



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ครั้งที่ 11
The 11th STOU National Research Conference

การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง และถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง โดยซอฟต์แวร์
โปรตัสตรัคเจอร์ สำหรับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

Structural Shop Drawing and Quantities Take-off Using Prota Structure Software
for Building Information Modeling

อรรถสิทธิ์ คำหล้า (Attasit Khamlar) ¹ มานพ แก้วโมราเจริญ (Manop Kaewmoracharoen) ²

เกรียงไกร อรุณทยานันท์ (Kiangkrai Arunotayanun) ³

บทคัดย่อ

ในงานก่อสร้างมักพบปัญหาความผิดพลาดคลาดเคลื่อนของงานเอกสาร โดยเฉพาะในด้านการถอดปริมาณวัสดุและการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง ซึ่งมักพบความขัดแย้งระหว่างแบบสถาปัตยกรรมและแบบวิศวกรรมโครงสร้างโดยเฉพาะจากรูปแบบสองมิติแบบดั้งเดิม เครื่องมือที่ถูกนำมาช่วยทำงานในปัจจุบันมีหลากหลาย โดยในงานวิจัยมุ่งเน้นทดสอบซอฟต์แวร์ในชื่อ ProtaStructure ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์หนึ่งในรูปแบบของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยเน้นศักยภาพในความแม่นยำในการถอดปริมาณวัสดุโดยอ้างอิงมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างของประเทศไทย อิงตามมาตรฐาน ACI และ AISC ในการทดลองได้ใช้แบบจำลองในรูปแบบเดียวกัน เทียบกับเครื่องมืออื่นอีกสองรูปแบบ และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ศักยภาพตามที่ได้กล่าวไว้ โดยการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติงานวิชาชีพที่มีประสบการณ์โดยตรง เช่น ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ เป็นต้น ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี ทั้งหมด 7 คน ผลที่คาดว่าจะได้รับเป็นความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ ในด้านของศักยภาพและประสิทธิภาพในการทำงาน

คำสำคัญ แบบแสดงรายละเอียด ถอดปริมาณวัสดุ ซอฟต์แวร์โปรตัสตรัคเจอร์ แบบจำลองสารสนเทศอาคาร

¹ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ k_attasit@hotmail.com

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ manop@eng.cmu.ac.th

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ kiangkrai@eng.cmu.ac.th

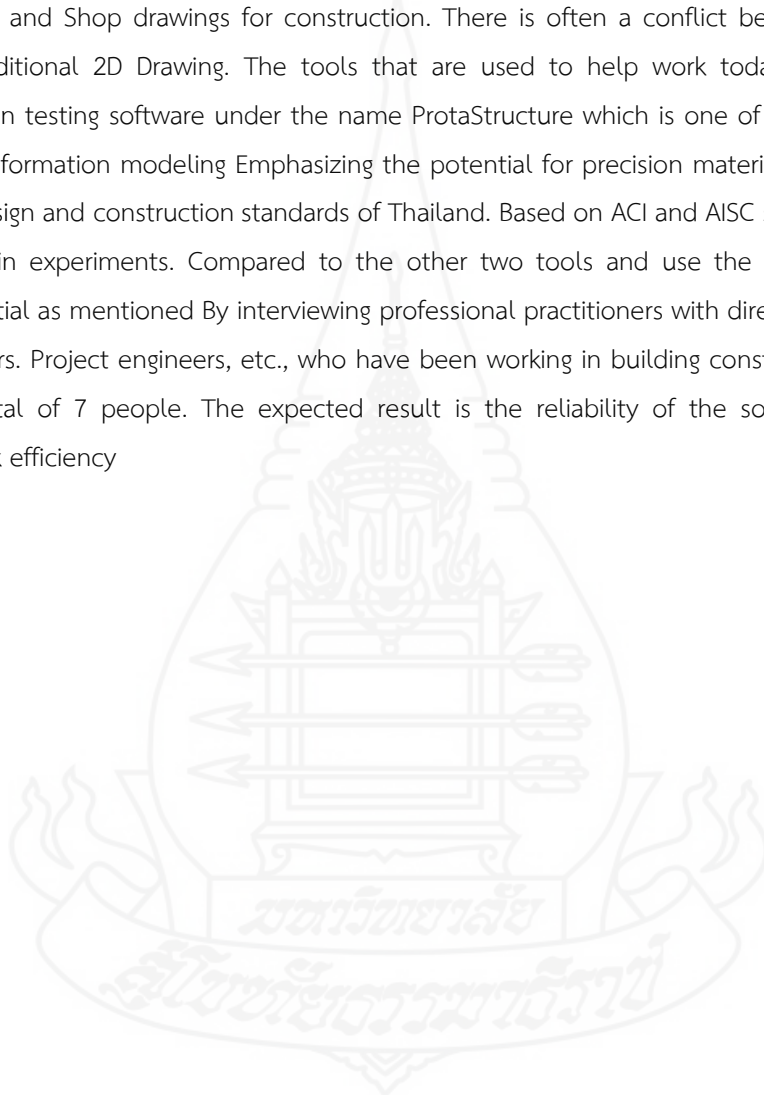


การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

Abstract

In the construction work, there are often problems with document errors. especially in the Quantities take-off and Shop drawings for construction. There is often a conflict between architectural and structural traditional 2D Drawing. The tools that are used to help work today are diverse. The research focuses on testing software under the name ProtaStructure which is one of the software in the form of building information modeling Emphasizing the potential for precision material quantification. By referring to the design and construction standards of Thailand. Based on ACI and AISC standards, the same model was used in experiments. Compared to the other two tools and use the results obtained to analyze the potential as mentioned By interviewing professional practitioners with direct experience, such as project managers. Project engineers, etc., who have been working in building construction for not less than 10 years, total of 7 people. The expected result is the reliability of the software. in terms of potential and work efficiency



Keywords: Structural shop drawing, Quantities take-off, Prota structure, Building information modeling



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

บทนำ

ปัญหาที่มักเกิดขึ้นจากการทำแบบก่อสร้าง พบว่าเกิดจากวัฏจักรของการบริหารและการจัดการโครงการก่อสร้าง และการสื่อสารหลักยังคงต้องพึ่งพาระบบเอกสาร (paper-based) ซึ่งอาจเกิดการละเลยหรือความผิดพลาดขึ้นได้ เกิดต้นทุน การแก้ไขงานซ้ำซ้อน เกิดความล่าช้าเสียหาย ถูกลงโทษปรับ และ/หรือ อาจเกิดความขัดแย้งที่ลุกลามไปสู่การเรียกร้องสิทธิ์ จนถึงขั้นเป็นคดีความ

