

แพลตฟอร์มบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะสำหรับการจัดการทางการเงิน ในโครงการก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์

กฤตพัฒน์ ภักดีธนาณัช^{1*} วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์¹ และ วิกรม เหล่าวิสุทธิชัย²

¹ ศูนย์การจัดการทรัพยากรเชิงดิจิทัลเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (CDAM) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 6670005421@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

เหล็กมอดูลาร์เป็นรูปแบบหนึ่งของการก่อสร้างนอกสถานที่ที่ก่อสร้างซึ่งช่วยให้งานก่อสร้างรวดเร็วและมีคุณภาพยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการการเงินในโครงการนี้มีลักษณะเฉพาะตัวที่ท้าทายเนื่องจากความไม่แน่นอนในการจ่ายเงิน กระบวนการทางการเงินที่ไม่ชัดเจน และความไม่โปร่งใสในการทำธุรกรรมทางการเงิน ซึ่งนำไปสู่ความล่าช้าในการชำระเงินและปัญหาความไว้วางใจระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในโครงการ งานวิจัยนี้พัฒนาแพลตฟอร์มบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะเพื่อช่วยจัดการทางการเงินในโครงการก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์ ระบบสามารถติดตามความคืบหน้าโครงการแบบเวลาจริงและดำเนินการชำระเงินอัตโนมัติเมื่อเงื่อนไขที่กำหนดสำเร็จ บล็อกเชนช่วยรักษาความปลอดภัยของธุรกรรม รับรองว่าข้อมูลไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ และเพิ่มความโปร่งใส ขณะที่สัญญาอัจฉริยะช่วยให้การชำระเงินดำเนินการอย่างเป็นระบบและโปร่งใส ลดความล่าช้าและลดการพึ่งพาตัวกลาง ผลการทดสอบต้นแบบแสดงว่าระบบสามารถลดความล่าช้าในการชำระเงินและทำให้การจัดการทางการเงินเป็นระบบมากขึ้น รวมถึงช่วยเสริมสร้างความไว้วางใจระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียผ่านธุรกรรมที่ตรวจสอบได้และน่าเชื่อถือ

คำสำคัญ: การก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์, การจัดการทางการเงิน, บล็อกเชน, สัญญาอัจฉริยะ

Abstract

Modular steel construction is a form of off-site construction that helps construction faster and more efficiently. Yet, financial management in these projects is unique and challenging. Their challenges are uncertain payments, unclear financial processes, and obscure financial transactions, which lead to payment delays and trust issues among project stakeholders. This research develops a blockchain and smart contract platform, which facilitates financial management in modular steel projects. The system can be used to track project progress in real time and process project payments automatically when all

conditions are met. Blockchain keeps transactions secure, ensures immutable data, and enhances transparency. Smart contracts guarantee systematic and transparent payments, which mitigate payment delays and the need for intermediaries. By implementing the system prototype, we found that it can extenuate payment delays and make financial transactions more systematic. Also, it enhances trust among project stakeholders via verifiable and reliable transactions.

Keywords: modular steel construction, financial management, blockchain, smart contract

1. บทนำ

การก่อสร้างนอกสถานที่ที่ก่อสร้าง (off-site construction) เป็นนวัตกรรมในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป้าหมายหลักคือการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการก่อสร้าง ลดระยะเวลาการดำเนินงาน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มความปลอดภัยในสถานที่ก่อสร้าง รูปแบบการก่อสร้างนี้ประกอบด้วยการผลิตและประกอบชิ้นส่วนของอาคารในโรงงาน การขนส่งชิ้นส่วน และการติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง รูปแบบหนึ่งของการก่อสร้างนอกสถานที่ที่ก่อสร้างคือ การก่อสร้างแบบมอดูลาร์ (modular construction) ซึ่งเป็นการผลิตและประกอบมอดูลของอาคารในโรงงานก่อนนำมาติดตั้งที่ ณ สถานที่ก่อสร้าง จุดเด่นของการก่อสร้างแบบมอดูลาร์คือสามารถลดระยะเวลา เพิ่มคุณภาพงานก่อสร้าง และควบคุมต้นทุนได้ดีกว่าการก่อสร้างแบบดั้งเดิม [1]

Jin et al. [2] และ Wuni & Shen [3] ชี้ให้เห็นข้อดีด้านสิ่งแวดล้อมของการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ เช่น การลดของเสียและการปล่อยคาร์บอน รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยของแรงงาน แม้จะมีข้อดีหลายด้าน แต่การจัดการด้านการเงินในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์เป็นปัญหาที่สลับซับซ้อน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาจากมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักในโครงการ ได้แก่ สถาบันการเงิน เจ้าของโครงการ และผู้ประกอบมอดูล

โครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์มีลักษณะการทำงานแบบแยกส่วน โดยงานส่วนใหญ่ดำเนินการในโรงงาน ไม่ว่าจะเป็นการผลิตชิ้นส่วนหลัก การประกอบมอดูล และกระบวนการโลจิสติกส์ ส่งผลให้ไม่สามารถสะท้อนความ

คืบหน้าของโครงการจากสถานที่ก่อสร้างได้ชัดเจนเหมือนโครงการก่อสร้างทั่วไปที่สามารถประเมินได้จากโครงสร้างกายภาพโดยตรง

ผลจากลักษณะการดำเนินงานข้างต้น สถาบันการเงินจึงไม่สามารถประเมินสถานะโครงการเพื่ออนุมัติวงเงินได้เหมือนในโครงการก่อสร้างทั่วไป [4] อีกทั้งโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ยังขาดโครงสร้างการชำระเงินตาม milestone ที่ชัดเจน ทำให้การเบิกจ่ายไม่สอดคล้องกับความก้าวหน้า และเพิ่มภาระให้กับผู้ประกอบการมอดูลซึ่งต้องแบกรับต้นทุนล่วงหน้าในฐานะงาน Engineer-to-Order ที่ผลิตเฉพาะสำหรับแต่ละโครงการ [5] ขณะเดียวกันเจ้าของโครงการก็ไม่สามารถติดตามงานได้อย่างใกล้ชิดและขาดหลักฐานประกอบการเบิกเงิน ส่งผลต่อเสถียรภาพทางการเงินและเพิ่มความเสี่ยงต่อความสำเร็จของโครงการ [6]

แม้จะมีการนำเทคโนโลยีการจำลองสารสนเทศอาคาร (building information modeling, BIM) และ internet of things (IoT) มาใช้เพื่อติดตามสถานะการผลิตและขนส่งมอดูล [7] แต่ยังไม่สามารถตอบโจทย์ด้านการติดตามด้านการเงินและการเบิกจ่ายได้อย่างครบถ้วน ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำเทคโนโลยีบล็อกเชน (blockchain) ซึ่งทำให้กระบวนการโปร่งใส ไม่สามารถแก้ไขย้อนหลังได้ และสามารถตรวจสอบได้แบบเปิดเผย [8, 9, 10] ร่วมกับสัญญาอัจฉริยะ (smart contract) ซึ่งสามารถดำเนินการจ่ายเงินโดยอัตโนมัติเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เช่น การส่งงานเสร็จสิ้นตามขั้นตอน [11]

