่อสร้าง และเงื่อนไขเชิงงบประมาณที่จัดสรรไว้ตั้งแต่ขั้นประมาณราคา หากขาดเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง ศักยภาพของ AR ในการตรวจสอบงานส่งมอบย่อมเกิดขึ้นได้ยากอย่างยั่งยืน

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอ 6 ทิศทาง ได้แก่ (1) การศึกษาเชิงปริมาณเปรียบเทียบเวลาและต้นทุนของการตรวจสอบด้วย AR กับวิธีดั้งเดิม รวมถึงการเปรียบเทียบแอปพลิเคชัน AR ที่แตกต่างกัน (2) การขยายขอบเขตไปยังงานระบบที่ซับซ้อนสูง เช่น ไฟฟ้า ปรับอากาศ และดับเพลิง (3) การขยายไปยังกรณีศึกษาที่หลากหลาย (4) การศึกษาประสบการณ์ผู้ใช้งาน (user study) (5) การศึกษาเชิงนโยบายและสัญญาในบริบทไทย และ (6) การพัฒนากรอบความร่วมมือระหว่างผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ก่อสร้างและอุตสาหกรรม BIM เพื่อให้การส่งมอบ LOD 500 มีความหมายครบถ้วนทั้งมิติของรูปทรงและข้อมูลเชิงเทคนิค

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายในอาคารกรณีศึกษา ทั้งฝ่ายผู้รับเหมาและฝ่ายเจ้าของโครงการ ที่ให้ความร่วมมือและอนุญาตให้เข้าถึงพื้นที่ก่อสร้างจริงและข้อมูลแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง อันเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการได้ในสภาพแวดล้อมของโครงการก่อสร้างจริง

เอกสารอ้างอิง

- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- BIMForum. (2019). *Level of development (LOD) specification part I & commentary: For building information models and data*. BIMForum. <https://bimforum.org/lof>
- Carozza, L., Tingdahl, D., Bosché, F., & van Gool, L. (2014). Markerless vision-based augmented reality for urban planning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(1), 2-17. <https://doi.org/10.1111/mice.12029>
- Chalhoub, J., Ayer, S. K., & McCord, K. H. (2021). Augmented reality to enable users to identify deviations for model reconciliation. *Buildings*, 11(2), 77. <https://doi.org/10.3390/buildings11020077>

- Chung, S. W., Kwon, S. W., Moon, D. Y., & Ko, T. K. (2018). Smart facility management systems utilizing open BIM and augmented/virtual reality (pp. 1252-1257). *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0181>
- Eastman, C. M., Teicholz, P. M., Sacks, R., & Lee, G. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- El Jazzar, M., Piskernik, M., & Nassereddine, H. (2021). A framework for construction 4.0 based on reflections from US construction organizations. *Sustainability*, 13(24), 13774. <https://doi.org/10.3390/su132413774>
- Fan, S. L., Lee, C. Y., Chong, H. Y., & Skibniewski, M. J. (2023). A critical review of augmented reality applications for building life-cycle management. *Automation in Construction*, 145, 104644. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104644>
- Gallaher, M. P., O'Connor, A. C., Dettbarn, J. L., & Gilday, L. T. (2004). *Cost analysis of inadequate interoperability in the U.S. capital facilities industry (NIST GCR 04-867)*. National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.04-867>
- Kwon, O. S., Park, C. S., & Lim, C. R. (2014). A defect management system for reinforced concrete work utilizing BIM, image-matching and augmented reality. *Automation in Construction*, 46, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.015>
- Lin, Y. C., Chen, Y. P., Yien, H. W., Huang, C. Y., & Su, Y. C. (2018). Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital. *Advanced Engineering Informatics*, 36, 130-145. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.03.005>
- McGraw-Hill Construction. (2014). *The business value of BIM for construction in major global markets: How contractors around the world are driving innovation with building information modeling (SmartMarket Report)*. McGraw-Hill Construction.
- Messi, L., Spegni, F., Vaccarini, M., Corneli, A., & Binni, L. (2024). Seamless augmented reality registration supporting facility management operations in unprepared environments. *Journal of Information Technology in Construction*, 29, 1156-1180. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.051>
- Ngowtanasawan, G. (2017). A causal model of BIM adoption in the Thai architectural and engineering design industry. *Procedia Engineering*, 180, 793-803. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.240>
- Ngowtanasuwan, G., & Hadikusumo, B. H. W. (2017). System dynamics modelling for BIM adoption in Thai architectural and engineering design industry. *Construction Innovation*, 17(3), 301-322. <https://doi.org/10.1108/CI-03-2016-0018>
- Pan, N. H., & Isnaeni, N. N. (2024). Integration of augmented reality and building information modeling for enhanced construction inspection: A case study. *Buildings*, 14(3), 612. <https://doi.org/10.3390/buildings14030612>

- Rawdin, A., Khudhair, A., & Li, H. (2026). BIM and ISO 19650 implementation in the Welsh construction industry: A case study of bottom-up governance in a non-mandated region. *Journal of Information Technology in Construction*, 31, 461-476. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2026.021>
- Schranz, C., Urban, H., & Gerger, A. (2021). Potentials of augmented reality in a BIM based building submission process. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 441-457. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.024>
- Sidani, A., Dinis, F. M., Duarte, J., Sanhudo, L., Calvetti, D., Baptista, J. S., Poças Martins, J., & Soeiro, A. (2021). Recent tools and techniques of BIM-based augmented reality: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 42, 102500. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102500>
- Song, J., Park, S., Lee, K., Bae, J., Kwon, S., Cho, C.-S., & Chung, S. (2023). Augmented reality-based BIM data compatibility verification method for FAB digital twin implementation. *Buildings*, 13(11), 2683. <https://doi.org/10.3390/buildings13112683>
- Zollmann, S., Hoppe, C., Kluckner, S., Poglitsch, C., Bischof, H., & Reitmayr, G. (2014). Augmented reality for construction site monitoring and documentation. *Proceedings of the IEEE*, 102(2), 137-154. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2294314>