การก่อสร้างในปัจจุบันเมื่อเริ่มดำเนินโครงการก่อสร้าง วิศวกรโครงสร้างโครงการฝ่ายผู้รับเหมาก่อสร้าง จะต้องรับ แบบพิมพ์เขียวหรือไฟล์พีดีเอฟ (PDF) มาจากฝ่ายวิศวกรผู้ออกแบบ หรือเจ้าของโครงการ จากนั้นต้องนำมาจัดทำรายละเอียด หรือ Shop Drawing โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง แบบรูปวิศวกรรมโครงสร้าง แบบรูปสถาปัตยกรรมและแบบวิศวกรรม งานระบบประกอบอาคาร โดยสิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ การทำงานที่ขาดประสิทธิภาพ มีข้อผิดพลาดในหลายๆส่วนงาน ทั้งนี้ปัจจัย ต่างๆ ขึ้นกับสมรรถนะและประสบการณ์ของวิศวกรโครงการ แต่ด้วยเทคโนโลยี BIM (เครื่องมือ BIM) แบบจำลองสารสนเทศ อาคาร คือ การนำโมเดลสามมิติ รวมเข้ากับข้อมูลสารสนเทศอาคาร เพื่อแก้ไขปัญหาและลดข้อจำกัดจากการทำงาน

BIM (building information modeling) หรือกระบวนการจำลองการก่อสร้างและบริหารการก่อสร้างในรูปแบบ ข้อมูล digital มีลักษณะคล้ายการเขียนโมเดล 3 มิติ ที่มีการฝังข้อมูลเข้าไปในโมเดล กระบวนการ BIM ได้รับความนิยมใน ต่างประเทศ ทั้งอเมริกา ยุโรป ออสเตรเลีย เกาหลี สิงคโปร์ และญี่ปุ่น ส่วนในประเทศไทย มีหลายองค์กรเล็งเห็นประโยชน์ที่ เกิดขึ้นจาก BIM ซึ่งเกิดขึ้นกับทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนี้

1. ผู้ออกแบบ (designer) กล่าวคือ “ผู้ออกแบบ” ถือเป็นต้นน้ำของอุตสาหกรรมก่อสร้าง การใช้เครื่องมือ ประเภท CAD (Computer-Aided Design) ผ่านการใช้งานมายาวนาน ผู้เกี่ยวข้องมีความคุ้นเคยไม่ต้องปรับตัวมากเกี่ยวกับ เครื่องมือดังกล่าว แต่ก็มีข้อจำกัดอย่างที่ปรากฏ ทำให้ต้องมีการนำ BIM tools มาใช้งาน

2. ผู้รับเหมาหลัก (General Contractor :GC) ในช่วงเวลาการก่อสร้าง ผู้รับเหมาสามารถนำ BIM มาช่วยตรวจสอบ ความขัดแย้งของแบบ ซึ่งช่วยลดความสูญเสียจากความผิดพลาดในการทำงาน เช่น การรื้องานก่อสร้างแล้วทำใหม่ รวมถึง BIM ยังสามารถถอดปริมาณวัสดุได้อย่างแม่นยำ ทำให้สามารถควบคุมเวลาและงบประมาณการก่อสร้างได้ดี นอกจากนี้ BIM ยังช่วยผลิตแบบหน้างาน (shop drawing) และแบบก่อสร้างจริง (as-built drawing) ที่มีลักษณะเป็น 2 มิติ โดยออกมาจาก โมเดล 3 มิติได้ด้วย จึงเรียกได้ว่ากระบวนการ BIM ช่วยลดการทำงานที่ซ้ำซ้อนได้

3. เจ้าของงาน (owner) ได้รับประโยชน์สูงสุด เนื่องจากช่วยควบคุมค่าใช้จ่ายและประหยัดค่าก่อสร้างได้ อีกทั้งเมื่อ เจ้าของงานได้รับแบบก่อสร้างจริง (as-built drawing) ในลักษณะที่เป็น BIM model จะช่วยให้เจ้าของอาคารเพิ่ม ประสิทธิภาพในการบริหารจัดการอาคารและทรัพย์สิน (facility management)

แบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นเทคโนโลยีในการออกแบบและก่อสร้างอาคาร โดยมีหลักการที่จะใช้ แบบจำลอง สารสนเทศอาคารเป็นสื่อกลางแบบดิจิทัลที่รวบรวมข้อมูลต่างๆ เช่น ลักษณะทางกายภาพ ข้อมูลผลิตภัณฑ์ ที่ได้รับการ ออกแบบ รายละเอียดต่างๆของแบบก่อสร้าง เงื่อนไขด้านต่างๆ เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจัดเก็บเข้าไว้ใน แบบจำลอง สารสนเทศอาคาร เป็นข้อมูลเฉพาะของโครงการ ที่ทุกฝ่ายที่มีส่วนในการออกแบบและก่อสร้างในโครงการสามารถแลกเปลี่ยน ข้อมูลระหว่างกัน (Hexu Liu, Ming Lu, Mohamed Al-Hussein, 2559)

การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เป็นกระบวนการที่สร้างความร่วมมือ ครอบคลุมทุกฝ่ายในอุตสาหกรรม การก่อสร้าง แม้จะมีการเริ่มใช้และการเติบโตเพิ่มขึ้นเพียงในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา แต่แบบจำลองสารสนเทศอาคารสามารถเป็น



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

สื่อกลาง เป็นส่วนช่วยสร้างภาษาสื่อสารระหว่างทุกฝ่ายและทุกแผนก เชื่อมโยงระบบการทำงานต่างๆในโครงการและทำให้พวกเขาทำงานแบบบูรณาการเป็นทีม วิธีการของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ตรงกับระบบการส่งมอบโครงการแบบบูรณาการ บทบาทของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในฐานะผู้ประสานงานทุกๆระบบในโครงการนั้น ค่อนข้างคล้ายคลึงกับหน้าที่ของผู้จัดการโครงการแบบจำลองสารสนเทศอาคาร รวมหมวดงานที่แตกต่างกันโดยสื่อสารที่มีประสิทธิภาพวิเคราะห์ระบบโครงการเพื่อการก่อสร้าง ประเมินราคา และเวลาของโครงการ เมื่อใดก็ได้โดยใช้วิธีการสร้างทีมงานร่วมกัน ทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่ผู้จัดการโครงการทำในระดับที่แตกต่างกันระหว่างวงจรชีวิตของโครงการ (Saeed Rokooei, 2558)