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้จำเป็นต้องออกแบบให้สอดคล้องกับลักษณะของโครงการแบบมอดูลาร์ซึ่งมีความซับซ้อนทางการเงิน เช่น การแบ่งงวด การกักเงิน (retention) หรือค่าปรับจากความล่าช้าในงานวิจัยเราพัฒนาแพลตฟอร์มต้นแบบซึ่งใช้บล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะเพื่อสนับสนุนการบริหารการเงินในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ให้มีความโปร่งใส ตรวจสอบได้ และลดความเสี่ยงทางการเงินระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การก่อสร้างแบบนอกสถานที่ก่อสร้าง

Buildoffsite [12] กำหนดนิยามการก่อสร้างแบบนอกสถานที่ก่อสร้างว่าเป็นกระบวนการที่การผลิตและการประกอบชิ้นส่วนอาคารบางส่วนหรือทั้งหมดดำเนินการในโรงงาน หรือโรงงานชั่วคราวนอกสถานที่ก่อสร้าง โดยชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น คาน เสา พื้น ผนัง หรือบันได จะถูกผลิตล่วงหน้าก่อนขนส่งไปติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง การก่อสร้างแบบนอกสถานที่ก่อสร้างอาจแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้

- 1) component subassembly คือการผลิตชิ้นส่วนย่อย เช่น หน้าต่าง วงกบ หรืออุปกรณ์ตกแต่ง ช่วยลดเวลางานติดตั้งและเพิ่มความแม่นยำ
- 2) non-volumetric preassembly คือการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่ที่ไม่มีพื้นที่ใช้งานในตัว เช่น ผนังสำเร็จรูป ระบบงานระบบ ช่วยลดความซับซ้อน ณ สถานที่ก่อสร้าง

- 3) volumetric preassembly คือการผลิตหน่วยที่มีพื้นที่ใช้งาน เช่น ห้องน้ำสำเร็จรูป มักติดตั้งแบบสำเร็จจากโรงงาน ช่วยประหยัดเวลาและลดข้อผิดพลาดในการติดตั้ง
- 4) complete buildings หมายถึงการผลิตอาคารทั้งหลังในโรงงาน เช่น อาคารสำนักงาน โรงแรม หรือที่พักอาศัย เหมาะกับโครงการที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและพื้นที่ เช่น เขตเมือง

2.2 การก่อสร้างแบบมอดูลาร์

การก่อสร้างแบบมอดูลาร์ (modular construction) คือกระบวนการผลิตและประกอบหน่วยอาคารในรูปแบบมอดูลจากโรงงาน ก่อนจะขนส่งไปติดตั้งที่สถานที่ก่อสร้าง โดยมากกว่าร้อยละ 70 ของกิจกรรมก่อสร้างจะเกิดขึ้นในโรงงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ หน่วยมอดูลเหล่านี้มักมีลักษณะเป็นห้องหรือหน่วยที่มีการตกแต่งภายในและติดตั้งระบบต่าง ๆ เรียบร้อย พร้อมสำหรับการใช้งานหลังการติดตั้ง การก่อสร้างแบบมอดูลาร์ได้รับการพัฒนาภายใต้แนวคิด design for manufacturing and assembly (DfMA) เพื่อให้สามารถผลิตและติดตั้งอย่างมีประสิทธิภาพ [13]

ในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์รูปแบบความสัมพันธ์ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจะแตกต่างจากโครงการก่อสร้างทั่วไปอย่างชัดเจน เจ้าของโครงการมักมีความสัมพันธ์โดยตรงกับผู้สร้างมอดูลาร์ (modular builder) ซึ่งเป็นผู้ควบคุมกระบวนการผลิตทั้งระบบในโรงงาน โดยอาจจ้างผู้รับเหมาทั่วไปในบางส่วน เช่น การก่อสร้างฐานรากหรือการเชื่อมต่อระบบสาธารณูปโภค ณ สถานที่ก่อสร้าง [14] ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในระบบนี้ประกอบด้วยเจ้าของโครงการ สถาปนิก วิศวกร ที่ปรึกษา ผู้ผลิต ผู้จัดหาวัสดุ ผู้ให้บริการด้านโลจิสติกส์ และผู้รับจ้างก่อสร้าง ซึ่งต้องมีการประสานงานอย่างรอบด้านเพื่อให้โครงการดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและตามแผน [15]

กระบวนการการก่อสร้างแบบมอดูลาร์สามารถแบ่งออกเป็นสี่ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงออกแบบ ซึ่งครอบคลุมการออกแบบโดยคำนึงถึงการผลิตและการติดตั้งจริง (DfMA), ช่วงผลิตซึ่งผลิตมอดูลในโรงงานภายใต้การควบคุมคุณภาพอย่างเข้มงวด, ช่วงขนส่งซึ่งเน้นการจัดส่งตรงเวลา และช่วงการติดตั้ง ณ สถานที่ก่อสร้าง ซึ่งต้องใช้เครื่องจักรหนักและแรงงานเฉพาะทางเพื่อประกอบโครงสร้างให้สมบูรณ์ [16, 17]

ในช่วงการก่อสร้างต้นทุนวัสดุอาจเพิ่มขึ้นหากเราเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง ขณะที่ต้นทุนแรงงานในสถานที่ก่อสร้างมีแนวโน้มลดลงจากการลดกิจกรรม ณ สถานที่ก่อสร้าง ในทางกลับกันต้นทุนแรงงานในโรงงานอาจเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้แรงงานทักษะในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ และต้นทุนด้านโลจิสติกส์เพิ่มขึ้นจากการขนส่งมอดูลขนาดใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการวางแผนล่วงหน้าอย่างรอบคอบ อย่างไรก็ตาม หากมีการออกแบบเพื่อรองรับการผลิตซ้ำ การบริหารวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ และการใช้ประโยชน์จากระยะเวลาการก่อสร้างที่สั้นลง โครงการมอดูลาร์ยังมีศักยภาพในการลดต้นทุนรวมในระยะยาว และช่วยลดภาระต้นทุนทางการเงินจากระยะเวลาดำเนินการที่สั้นลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

2.3 ความท้าทายในการจัดการทางการเงินในการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

แม้การก่อสร้างแบบมอดูลาร์จะสามารถลดต้นทุนรวมได้ถึงร้อยละ 20 [1] แต่การก่อสร้างรูปแบบนี้ต้องเผชิญความท้าทายในการจัดการทางการเงินจากมุมมองของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลัก 3 ฝ่าย ได้แก่ สถาบันการเงิน ผู้ประกอบการมอดูล และเจ้าของโครงการ

2.3.1 สถาบันการเงิน

สถาบันการเงิน มักจะไม่มั่นใจในการปล่อยสินเชื่อ เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบความก้าวหน้างานก่อสร้างได้จากสถานที่ก่อสร้างโดยตรงเหมือนการก่อสร้างทั่วไป ทั้งนี้เพราะงานหลักเกิดขึ้นในโรงงานและขาด milestone ที่ชัดเจน จึงไม่สามารถประเมินสถานะหรือควบคุมการใช้จ่ายระหว่างกระบวนการผลิตและขนส่งได้ [4]

2.3.2 ผู้ประกอบการมอดูล

ผู้ประกอบการมอดูลต้องแบกรับต้นทุนล่วงหน้าในขั้นตอนการผลิตแบบ Engineer-to-Order (ETO) ซึ่งมักไม่มีหลักประกันว่าจะได้รับชำระเงินตรงเวลา ส่งผลให้ผู้ประกอบการมอดูลต้องเรียกเก็บเงินล่วงหน้าในสัดส่วนสูงเพื่อลดความเสี่ยงด้านสภาพคล่อง [5]

2.3.3 เจ้าของโครงการ

เจ้าของโครงการจะต้องเผชิญความไม่แน่นอนจากการขาดข้อมูลความก้าวหน้าในโรงงานและ milestone ที่ชัดเจน ส่งผลให้ยากต่อการตรวจสอบการใช้จ่าย และต้องเตรียมเงินสำรองไว้จำนวนมาก เพิ่มภาระการบริหารงบประมาณและความเสี่ยงขาดสภาพคล่อง [6]

2.4 บล็อกเชน

บล็อกเชนคือระบบฐานข้อมูลแบบกระจายศูนย์ที่ไม่สามารถแก้ไขย้อนหลังได้ ข้อมูลจะถูกบันทึกใน “บล็อก” ซึ่งเชื่อมโยงต่อกันเป็นลำดับ (chain) โดยแต่ละบล็อกมี timestamp, คาร์หัสแฮช และรหัสแฮชของบล็อกก่อนหน้า คุณสมบัตินี้ทำให้ข้อมูลปลอดภัย โปร่งใส และสามารถถูกตรวจสอบย้อนหลังได้โดยไม่ต้องพึ่งพาหน่วยงานกลาง เช่น ธนาคาร ในระบบบล็อกเชนทุกโหนดในเครือข่ายจะถือครองสำเนาข้อมูลชุดเดียวกัน ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการถูกปลอมแปลงหรือแก้ไข ทำให้บล็อกเชนแตกต่างจากฐานข้อมูลทั่วไป และเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบที่ต้องการความโปร่งใสและเชื่อถือได้ [18]

Mukherjee & Pradhan [19] แบ่งวิวัฒนาการของบล็อกเชนออกเป็น 4 ระดับคือ

- 1) บล็อกเชน 1.0 รองรับธุรกรรมสกุลเงินดิจิทัล เช่น Bitcoin โดยใช้กลไกฉันทามติแบบ Proof of Work (PoW) มีความปลอดภัยสูง แต่ใช้พลังงานมากและไม่ยืดหยุ่น
- 2) บล็อกเชน 2.0 เพิ่มการใช้งานสัญญาอัจฉริยะซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยอัตโนมัติตามเงื่อนไข ตัวอย่างสำคัญคือ Ethereum ที่รองรับแอปพลิเคชันแบบกระจายศูนย์ (DApps)
- 3) บล็อกเชน 3.0 เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพ รองรับธุรกรรมจำนวนมาก ใช้โครงสร้าง DAGs และ Layer 2 เช่น IOTA และ Cardano ที่เหมาะกับ IoT และ AI

- 4) บล็อกเชน 4.0 ตอบโจทย์การใช้งานในภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การผลิตและโลจิสติกส์ รองรับการทำงานร่วมกับ AI, IoT และมีรูปแบบบริการ Blockchain-as-a-Service (BaaS) เพื่อความสะดวกในการปรับใช้

2.5 สัญญาอัจฉริยะ

Tyagi et al. [20] กำหนดนิยามของสัญญาอัจฉริยะว่าเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนบล็อกเชน ซึ่งสามารถดำเนินการตามข้อตกลงที่กำหนดไว้ล่วงหน้าโดยอัตโนมัติเมื่อเงื่อนไขครบถ้วน ข้อมูลและโค้ดของสัญญาจะถูกจัดเก็บในเครือข่ายแบบกระจายศูนย์ ทำให้ลดความจำเป็นในการใช้ตัวกลาง เพิ่มความแม่นยำ ความโปร่งใส และความน่าเชื่อถือในการดำเนินธุรกรรม สัญญาอัจฉริยะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เช่น การฝากเงิน การเบิกจ่าย การตรวจสอบและการติดตามข้อมูลโครงการ

การประยุกต์ใช้สัญญาอัจฉริยะในงานก่อสร้างสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความโปร่งใสในกระบวนการจัดการโครงการ โดยเฉพาะด้านการเงิน เช่น การชำระเงินอัตโนมัติเมื่อบรรลุเป้าหมายงาน ลดความล่าช้าและปรับปรุงความโปร่งใสของธุรกรรมการเงิน [11] เงื่อนไขที่ชัดเจนในโค้ดช่วยลดข้อพิพาทจากการตีความสัญญา [5] และลดความจำเป็นของตัวกลางอย่างธนาคารหรือผู้ตรวจสอบ ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและต้นทุน [10] สัญญาอัจฉริยะยังสามารถติดตามความคืบหน้าโครงการแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลที่ตรวจสอบย้อนหลังได้ ช่วยสร้างความเชื่อมั่นระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย [9]

3. ขั้นตอนการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 ขั้นตอนคือ

3.1 ทบทวนแนวคิด ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนแนวคิด ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาความรู้และทฤษฎีต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับงานวิจัย และ รวบรวมวิทยานิพนธ์ บทความทางวิชาการ หนังสือ และเอกสารในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้อง

3.2 ศึกษาการจัดการห่วงโซ่อุปทานในอุตสาหกรรมก่อสร้างแบบมอดูลาร์

ทำความเข้าใจประเภทของการบริหารโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ ผ่านการสัมภาษณ์บริษัทที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่อุปทาน เพื่อวิเคราะห์กระบวนการทำงาน รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในแต่ละขั้นตอนของก่อสร้างแบบมอดูลาร์

3.3 ศึกษาแบบจำลองโครงสร้างสัญญาในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคู่สัญญาหลัก เช่น เจ้าของโครงการ ผู้ประกอบการมอดูล ผู้ผลิตวัสดุ และผู้รับเหมา เพื่อเข้าใจการแบ่งบทบาท ความ