โดยปกติแล้วการถอดปริมาณวัสดุและการประมาณราคา ได้รับการดำเนินการและพัฒนาด้วยแบบสองมิติ ที่จัดทำโดยสถาปนิกให้กับผู้รับเหมา อย่างไรก็ตามในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้เปลี่ยนแปลงไปสู่การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร และการถอดปริมาณวัสดุจะใช้ข้อมูลตามแบบที่สร้างขึ้น (Darren Olsen JD, J. Mark Taylor PhD, JD, 2560)

ProtaStructure เป็นซอฟต์แวร์สำหรับวิศวกร เพื่อช่วยในงานก่อสร้างที่เป็นทั้งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างเหล็ก ซึ่งรองรับมาตรฐานทางวิศวกรรมการออกแบบและก่อสร้างที่เป็นสากล ทั้งมาตรฐานสหรัฐอเมริกา ยุโรป ญี่ปุ่น และมาตรฐานของแต่ละประเทศอย่าง สิงคโปร์ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และประเทศไทย

ProtaStructure สามารถช่วยเขียนแบบโครงสร้างต่างๆ ของอาคาร เช่น ฐานราก เสา คาน พื้น ผนัง ฝ้าต่างๆ ให้ออกมาโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการเขียนแบบได้ ช่วยถอดปริมาณ และน้ำหนักเหล็กอย่างถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ ออกเป็น Bar Cutting List ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และในส่วนของการสร้างเหล็ก ก็สามารถเขียนแบบละเอียดทุกๆท่อนของเหล็ก พร้อมแสดงรายละเอียดจุดต่อในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างละเอียดทั้งแบบรอยเชื่อม Welded Joint Connection และแบบสลักเกลียว Bolt Joint Connection

ProtaStructure สามารถเชื่อมต่อโมเดล พร้อมกับตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ง่าย ด้วยการแสดงเฉดสี พร้อมกับคำอธิบายรายละเอียดการเปลี่ยนแปลง รองรับไฟล์ Revit Structure และไฟล์ .IFC สามารถตรวจสอบแบบ Cross check กับซอฟต์แวร์ออกแบบอื่นๆได้ เช่น ETABS, SAP2000, Sframe, LUSAS, และอื่นๆ

ทั้งนี้วิศวกรโครงสร้างสามารถใช้ ProtaStructure เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคาร แบบ 3 มิติ โดยกำหนดมาตรฐานโครงสร้างเหล็ก และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ แล้วทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของอาคารที่ออกแบบเพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างนั้นมีเสถียรภาพและความมั่นคงแข็งแรงเพียงพอหรือไม่ ก่อนนำไปก่อสร้างจริงได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างงานโครงสร้าง (Structural Shop Drawing) และถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง (Quantities take-off)
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง (Quantities take-off) ผ่านทางซอฟต์แวร์โปรตัสตรัคเจอร์ (ProtaStructure) กับซอฟต์แวร์ไมดาส เอนเจน (Midas nGen) และการถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างด้วยวิธีคำนวณด้วยมือผ่านการจัดทำตารางในลักษณะสเปรดชีต (Spread Sheet) ในโปรแกรม Microsoft Excel
3. เพื่อศึกษาปัญหา ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ เกี่ยวกับแนวทางที่เหมาะสมในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11
The 11th STOU National Research Conference

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ขอบเขตงานวิจัย

1.1 ขอบเขตด้านสถานที่ โครงการที่จะนำมาศึกษาจะใช้โครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวม ค.ส.ล. 4 ชั้น ตำบลสุเทพ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ขนาดพื้นที่ใช้สอยประมาณ 1,700 ตร.ม. ความสูงรวม 12.00 ม.

1.2 ขอบเขตของการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ผู้วิจัยได้คัดเลือกใช้ซอฟต์แวร์ ProtaStructure เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อใช้ในการบริหารโครงการก่อสร้าง การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างทั้งงานโครงสร้างเหล็กgrupพรรณ และโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เพื่อเป็นการบรรลุเป้าหมายของงานวิจัย สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรม เพื่อดูแนวทางการนำทฤษฎีการประยุกต์ใช้ Building Information Modeling (BIM) ในขั้นตอนการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง และถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง ดังนี้

- การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง ในการบริหารโครงการก่อสร้าง
- การถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างในการบริหารโครงการก่อสร้าง
- การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง
- การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในการถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง
- มาตรฐานการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง และการถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างในประเทศไทย

2. จัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร

2.1 จัดทำแบบจำลองสารสนเทศงานโครงสร้างอาคาร

ในส่วนของโครงสร้างอาคาร ที่ทำวิจัยอยู่นี้ มีส่วนของโครงสร้างฐานรากจนถึงคานหลังคา ถูกออกแบบเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงหลังคาอาคารเป็นโครงสร้างเหล็กgrupพรรณ ดังนั้น การจัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร จะทำการสร้างแบบจำลองทั้งอาคารให้ครบถ้วนทั้งอาคารก่อน แล้วจึงแยกการทำงานออกเป็น 2 รูปแบบ ในขั้นตอนต่อไป

2.2 ตรวจสอบแบบจำลองเพื่อส่งไปทำงานในขั้นตอนต่อไป

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของ แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ที่จัดทำขึ้นก่อนส่งข้อมูลไปจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง และถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างของแต่ละงานในขั้นตอนต่อไป

3. จัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง (Structural Shop Drawing)

3.1 การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

จัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในส่วนโครงสร้างฐานราก ไปจนถึงโครงสร้างคานหลังคา

3.2 การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง งานโครงสร้างเหล็กgrupพรรณ



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

จัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง งานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ในส่วนของโครงหลังคาอาคาร

4. ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง (Quantities take-off)

4.1 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในส่วนโครงสร้างฐานราก ไปจนถึงโครงสร้างคานหลังคา

4.2 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างเหล็ก

ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ในส่วนของโครงหลังคาอาคาร

5. ถอดปริมาณวัสดุโครงสร้างเทียบกับเครื่องมืออื่นอีกสองรูปแบบ แล้วจัดทำตารางเปรียบเทียบปริมาณเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของซอฟต์แวร์