รับผิดชอบ และเส้นทางการชำระเงินในแต่ละรูปแบบมีผลต่อกระบวนการจัดการทางการเงิน

3.4 ออกแบบโครงสร้างการชำระเงิน และ milestones ที่เหมาะสมสำหรับโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

นำผลการศึกษารูปแบบโครงสร้างสัญญาในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์มาวิเคราะห์และออกแบบระบบการชำระเงินที่เหมาะสม โดยกำหนด milestone ที่สอดคล้องกับลำดับความก้าวหน้าของงาน พร้อมทั้งระบุ เอกสารหรือหลักฐานที่ใช้ยืนยันความสำเร็จของแต่ละ milestone เพื่อใช้ในการเบิกจ่ายเงินอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ นำไปสู่การจัดการทางการเงินที่มีประสิทธิภาพตลอดโครงการ

3.5 ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะ

พัฒนาสถาปัตยกรรมระบบและแอปพลิเคชันสำหรับประยุกต์ใช้บล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะ ระบบนี้ถูกออกแบบให้ทำงานบนโครงสร้างของบล็อกเชน เพื่อใช้เป็นกลไกหลักในการควบคุมและบันทึกธุรกรรมในโครงการก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วยการพัฒนา backend และ frontend

3.6 ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชัน

เพื่อให้มั่นใจว่าระบบทำงานได้ถูกต้อง ตรงตามความต้องการ และรองรับการใช้งานจริงผ่านการใช้กรณีตัวอย่างอาคารโครงสร้างเหล็กมอดูลาร์ 2 ชั้น ขนาด 7.00x8.00 ม.

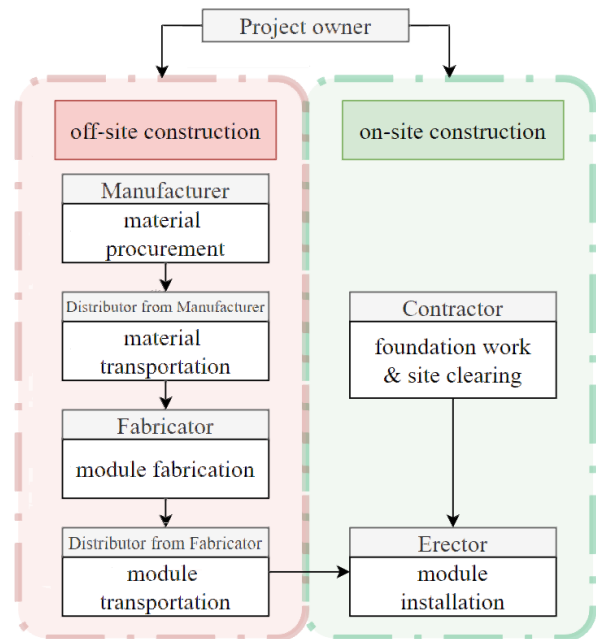
3.7 สรุปผลการวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สรุปประสิทธิภาพการทำงานของแพลตฟอร์มดิจิทัลจากการประยุกต์ใช้กับอาคารกรณีศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

4. ผลลัพธ์และอภิปรายผล

4.1 การจัดการห่วงโซ่อุปทานในอุตสาหกรรมก่อสร้างแบบมอดูลาร์

ห่วงโซ่อุปทานของการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ในประเทศไทยประกอบด้วยงาน 2 ส่วนหลัก ได้แก่ งานนอกสถานที่ก่อสร้าง (off-site) ซึ่งดำเนินการในโรงงาน และงานในสถานที่ก่อสร้าง (on-site) ที่เน้นการติดตั้งมอดูล ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลัก 7 กลุ่ม ได้แก่ เจ้าของโครงการ ผู้ผลิตเหล็ก ผู้ขนส่งวัสดุ ผู้ประกอบมอดูล ผู้ขนส่งมอดูล ผู้รับเหมา และผู้ติดตั้งมอดูล ซึ่งทำงานต่อเนื่องตลอดกระบวนการผลิตจนถึงส่งมอบอาคารดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์และขั้นตอนในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

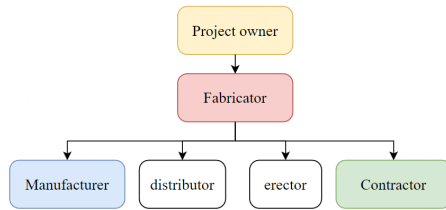
ขั้นตอนการก่อสร้างแบบมอดูลาร์แตกต่างจากการก่อสร้างทั่วไป โดยเริ่มจากเจ้าของโครงการประสานกับผู้ประกอบมอดูลเพื่อแปลงแบบก่อสร้างให้สอดคล้องกับแนวคิด DfMA จากนั้นผู้ประกอบมอดูลสั่งซื้อวัสดุเหล็กเฉพาะเจาะจงจากผู้ผลิตเหล็ก และตรวจสอบคุณภาพ กระบวนการประกอบในโรงงานเริ่มจากการขึ้นโครงสร้างเหล็ก 3 มิติ ติดตั้งชิ้นส่วนภายนอก เช่น ผนัง พื้น และหลังคา ตามด้วยระบบงานภายใน ได้แก่ ระบบไฟฟ้า ประปา และสุขาภิบาล ขณะที่ผู้ประกอบมอดูลดำเนินการในโรงงาน ผู้รับจ้างก่อสร้างจะเตรียมพื้นที่และฐานรากที่สถานที่ก่อสร้างให้พร้อม มอดูลซึ่งประกอบเสร็จจะถูกทดสอบรอยเชื่อมต่อ ตรวจสอบคุณภาพ และติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเพื่อเตรียมขนส่ง จากนั้นผู้ประกอบมอดูลจะประสานกับผู้ขนส่งเพื่อวางแผนการขนย้ายแบบ just-in-time ไปยังสถานที่ก่อสร้าง เมื่อมอดูลถึงขนส่งถึงสถานที่ก่อสร้าง ผู้ติดตั้งจะติดตั้งมอดูลเข้ากับฐานราก เชื่อมต่อระบบภายใน ติดตั้งเฟอร์นิเจอร์ และเก็บรายละเอียดงานก่อนส่งมอบอาคารให้เจ้าของโครงการตรวจรับ

4.2 รูปแบบโครงสร้างสัญญาในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

สัญญาในโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์เปลี่ยนแปลงไปตามความสัมพันธ์ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียกับเจ้าของโครงการโดยสามารถแบ่งออกได้ 4 รูปแบบดังนี้

4.2.1 รูปแบบการดำเนินงานแบบผู้ประกอบมอดูลเป็นศูนย์กลาง

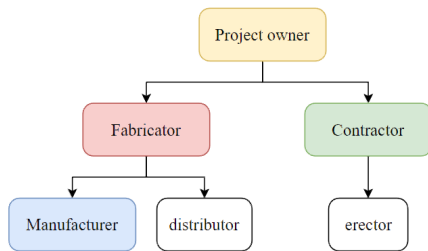
รูปแบบการดำเนินงานนี้มักใช้ในโครงการที่ยังขาดความเชี่ยวชาญในการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ ผู้ประกอบมอดูลจะทำหน้าที่เสมือนผู้รับจ้างหลัก (main contractor) ซึ่งรับผิดชอบการจัดซื้อวัสดุ การผลิต การติดตั้ง และการบริหารความสัมพันธ์กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่าง ๆ แทนเจ้าของโครงการ ดังแสดงในรูปที่ 2 ลักษณะการดำเนินงานนี้สามารถเรียกได้ว่าเป็นบริการแบบ one stop service



รูปที่ 2 รูปแบบการดำเนินงานแบบผู้ประกอบมอดูลเป็นศูนย์กลาง

4.2.2 รูปแบบความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบมอดูลและผู้รับจ้างก่อสร้างทั่วไป

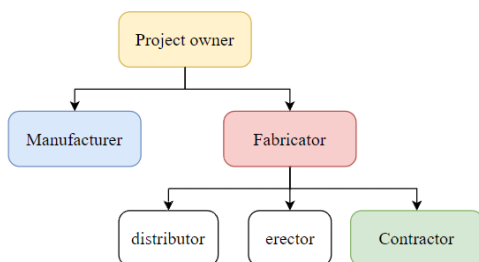
รูปแบบการดำเนินงานนี้มักพบในโครงการซึ่งเจ้าของโครงการมีประสบการณ์ในการทำโครงการก่อสร้างแบบทั่วไปแต่ยังขาดความเชี่ยวชาญด้านการก่อสร้างแบบมอดูลาร์ ผู้ประกอบมอดูลจะรับผิดชอบงานนอกสถานที่ก่อสร้าง ได้แก่ การจัดซื้อวัสดุ และการผลิตมอดูล แต่ผู้รับจ้างก่อสร้างจะรับผิดชอบในงานที่สถานที่ก่อสร้าง ได้แก่ งานฐานราก งานเตรียมพื้นที่ และงานติดตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบมอดูลและผู้รับจ้างก่อสร้างทั่วไป

4.2.3 รูปแบบการดำเนินงานร่วมกันระหว่างผู้ประกอบมอดูลและผู้ผลิตเหล็ก

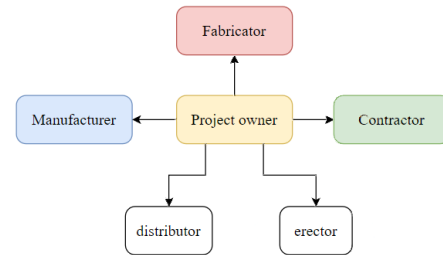
รูปแบบการดำเนินงานนี้มักพบในโครงการที่โครงสร้างมอดูลซับซ้อนจึงทำให้เจ้าของโครงการหรือผู้ประกอบมอดูลจำเป็นต้องสั่งผลิตชิ้นส่วนเหล็กเฉพาะในการประกอบมอดูล เจ้าของโครงการจำเป็นต้องประสานกับผู้ผลิตเหล็กในการเตรียมชิ้นส่วนเหล็กเฉพาะให้กับผู้ประกอบมอดูล แต่ผู้ประกอบมอดูลยังมีหน้าที่จัดการงานทั้งนอกสถานที่และที่สถานที่ก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบการดำเนินงานร่วมกันระหว่างผู้ผลิตเหล็กและผู้ประกอบมอดูล

4.2.4 รูปแบบการดำเนินงานร่วมกันระหว่างผู้ผลิตเหล็ก ผู้ประกอบมอดูล และผู้รับเหมาทั่วไป

รูปแบบการดำเนินงานนี้เป็นรูปแบบที่เจ้าของโครงการเลือกบริหารจัดการความสัมพันธ์กับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักในห่วงโซ่อุปทานด้วยตนเอง ได้แก่ ผู้ผลิตเหล็ก ผู้ประกอบมอดูล และผู้รับเหมาทั่วไป แต่ละฝ่ายจะมีสัญญาและบทบาทแยกจากกันโดยตรงกับเจ้าของโครงการ เจ้าของโครงการต้องรับบทบาทเป็นผู้ประสานหลักในทุกขั้นตอนของโครงการ ความสำเร็จของรูปแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับ การวางแผนที่ดี การสื่อสารที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้การทำงานระหว่างฝ่ายต่าง ๆ เป็นไปอย่างสอดคล้องและไม่เกิดความซ้ำซ้อนหรือขัดแย้ง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปแบบการดำเนินงานร่วมกันระหว่างผู้ผลิตเหล็ก ผู้ประกอบมอดูล และผู้รับเหมา

4.3 การออกแบบโครงสร้างการชำระเงินและ milestones ของโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์

การจัดการและการชำระเงินในแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องในห่วงโซ่อุปทาน และความชัดเจนของขอบเขตงาน เพื่อให้การบริหารสัญญาและการเบิกจ่ายเงินสามารถตรวจสอบโดยตรงจากเจ้าของโครงการ จึงได้ออกแบบโครงสร้างการชำระเงินใหม่ โดยกำหนด milestones ให้สอดคล้องกับลำดับการดำเนินงาน พร้อมระบุผู้รับผิดชอบและเอกสารประกอบการยืนยันความสำเร็จในแต่ละ milestone เพื่อใช้ประกอบการอนุมัติการเบิกจ่ายในแต่ละงวด ทั้งนี้สามารถสรุปโครงสร้างตามรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง 4

ตารางที่ 1 โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบการดำเนินงานแบบผู้ประกอบมอดูลเป็นศูนย์กลาง

ลำดับ	Milestone	เอกสารประกอบ
ผู้ประกอบมอดูล		
1	ค่าเบิกล่วงหน้า	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าจัดเตรียมวัสดุ	PO, ใบรับวัสดุ
3	ค่าประกอบมอดูล **	
	งานโครงสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
	งานระบบ	รูปภาพ/รายงาน
	งานสถาปัตยกรรม	รูปภาพ/รายงาน
4	ค่าเตรียมฐานราก + พื้นที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/รายงาน

ตารางที่ 1 (ต่อ) โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบการดำเนินงานแบบผู้ประกอบมอดูลเป็นศูนย์กลาง

ลำดับ	Milestone	เอกสารประกอบ
-------	-----------	--------------

5	ค่าขนส่งมอดูล	รายการจัดส่ง
6	ค่าประกอบมอดูล ณ สถานที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/checklist/ Punch list
7	ค่า retention	- (ชำระเมื่อครบระยะประกันตามสัญญา)