5.1 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง จากโปรแกรมอื่น

ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างด้วยซอฟต์แวร์ Midas nGen ซึ่งเป็นโปรแกรมหนึ่งที่นิยมใช้ในการถอดปริมาณงาน โดยใช้แบบจำลองในรูปแบบเดียวกัน

5.2 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง วิธีคำนวณด้วยมือ

ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างด้วยวิธีคำนวณด้วยมือผ่านการจัดทำตารางในลักษณะสเปรดชีต (Spread Sheet) ในโปรแกรม Microsoft Excel

5.3 จัดทำตารางเปรียบเทียบปริมาณทั้งหมด

จัดทำตารางเปรียบเทียบปริมาณทั้งหมด เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรมที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือ

6. สัมภาษณ์ผู้ทรงคุณวุฒิ เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่พัฒนากับการทำงานปัจจุบัน

สัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติวิชาชีพที่มีประสบการณ์โดยตรง เช่น ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ เป็นต้น ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี ทั้งหมด 7 คน โดยสอบถามเกี่ยวกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับรูปแบบการทำงานที่ทำอยู่ในปัจจุบัน

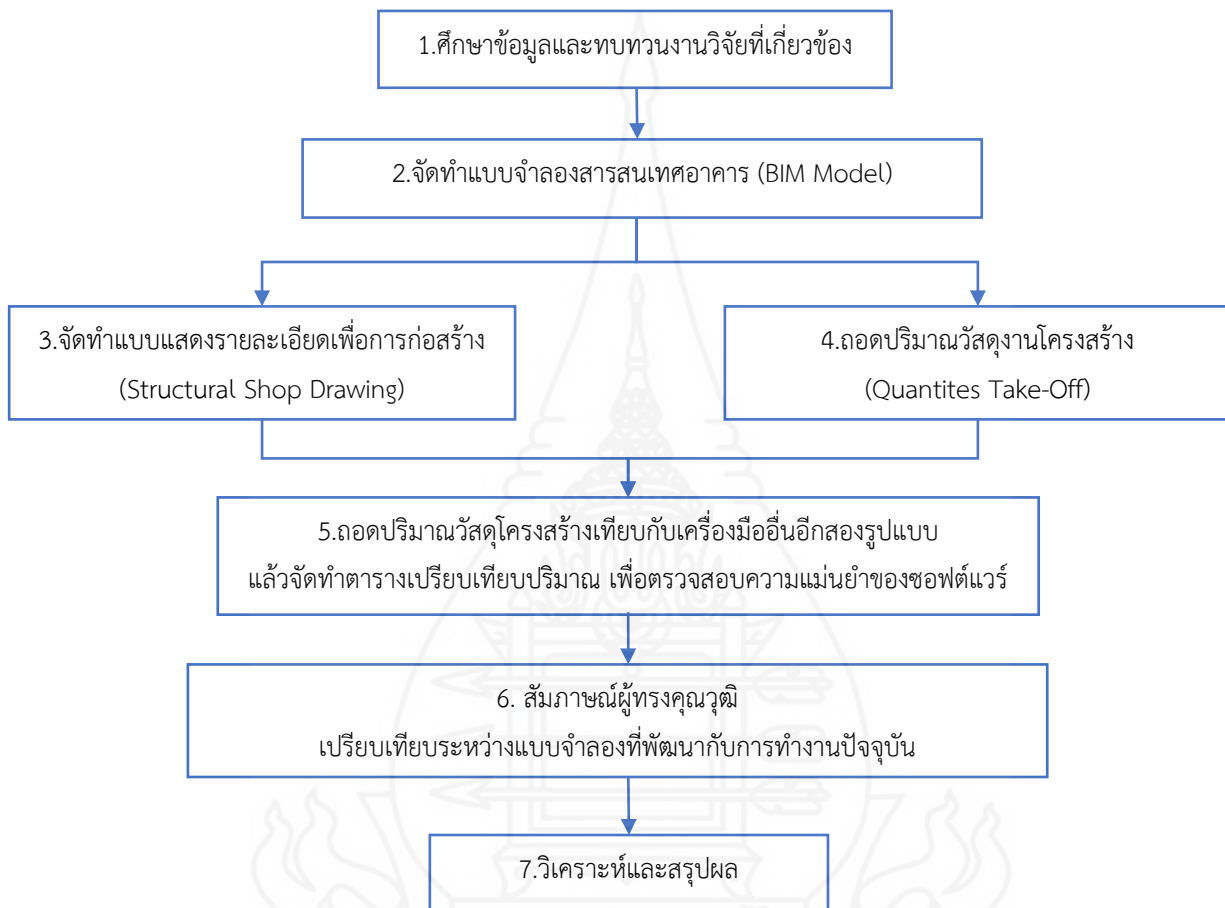
7. วิเคราะห์และสรุปผล



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

เมื่อได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคารแล้ว ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์ และสรุปผลจากการสัมภาษณ์ความคิดเห็นและความเป็นไปได้ในการใช้งาน ซึ่งจะรวมถึงข้อจำกัดในการนำไปใช้ เพื่อสร้างความเหมาะสมในการใช้



งานในอนาคต

แผนภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัย

1. การศึกษาข้อมูลและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ได้รับความสนใจ ศึกษา และงานวิจัยเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในหลากหลายสาขาวิชาชีพและหลากหลายองค์กร เช่น สถาปนิกและวิศวกรผู้ทรงคุณวุฒิจากภาครัฐ ภาคการศึกษา และภาคเอกชนที่มีความสนใจ BIM จะเห็นได้จากการผลักดันให้มีการจัดทำมาตรฐานการทำงานที่ชื่อ “มาตรฐานการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BUILDING INFORMATION MODELING STANDARD) ตามแนวทางสภาวิชาชีพ” ขึ้นอันมีจุดประสงค์เพื่อให้วงการออกแบบ และก่อสร้างสามารถนำมาตรฐานฉบับนี้ไปทำงานร่วมกันครบวงจร ตั้งแต่การศึกษาความเป็นไปได้โครงการ การออกแบบ การคำนวณราคาค่าก่อสร้าง บริหารการก่อสร้าง จนสามารถส่งมอบงานได้ ตรงตามความต้องการของเจ้าของโครงการ อีกทั้งยังมีการจัดตั้งสมาคมแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Thai Building



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

Information Modeling Association : TBIM) ขึ้นด้วย ทั้งนี้ซอฟต์แวร์ ProtaStructure เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์สำหรับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ที่มีแนวโน้มเป็นที่นิยม โดยเห็นได้จากหลายองค์กรจัดให้มีการอบรมการใช้งานซอฟต์แวร์ อาทิ

- หลักสูตรการอบรมเรื่อง ออกแบบโครงสร้างด้วย ProtaStructure รุ่นที่ 1 ระหว่างวันที่ 25 – 26 สิงหาคม 2563 ณ ห้องประชุม อาคาร วสท. จัดโดย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.)