** จำนวนงวดค่าประกอบมอดูลขึ้นอยู่กับจำนวนรอบประกอบมอดูล

ลำดับ	milestone	เอกสารประกอบ
1	คำมัดจำสินค้าหลัก	PO
2	ค่าวัสดุหลัก **	ใบรับวัสดุ

** จำนวนงวดค่าวัสดุหลักพิเศษขึ้นอยู่กับจำนวนรอบผลิตชิ้นส่วนหลักและจำนวนรอบประกอบมอดูล

ตารางที่ 2 โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการมอดูลและผู้รับเหมาทั่วไป

ลำดับ	milestone	เอกสารประกอบ
ผู้ประกอบการมอดูล		
1	ค่าเบิกล่วงหน้า	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าจัดเตรียมวัสดุ	PO, ใบรับวัสดุ
3	ค่าประกอบมอดูล **	
	งานโครงสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
	งานระบบ	รูปภาพ/รายงาน
	งานสถาปัตยกรรม	รูปภาพ/รายงาน
4	ค่าขนส่งมอดูล	รายการจัดส่ง
ผู้รับเหมาทั่วไป		
1	ค่าดำเนินงานเริ่มต้นฝั่งผู้รับเหมา	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าเตรียมฐานราก + พื้นที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
3	ค่าประกอบมอดูล ณ สถานที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/checklist/ Punch list
4	ค่า retention	- (ชำระเมื่อครบระยะประกันตามสัญญา)

** จำนวนงวดค่าประกอบมอดูลขึ้นอยู่กับจำนวนรอบประกอบมอดูล

ตารางที่ 3 โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบความร่วมมือระหว่างผู้ผลิตหลักและผู้ประกอบมอดูล

ลำดับ	milestone	เอกสารประกอบ
ผู้ประกอบการมอดูล		
1	ค่าเบิกล่วงหน้า	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าประกอบมอดูล **	
	งานโครงสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
	งานระบบ	รูปภาพ/รายงาน
	งานสถาปัตยกรรม	รูปภาพ/รายงาน
3	ค่าเตรียมฐานราก + พื้นที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
4	ค่าขนส่งมอดูล	รายการจัดส่ง
5	ค่าประกอบมอดูล ณ สถานที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/checklist/ Punch list
6	ค่า retention	- (ชำระเมื่อครบระยะประกันตามสัญญา)

ตารางที่ 3 (ต่อ) โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบความร่วมมือระหว่างผู้ประกอบการมอดูลและผู้ผลิตหลัก

ลำดับ	milestone	เอกสารประกอบ
ผู้ผลิตหลัก		

ตารางที่ 4 โครงสร้างการชำระเงินรูปแบบดำเนินงานร่วมกันระหว่างผู้ผลิตหลักผู้ประกอบการมอดูลและผู้รับเหมาทั่วไป

ลำดับ	milestone	เอกสารประกอบ
ผู้ผลิตหลัก		
1	คำมัดจำสินค้าหลัก	PO
2	ค่าวัสดุหลัก **	ใบรับวัสดุ
ผู้ประกอบการมอดูล		
1	ค่าเบิกล่วงหน้า	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าประกอบมอดูล **	
	งานโครงสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
	งานระบบ	รูปภาพ/รายงาน
	งานสถาปัตยกรรม	รูปภาพ/รายงาน
3	ค่าขนส่งมอดูล	รายการจัดส่ง
4	ค่า retention	- (ชำระเมื่อครบระยะประกันตามสัญญา)
ผู้รับเหมาทั่วไป		
1	ค่าดำเนินงานเริ่มต้นฝั่งผู้รับเหมา	Performance bond, bank guarantee
2	ค่าเตรียมฐานราก + พื้นที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/รายงาน
3	ค่าประกอบมอดูล ณ สถานที่ก่อสร้าง	รูปภาพ/checklist/ Punch list
4	ค่า retention	- (ชำระเมื่อครบระยะประกันตามสัญญา)

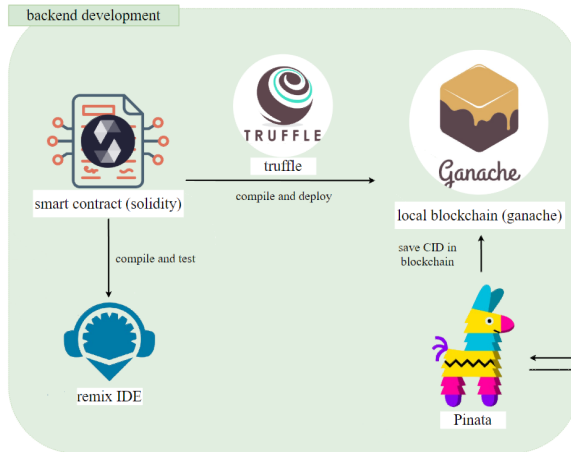
** จำนวนงวดค่าวัสดุหลักพิเศษและค่าประกอบมอดูลขึ้นอยู่กับจำนวนรอบผลิตชิ้นส่วนหลักและจำนวนรอบประกอบมอดูล

4.4 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบและพัฒนาเว็บไซต์แอปพลิเคชันเพื่อรองรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะ

สถาปัตยกรรมของระบบต้นแบบได้รับการออกแบบให้มี 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนพัฒนาเบื้องหลัง (Backend Development) และส่วนติดต่อผู้ใช้ (Frontend Development) เพื่อให้การพัฒนาและการทำงานของระบบสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแต่ละส่วนมีบทบาทเฉพาะในการสนับสนุนการทำงานของแพลตฟอร์ม ทั้งด้านการจัดการธุรกรรม การแสดงผลข้อมูล และการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน โดยแต่ละส่วนมีองค์ประกอบดังนี้

ส่วนที่ 1 ระบบสัญญาอัจฉริยะซึ่งหมายถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนบล็อกเชนโดยอัตโนมัติ เพื่อดำเนินการตามข้อตกลงที่ระบุไว้ล่วงหน้า สัญญาอัจฉริยะในระบบนี้มีหน้าที่หลักในการรับฝากเงิน เบิกจ่าย

จัดการธุรกรรม บันทึกข้อมูล และควบคุมการดำเนินงานให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด สัญญาอัจฉริยะในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาด้วยภาษา Solidity บนแพลตฟอร์ม Ethereum ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมสูงในระบบบล็อกเชนแบบกระจายศูนย์



รูปที่ 6 การพัฒนา backend development

กระบวนการเริ่มจากการเขียนและทดสอบโค้ดผ่าน Remix IDE ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของโค้ดได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว จากนั้นจึงใช้ Truffle Framework เพื่อจัดการโครงสร้างโปรเจกต์ การคอมไพล์ และการ deploy smart contract ไปยัง Ganache ซึ่งเป็นระบบบล็อกเชนจำลองที่ช่วยให้สามารถทดสอบธุรกรรมในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย

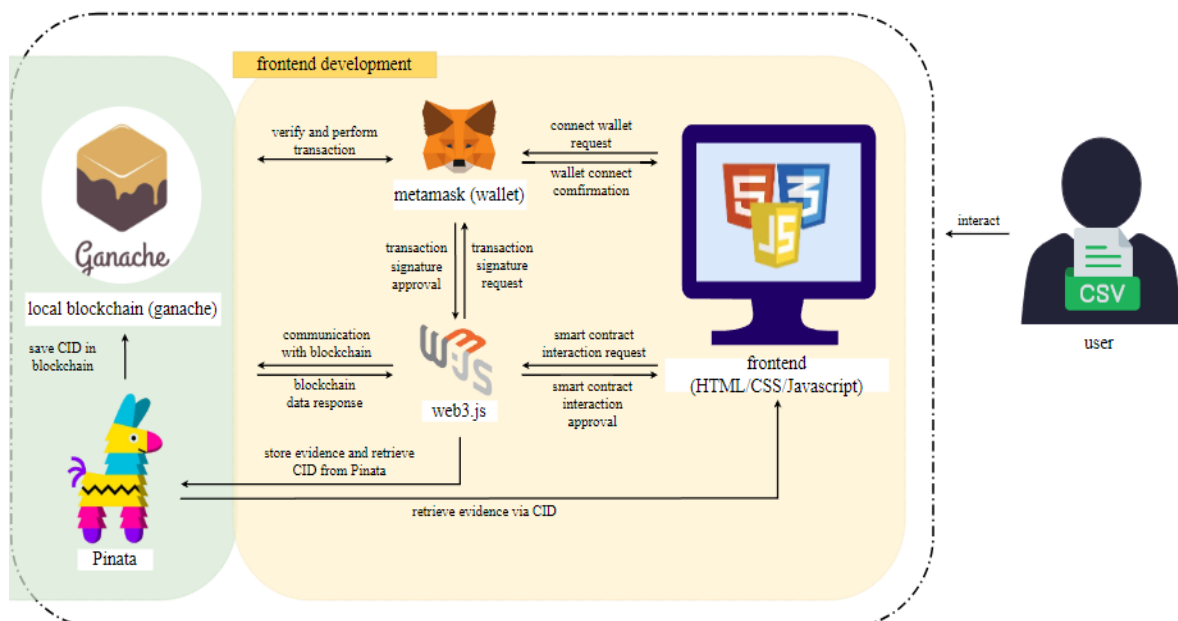
เนื่องจากบล็อกเชนมีข้อจำกัดในด้านพื้นที่จัดเก็บข้อมูลและต้นทุน โดยเฉพาะเมื่อต้องจัดเก็บไฟล์ขนาดใหญ่ เช่น เอกสารหรือภาพถ่าย ระบบจึงเลือกใช้บริการของ Pinata ซึ่งเชื่อมต่อกับ IPFS (InterPlanetary File System) สำหรับเก็บไฟล์ในลักษณะกระจายศูนย์ และใช้ CID (Content

Identifier) เป็นตัวแทนอ้างอิงไฟล์เหล่านั้นในสัญญาอัจฉริยะแทนการจัดเก็บโดยตรงในบล็อกเชนดังแสดงในรูปที่ 6

ส่วนที่ 2 frontend development เป็นการพัฒนาส่วนอินเทอร์เฟซผู้ใช้ (user interface) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกับสัญญาอัจฉริยะได้โดยตรง ผ่านการออกแบบและพัฒนาด้วย React ซึ่งเป็น JavaScript library ที่ได้รับความนิยมอย่างสูงสำหรับการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแบบโต้ตอบ (interactive web applications) โดยระบบนี้มีการผสมผสานการทำงานระหว่าง Web3.js และ MetaMask เพื่อสร้างการเชื่อมต่อที่ปลอดภัยและโปร่งใสกับสัญญาอัจฉริยะและบล็อกเชน ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยกระบวนการทำงานของระบบ frontend ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญดังนี้

- 1) การสื่อสารระหว่าง frontend กับบล็อกเชน ผ่าน Web3.js: Web3.js ทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับการเชื่อมต่อ frontend กับบล็อกเชนที่ผู้ใช้สามารถเพิ่มข้อมูลโครงสร้างการชำระเงินได้ผ่านการนำเข้าไฟล์ CSV และผู้ใช้งานเรียกใช้ฟังก์ชันในสัญญาอัจฉริยะ เช่น การเรียกข้อมูลสถานะโครงการ การตรวจสอบ milestones และการยืนยันการดำเนินธุรกรรมต่าง ๆ
- 2) การเชื่อมต่อกระเป๋าเงินผ่าน MetaMask: ผู้ใช้สามารถเริ่มต้นการใช้งานได้โดยเชื่อมต่อกระเป๋าเงินดิจิทัล (wallet connect) ผ่าน MetaMask ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องมือยืนยันตัวตนและลงนามในธุรกรรมที่เกี่ยวข้องกับสัญญาอัจฉริยะ เช่น การฝากเงิน การเบิกจ่าย หรือการตรวจสอบข้อมูลโครงการ
- 3) การจัดการข้อมูลด้วย Pinata และ CID ระบบจะจัดเก็บและดึงข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น ไฟล์หรือหลักฐาน (evidence) ผ่าน Pinata ซึ่งเป็นระบบจัดเก็บข้อมูลแบบกระจายศูนย์ (decentralized storage) โดยใช้ CID เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลกลับไปยังบล็อกเชน ทำให้ไม่จำเป็นต้องจัดเก็บไฟล์ขนาดใหญ่ในบล็อกเชนโดยตรง

4.5 อภิปรายผล



รูปที่ 7 การพัฒนา frontend development

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะในการจัดการกระแสเงินสดในโครงการก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์ เพื่อแก้ไขข้อจำกัดด้านการบริหารการเงินในงานก่อสร้างนอกสถานที่ก่อสร้างที่มีความซับซ้อนสูง ผลที่ได้รับพบว่า ระบบสัญญาอัจฉริยะสามารถเชื่อมโยงการเบิกจ่ายเงินกับ milestone และเอกสารประกอบการอนุมัติได้อย่างชัดเจน ช่วยเพิ่มความโปร่งใส ลดความล่าช้า และลดความเสี่ยงจากข้อพิพาทในการดำเนินงานทางการเงินของโครงการ

ประสิทธิภาพดังกล่าวเกิดจากการกำหนดเงื่อนไขที่อิสระและชัดเจนในสัญญาอัจฉริยะ ทำให้การเบิกจ่ายเงินดำเนินไปตามความก้าวหน้าที่ตรวจสอบได้จริง ลดการตีความที่แตกต่างระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย นอกจากนี้ ระบบยังมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับแต่งสัญญาอัจฉริยะได้ตามขอบเขตงานและโครงสร้างการชำระเงินของแต่ละโครงการ ช่วยให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการที่มีรูปแบบและความซับซ้อนหลากหลายได้อย่างเหมาะสม

ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างสัญญาและการชำระเงินสำหรับโครงการก่อสร้างแบบมอดูลาร์จริง โดยเฉพาะในโครงการที่มีผู้ผลิตวัสดุ ผู้ประกอบมอดูล และผู้รับเหมาหลายฝ่าย เพื่อช่วยลดข้อพิพาทและเพิ่มความชัดเจนในการบริหารโครงการ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการตรวจสอบคุณภาพงาน (เช่น การใช้ IoT) และการเชื่อมโยงกับระบบบริหารโครงการ (เช่น BIM และ ERP) ซึ่งควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแพลตฟอร์มต้นแบบที่ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะสำหรับการบริหารจัดการทางการเงินในโครงการก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์ โดยเน้นการเชื่อมโยงกระบวนการเบิกจ่ายเงินกับความก้าวหน้าของโครงการอย่างเป็นระบบ ผ่านการออกแบบโครงสร้างการชำระเงินที่สอดคล้องกับลำดับการดำเนินงานจริง แพลตฟอร์มสามารถเพิ่มความโปร่งใสในการดำเนินงาน ลดความเสี่ยงจากข้อพิพาททางการเงิน และช่วยเสริมความมั่นใจระหว่างเจ้าของโครงการและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ผลการทดลองใช้งานจริงแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ทั้งในด้านการติดตามสถานะงานและการจัดการกระแสเงินสดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงถึงศักยภาพของเทคโนโลยีบล็อกเชนและสัญญาอัจฉริยะในการพัฒนารูปแบบการบริหารโครงการก่อสร้างเหล็กมอดูลาร์

6. ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทดสอบระบบกับโครงการที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ทั้งในแง่ของมูลค่า ระยะเวลา และจำนวนผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการรองรับงานขนาดใหญ่ รวมถึงการประสานงานหลายหน่วยงานพร้อมกัน
- 2) เนื่องจากการใช้สัญญาอัจฉริยะในบริบทของประเทศไทยยังไม่มีกรอบกฎหมายรองรับอย่างชัดเจน จึงควรมีการศึกษาแนวทางการ

กำกับดูแล การยอมรับทางกฎหมาย และกระบวนการยืนยันสิทธิผูกพันทางกฎหมาย เพื่อให้สามารถนำไปใช้จริงได้

- 3) ระบบควรเชื่อมต่อกับเทคโนโลยี เช่น เซนเซอร์, RFID, QR Code และ IoT เพื่อรองรับการตรวจสอบคุณภาพและติดตามวัสดุแบบ real-time ตลอดกระบวนการผลิตและติดตั้ง พร้อมทั้งเชื่อมโยงกับ BIM และ ERP เพื่อให้การเบิกจ่ายและตรวจสอบข้อมูลเป็นไปโดยอัตโนมัติ เพิ่มความแม่นยำและลดงานซ้ำซ้อนในการบริหารโครงการ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้ศูนย์การจัดการทรัพย์สินเชิงดิจิทัลเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (Center of Digital Asset Management for Sustainable Development, CDAM)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G., & Woetzel, J. (2019). Modular construction: From projects to products. McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure, 1, 1-34
- [2] Jin, R., Gao, S., Cheshmehzangi, A., & Aboagye-Nimo, E. (2018). A holistic review of offsite construction literature published between 2008 and 2018. Journal of Cleaner Production, 202, 1202-1219
- [3] Wuni, I. Y., & Shen, G. Q. P. (2019). Holistic Review and Conceptual Framework for the Drivers of Offsite Construction: A Total Interpretive Structural Modelling Approach. Buildings, 9(5), 117
- [4] Feldmann, F. G., Birkel, H., & Hartmann, E. (2022). Exploring barriers towards modular construction—A developer perspective using fuzzy DEMATEL. Journal of Cleaner Production, 367, 133023
- [5] Assaf, M., Hussein, M., Alsulami, B. T., & Zayed, T. (2022). A mixed review of cash flow modeling: Potential of blockchain for modular construction. Buildings, 12(12), 2054
- [6] Said, H., Salama, T., & Gude, A. (2024). Assessing the Financial Dynamics of Modular Offsite Building Projects. ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction
- [7] Abdul Nabi, M., Elsayegh, A., & El-adaway, I. H. (2023). Understanding collaboration requirements for modular construction and their cascading failure impact on project

- performance. *Journal of Management in Engineering*, 39(6), 04023043
- [8] Hunhevicz, J. J., & Hall, D. M. (2020). Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options. *Advanced Engineering Informatics*, 45, 101094
- [9] Elghaish, F., Rahimian, F. P., Hosseini, M. R., Edwards, D., & Shelbourn, M. (2022). Financial management of construction projects: Hyperledger fabric and chaincode solutions. *Automation in Construction*, 137, 104185.
- [10] Mahmudnia, D., Arashpour, M., & Yang, R. (2022). Blockchain in construction management: Applications, advantages and limitations. *Automation in Construction*, 140, 104379.
- [11] Ahmadiheyksarmast, S., & Sonmez, R. (2020). A smart contract system for security of payment of construction contracts. *Automation in Construction*, 120, 103401.
- [12] Buildoffsite. (2013). BoS Glossary of Terms 2013. <https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2015/03/BoS-Glossary-of-terms-2013-web.pdf>
- [13] Lawson, M., Ogden, R., & Goodier, C. I. (2014). *Design in modular construction* (Vol. 476). CRC Press Boca Raton, FL.
- [14] Salama, T., Figgess, G., Elsharawy, M., & El-Sokkary, H. (2020). Financial modeling for modular and offsite construction. *Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020)*, Kitakyushu, Japan
- [15] Zhang, Y., Pan, M., Pan, W., Yang, Y., & Wu, J. (2024). Enhancing modular construction supply chain: Drivers, opportunities, constraints, concerns, strategies, and measures. *Developments in the Built Environment*, 18, 100408
- [16] Hussein, M., Eltoukhy, A. E. E., Karam, A., Shaban, I. A., & Zayed, T. (2021). Modelling in off-site construction supply chain management: A review and future directions for sustainable modular integrated construction. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127503
- [17] Baú, G., & Oviedo-Haito, R. (2022). Mapping activities and inputs of modular construction with steel 3D modules in Brazil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*
- [18] Zeba, S., Suman, P., & Tyagi, K. (2023). Types of blockchain. In *Distributed Computing to Blockchain* (pp. 55-68). Elsevier.
- [19] Mukherjee, P., & Pradhan, C. (2021). Blockchain 1.0 to Blockchain 4.0—The Evolutionary Transformation of Blockchain Technology. In (pp. 29-49).
- [20] Tyagi, S., Gogireddy, C., Varikuppala, C., & Nalabothu, K. (2022). Study of smart contracts. *Proceedings of the international conference on innovative computing & communication (ICICC)*