- โครงการอบรมเชิงปฏิบัติการ การใช้โปรแกรม ProtaStructure ระหว่างวันที่ 24 - 25 กันยายน 2563 ณ ห้องคอมพิวเตอร์ อาคารบริการวิชาการ ชั้น 3 มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง จัดโดย บริษัท แอปพลิเคชัน จำกัด (มหาชน)

2. จัดทำแบบจำลองสารสนเทศงานโครงสร้างอาคาร การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัยรวม ค.ส.ล. 4 ชั้น โดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure ภายใต้มาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตรฐานที่ใช้ประกอบการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure

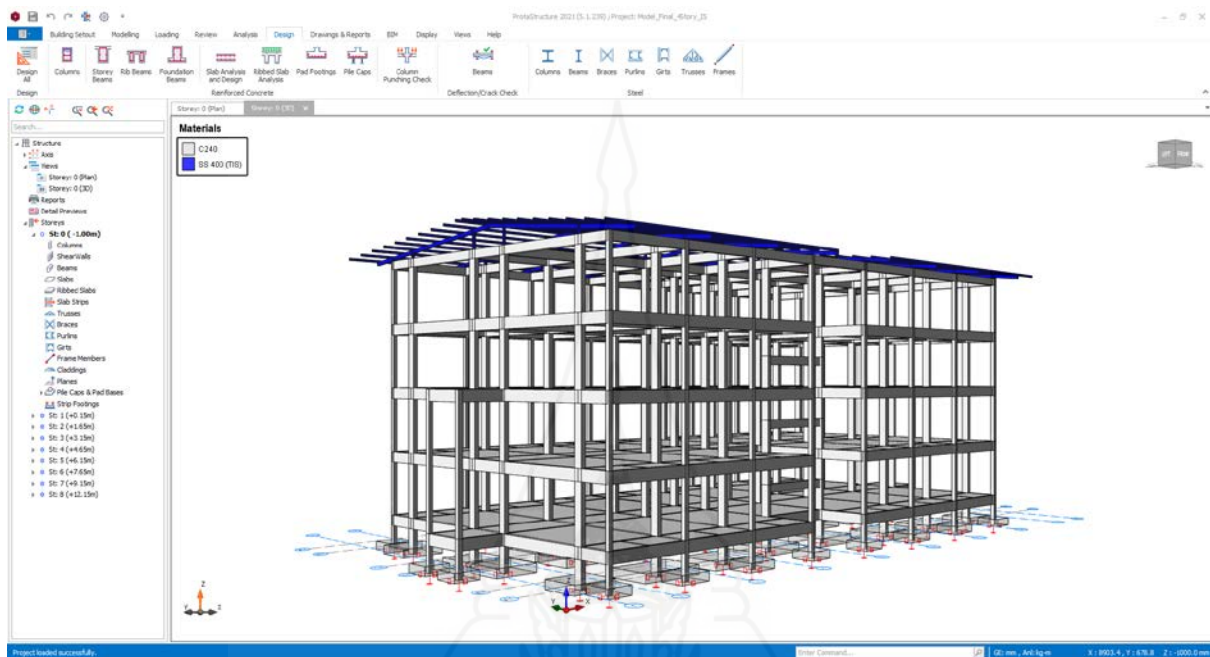
มาตรฐานสำหรับ	ชื่อมาตรฐาน	สถาบันมาตรฐาน
การออกแบบโครงสร้างอาคาร คอนกรีตเสริมเหล็ก	ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete	The American Concrete Institute
	มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง วสท.1008-38	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.)
การออกแบบโครงสร้างอาคาร เหล็กgrupพรรณ	AISC-ASD89 “Specification for Structural Steel Buildings” Allowable Stress Design	American Institute of Steel Construction
	มาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กgrupพรรณ มาตรฐาน วสท. 1015-40	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.)



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

แบบจำลองสารสนเทศอาคารโดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure อ้างอิงมาตรฐานข้างต้น ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นแสดงในรูปแบบ

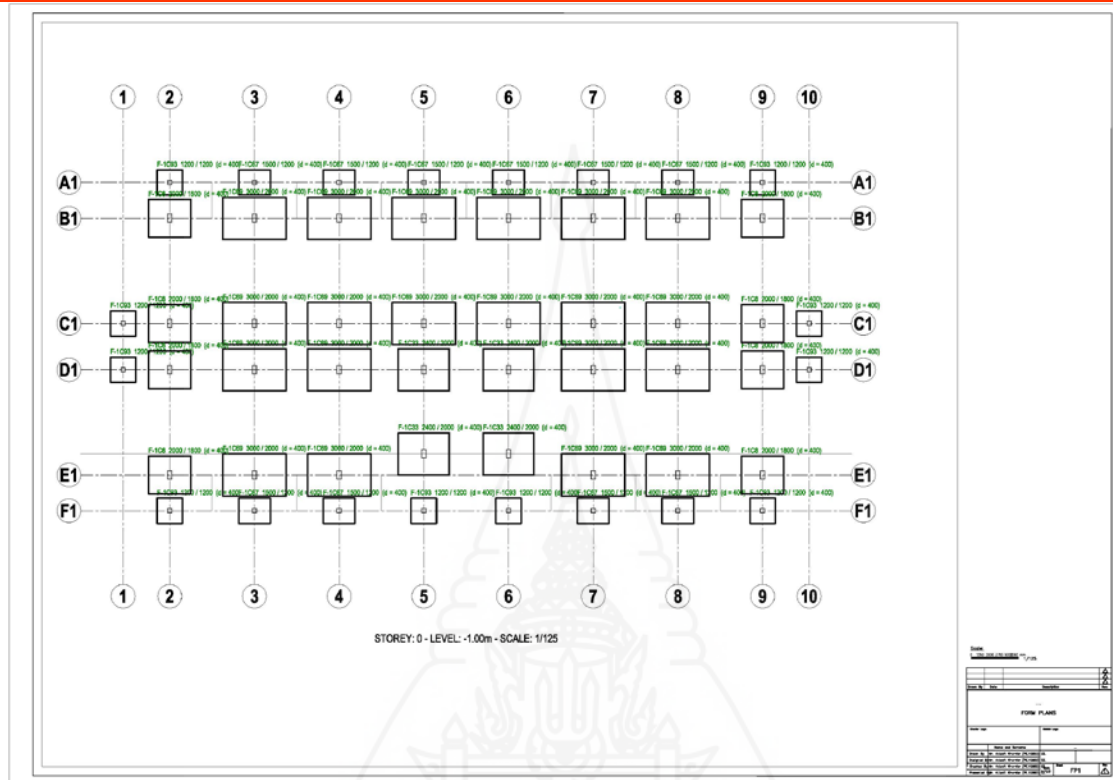


ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ในมุมมอง 3 มิติ จำแนกตามมาตรฐานวัสดุ ที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น

3. จัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง ได้จากการส่งข้อมูลของแบบจำลองสารสนเทศ ไปจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างอัตโนมัติโดยใช้ฟังก์ชันที่ชื่อ โปรตาดีเทล (ProtaDetail) ตัวอย่างแบบก่อสร้าง แสดงในรูปแบบ



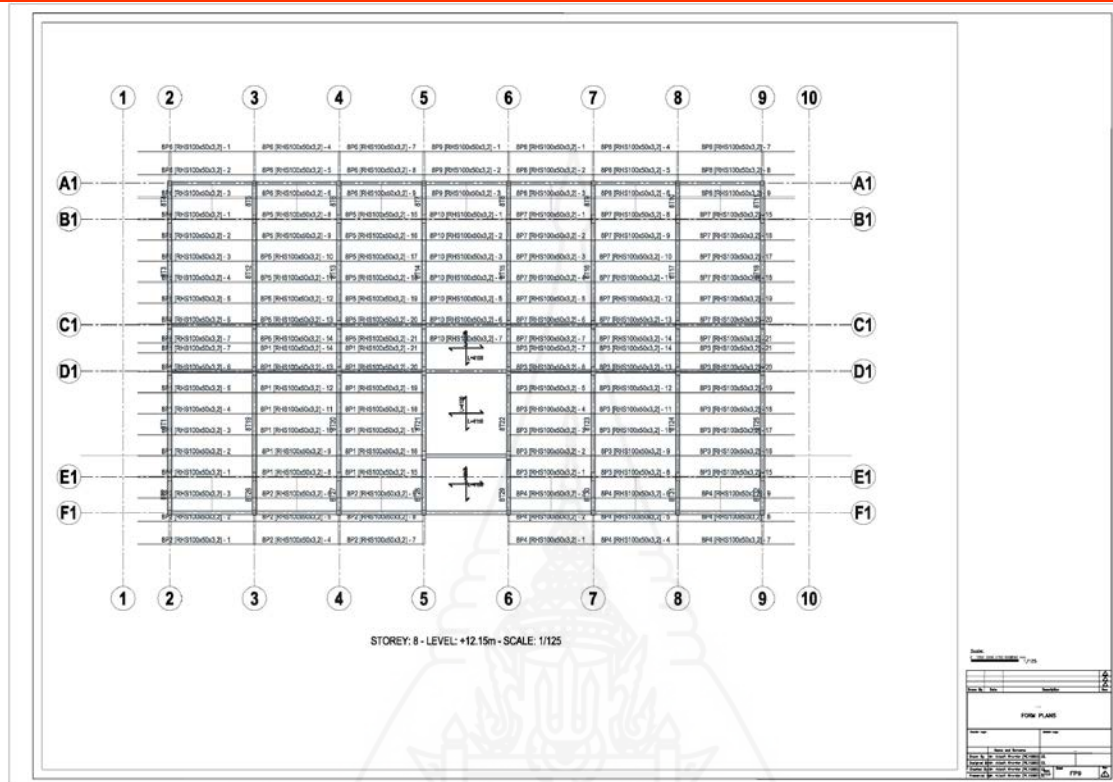
การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11
The 11th STOU National Research Conference



ภาพที่ 2 ตัวอย่างแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างงานโครงสร้างฐานรากอาคาร ที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้น



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11
The 11th STOU National Research Conference



ภาพที่ 3 ตัวอย่างแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้างหลังคาโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ที่ผู้วิจัยจัดทำขึ้น



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

4 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง ซอฟต์แวร์ ProtaStructure มีฟังก์ชันที่ชื่อ Quantity Extraction Tables ซึ่งใช้สำหรับถอดปริมาณวัสดุ โดยสามารถสั่งให้แสดงเป็นตารางแยกตามหมวดหมู่ ตามชนิดวัสดุ หรือรูปแบบอื่นๆได้ ดังรูปตัวอย่าง

Quantity Tables

Storey	Beam	Column	Slab	Rib Slab	Blocks	Foundations
Foundation	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	80.160
1	24.857	3.864	39.060	0.000	0.000	0.000
2	0.304	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
3	23.649	9.360	36.767	0.000	0.000	0.000
4	0.304	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
5	24.549	10.320	37.597	0.000	0.000	0.000
6	0.304	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000
7	23.649	9.360	36.767	0.000	0.000	0.000
8	15.520	9.600	3.202	0.000	0.000	0.000
Total	113.136	43.224	153.392	0.000	0.000	80.160

Total Concrete: **389.912 m3**

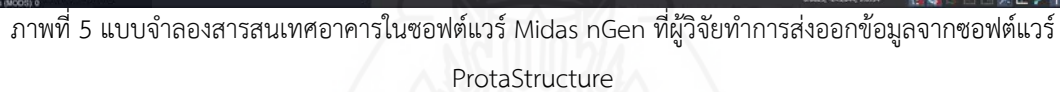
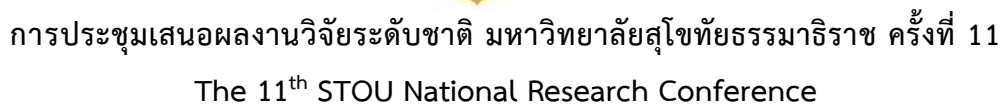
Report

Close

ภาพที่ 4 ตัวอย่างรายการถอดปริมาณงานคอนกรีตองค์ประกอบของโครงสร้างอาคาร ประเภท คาน เสา พื้น และฐานราก

5. ถอดปริมาณวัสดุโครงสร้างเทียบกับเครื่องมืออื่นอีกสองรูปแบบ

5.1 ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง จากโปรแกรมอื่น โดยในที่นี้จะใช้แบบจำลองที่จัดทำขึ้นโดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure ส่งออกไปวิเคราะห์ในอีกเครื่องมือที่เป็นซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรมโครงสร้างรูปแบบเดียวกัน ที่ชื่อว่า ซอฟต์แวร์ Midas nGen โดยการส่งผ่านข้อมูลไปเปิดใช้งานเป็นไปดังรูปตัวอย่าง



ตารางสรุปการถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้างอาคาร

ภาพที่ 6 ตัวอย่างตารางในโปรแกรม Excel แสดงปริมาณวัสดุงาน ที่ได้จากการถอดปริมาณโดยวิธีคำนวณด้วยมือ



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

5.3 จัดทำตารางเปรียบเทียบปริมาณทั้งหมด เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำของซอฟต์แวร์ที่นำมาใช้เป็นเครื่องมือ ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง วิธีคำนวณด้วยมือ โดยจัดทำเป็นตารางในโปรแกรม Excel ดังแสดง

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบปริมาณวัสดุ คอนกรีตโครงสร้างค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน 240 กก./ตร.ซม. สำหรับก้อนตัวอย่างทดสอบทรงกระบอก ผลต่างแต่ละเครื่องมือเปรียบกับค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ (%)

รายการวัสดุ	ปริมาณวัสดุ			ค่าเฉลี่ย
	ซอฟต์แวร์	ซอฟต์แวร์	การคำนวณ	ของ
	ProtaStructure	Midas nGen	ด้วยมือ	ทั้ง 3
	(ลบ.ม.)	(ลบ.ม.)	(ลบ.ม.)	เครื่องมือ
1 ปริมาณคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready mixed concrete)	389.91	392.16	390.00	390.69
ผลต่างแต่ละเครื่องมือเปรียบกับ ค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ (%)	0.20%	0.38%	0.18%	0%

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบปริมาณวัสดุโครงสร้าง เหล็กรูปพรรณโครงหลังคา ผลต่างแต่ละเครื่องมือเปรียบกับค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ (%)

รายการวัสดุ	ปริมาณวัสดุ			ค่าเฉลี่ย
	ซอฟต์แวร์	ซอฟต์แวร์	การคำนวณ	ของ
	ProtaStructure	Midas nGen	ด้วยมือ	ทั้ง 3
	(กก.)	(กก.)	(กก.)	เครื่องมือ
1 ปริมาณเหล็กรูปพรรณ ชั้นคุณภาพ SS400	6,238.64	6,030.82	6,087.11	6,118.86
ผลต่างแต่ละเครื่องมือเปรียบกับ ค่าเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ (%)	1.96%	1.44%	0.52%	0%



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

6. สัมภาษณ์ผู้ทรงคุณวุฒิ

ผลการสัมภาษณ์ผู้ปฏิบัติวิชาชีพที่มีประสบการณ์โดยตรง เช่น ผู้จัดการโครงการ วิศวกรโครงการ เป็นต้น ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอาคารไม่น้อยกว่า 10 ปี ทั้งหมด 7 คน เกี่ยวกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับการทำงานในปัจจุบัน พบว่า

- ผู้ให้สัมภาษณ์ 3 ใน 7 คน มีประสบการณ์ในการใช้ซอฟต์แวร์ BIM ในการจัดทำ Shop Drawing หรือในการถอดปริมาณวัสดุโครงสร้าง

- หากมีการจัดอบรมการใช้ซอฟต์แวร์ ProtaStructure เพื่อการเขียนแบบ Shop Drawing และถอดปริมาณวัสดุ ผู้ให้สัมภาษณ์ทั้งหมดสนใจจะเข้าร่วมการอบรม

- จากการสาธิตการใช้งานซอฟต์แวร์ ProtaStructure ในงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้ให้สัมภาษณ์ทั้งหมดเห็นว่า ซอฟต์แวร์ ProtaStructure สะดวกต่อการใช้งานกว่าการทำงานรูปแบบเดิมที่ทำงานอยู่

อภิปรายผลการวิจัย

1. จากการศึกษาข้อมูลพบว่า ซอฟต์แวร์ ProtaStructure เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์สำหรับแบบจำลองสารสนเทศอาคาร ที่มีแนวโน้มเป็นที่นิยมนำมาใช้งานและมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากสถาบันทางวิชาชีพอย่าง วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ให้การยอมรับและเปิดหลักสูตรอบรมขึ้นแล้ว หรือแม้แต่ในสถาบันการศึกษาอย่าง มหาวิทยาลัยต่างๆ ได้จัดอบรมเสริมทักษะให้แก่บุคลากรและนักศึกษาในสถาบัน เช่น มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี มหาวิทยาลัยบูรพา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นต้น

2. การจัดทำแบบจำลองสารสนเทศงานโครงสร้างอาคาร โดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure อ้างอิงมาตรฐานการออกแบบและก่อสร้างของประเทศไทย อิงตามมาตรฐานสากลอย่าง ACI และ AISI นั้น พบว่า การมีมาตรฐานอ้างอิงทั้งของไทยและของสากลเป็นเรื่องที่ดีอย่างยิ่ง การทำงานโดยมีลำดับขั้นตอนตามมาตรฐานแม้จะเป็นเครื่องมือใหม่ที่ยังไม่เคยใช้งานมาก่อน ก็ยังสามารถเรียนรู้และจัดทำขึ้นได้ในระยะเวลาไม่นาน และสามารถตรวจสอบกลับขั้นตอนการทำงานได้ตามมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง

3. การจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง หลังจากการจัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคารแล้วเสร็จ สามารถจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง ได้อัตโนมัติ แต่ผู้วิจัยมีความเห็นว่ายังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากการจัดวางรูปแบบของแบบก่อสร้างที่ซอฟต์แวร์ ProtaStructure ทำงานให้โดยอัตโนมัติ นั้น ยังมีรูปแบบที่ซ้อนทับหรือเหลื่อมกันของแบบแต่ละแผ่น ซึ่งผู้ใช้งานควรมีความรู้พื้นฐานในด้านการเขียนแบบเบื้องต้นมาก่อน แต่โดยรวมแล้วก็ยังถือว่าสะดวกกว่าการเขียนแบบในการทำงานในปัจจุบัน

4. ถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง จากแบบจำลองสารสนเทศงานโครงสร้างอาคารที่สร้างขึ้น โดยอ้างอิงมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ทำให้การถอดปริมาณวัสดุโครงสร้างทำได้เป็นที่น่าพอใจ พบความคลาดเคลื่อนของการคำนวณโดยซอฟต์แวร์ ProtaStructure เมื่อเทียบกับการทำงานในอีกสองเครื่องมือที่นำมาใช้เปรียบเทียบ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความน่าเชื่อถือของข้อมูล กล่าวคือ ปริมาณคอนกรีตโครงสร้าง แตกต่างจากค่าเฉลี่ยเพียง 0.20% โดยที่ ปริมาณเหล็กรูปพรรณ โครงหลังคา แตกต่างจากค่าเฉลี่ยเพียง 1.96%



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

5. อภิปรายผลการสัมภาษณ์ได้ว่า การนำซอฟต์แวร์ BIM มาใช้ในการจัดทำ Shop Drawing หรือในการถอดปริมาณวัสดุโครงสร้าง มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาจากการทำงานในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ผู้ให้สัมภาษณ์ทุกคนให้ความสนใจกับการเข้าร่วมอบรมการใช้ซอฟต์แวร์ โดยเฉพาะการอบรมผ่านระบบออนไลน์ซึ่งมีซอฟต์แวร์ให้ทดลองใช้งานโดยไม่มีค่าใช้จ่าย เพราะทุกคนเล็งเห็นถึงศักยภาพและประสิทธิภาพในการทำงานในระบบ BIM ส่วนการปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานจากเดิมที่มีลักษณะเป็น 2 มิติ มาเป็นระบบ BIM นั้น คงต้องพิจารณาเพิ่มจากองค์ประกอบอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น ความรู้ความเข้าใจของผู้ใช้งานซอฟต์แวร์อันจะได้รับการอบรมและการทดสอบกับการทำงานจริงในโครงการก่อสร้างต่างๆ ความเหมาะสมของแต่ละซอฟต์แวร์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละโครงการที่มีรูปแบบแตกต่างกันออกไป รวมถึงข้อจำกัดต่างๆ ของแต่ละซอฟต์แวร์ เป็นต้น อีกทั้งยังต้องพิจารณาเป็นเรื่องของราคาซอฟต์แวร์ที่ต้องจ่ายเป็นสำคัญ ที่น่าสนใจคือผู้ให้สัมภาษณ์ส่วนหนึ่งยอมรับว่าพวกเขาให้ความสำคัญกับการบริการหลังการขาย การให้คำแนะนำทางเทคนิค และการจัดอบรมเสริมทักษะหรือสาธิตการใช้งานซอฟต์แวร์ เป็นปัจจัยหลักในการตัดสินใจซื้อซอฟต์แวร์

ข้อเสนอแนะ

การจัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำแบบจำลองสารสนเทศอาคารที่ได้ ไปใช้กับการจัดทำแบบแสดงรายละเอียดเพื่อการก่อสร้าง และถอดปริมาณวัสดุงานโครงสร้าง โดยอาศัยซอฟต์แวร์ด้านวิศวกรรมโครงสร้างต่างๆ ที่มีในปัจจุบัน ผู้ใช้ควรให้ความสำคัญกับมาตรฐานการออกแบบที่ใช้อ้างอิงการทำงานเป็นอย่างยิ่ง ทั้งมาตรฐานของไทยหรือแม้กระทั่งมาตรฐานสากล เพื่อให้การทำงานเป็นไปอย่างเป็นระเบียบและถูกต้องตามแนวทางอ้างอิง ตั้งแต่เริ่มงาน เพราะหากเกิดความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนเริ่มต้นแล้ว การทำงานในขั้นตอนต่อไปจะยังมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดสูงมาก ผู้จัดทำแบบจำลองสารสนเทศอาคารควรมีทักษะและประสบการณ์การทำงานที่ดีพอด้วย ทั้งนี้ งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างประเภทอาคารพักอาศัยรวม ค.ส.ล. 4 ชั้น โครงสร้างหลักของอาคารเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงหลังคาเหล็ก รูปพรรณ มีรูปทรงสถาปัตยกรรมอาคารทางเรขาคณิตค่อนข้างสมมาตร หากจะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ควรพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมกับอาคารประเภทอื่นๆ ร่วมด้วย เช่น อาคารโรงงาน อาคารคลังสินค้า อาคารพาณิชย์ อัฒจันทร์ หอถ้ำน้ำ สระว่ายน้ำ เป็นต้น รวมถึงอาคารโครงสร้างเหล็กรูปพรรณทั้งหลังหรืออาคารที่มีโครงหลังคาเหล็กในรูปแบบอื่นๆ เช่น หลังคาโครงเหล็กถัก (Steel Truss) หลังคาเหล็กเซลล์ลูอาร์บีเอ็ม (Cellular Beam) เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่มีรูปทรงสถาปัตยกรรมอาคารทางเรขาคณิตไม่สมมาตรทั้งทางแนวราบและแนวดิ่ง (อาคารทรงโค้ง อาคารรูปทรงหลายเหลี่ยม อาคารที่มีค่าระดับชั้นของอาคารแตกต่างกันไปไม่สม่ำเสมอ)

เอกสารอ้างอิง

- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ . (2563) . มาตรฐานการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BUILDING INFORMATION MODELING STANDARD) ตามแนวทางสภาวิชาชีพ
วสท.012037-20
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ . (2555) . มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง
วสท.1008-38
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ . (2557) . มาตรฐานสำหรับอาคารเหล็กรูปพรรณ วสท.1015-40



การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11

The 11th STOU National Research Conference

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ . (2559) . แนวทางการวัดปริมาณงานก่อสร้างอาคาร ในส่วนงานของ
โครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม มาตรฐาน วสท.1011-48

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ . (2562) . มาตรฐานการเขียนแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
มาตรฐาน วสท.011006-19

Hexu Liu ,Ming Lu ,Mohamed Al-Hussein . (2559) . Ontology-based semantic approach for construction-
oriented quantity take-off from BIM models in the light-frame building industry
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.001>

Saeed Rokooei . (2558) . Building Information Modeling in Project Management: Necessities, Challenges
and Outcomes
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.332>

Darren Olsen JD, J. Mark Taylor PhD, JD . (2560) . Quantity Take-Off Using Building Information Modeling
(BIM), and Its Limiting Factors
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.067>

