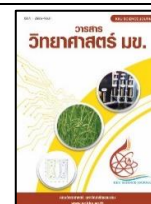




KKU SCIENCE JOURNAL

Journal Home Page : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>

Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand



การออกแบบสถาปัตยกรรมบล็อกเชนแบบผสมเพื่อเพิ่มความโปร่งใสในการบันทึก กิจกรรมนักศึกษา

Design of a Hybrid Blockchain Architecture to Enhance Transparency in Student Activity Recording

สุกสวัสดิ์ แซ่ลิ้ม¹ ณภัทร ลอนู¹ บุรินทร์ชัย สุขอ่อน¹ กรันท์ ชันทอง¹ ณัฐวัฒน์ หิรัญวงษ์¹
วรเชษฐ์ อุทธา² และ อุษณีย์ ภัคคีติระกุลวงศ์^{2*}

Suksawat Saelim¹, Naphat Lonu¹, Burinchai Sukon¹, Karan Khanthong¹, Natthawat Hiranwong¹,
Worachet Uttha² and Udsanee Pakdeetrakulwong^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

²สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

¹Information Technology Department, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University,
Nakhon Pathom, 73000, Thailand

²Software Engineering Department, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University,
Nakhon Pathom, 73000, Thailand

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันระบบบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมนักศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาส่วนใหญ่ยังใช้ระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์ ซึ่งอาจมีข้อจำกัดด้านความโปร่งใสและความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลังของข้อมูล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนเพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือของข้อมูล ระบบถูกออกแบบภายใต้สถาปัตยกรรมแบบผสม (hybrid architecture) ซึ่งจัดเก็บข้อมูลรายละเอียดกิจกรรมในฐานข้อมูลแบบ off-chain และบันทึกค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล (cryptographic commitment) บนบล็อกเชนผ่านสมาร์ตคอนแทรกต์ที่พัฒนาด้วยภาษา Solidity ระบบต้นแบบถูกพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันและเชื่อมต่อกับเครือข่ายบล็อกเชนที่รองรับ Ethereum Virtual Machine โดยใช้แนวคิด Minimal On-chain ซึ่งบันทึกเฉพาะค่าแฮช (hash) ของข้อมูลกิจกรรมบนเครือข่าย ผลการประเมินพบว่า การ deploy สมาร์ตคอนแทรกต์มีต้นทุนประมาณ 0.0265 ดอลลาร์สหรัฐ (0.82 บาท) ขณะที่การบันทึกข้อมูลกิจกรรมมีต้นทุนเฉลี่ยประมาณ 0.002 ดอลลาร์สหรัฐ (0.06 บาท) ต่อธุรกรรม ค่าการใช้แก๊สของธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 119,900 - 119,950 ยูนิต และความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 7 วินาที ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่าแนวทางสถาปัตยกรรมแบบผสมภายใต้แนวคิด Minimal On-chain สามารถเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลกิจกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยยังคงรักษาต้นทุนธุรกรรมในระดับต่ำและลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลบนบล็อกเชน

*Corresponding Author, E-mail: udsanee@webmail.npru.ac.th

Received date: 13 November 2025 | Revised date: 8 March 2026 | Accepted date: 11 March 2026

doi: 10.14456/kkuscij.2026.23

ABSTRACT

Student activity recording systems in higher education institutions are commonly implemented as centralized information systems, which may limit transparency and the ability to independently verify activity records. This study aims to design and develop a blockchain-based system for recording student activities to improve data transparency and reliability. The proposed system adopts a hybrid architecture in which detailed activity data are stored in an off-chain database, while a cryptographic commitment of the dataset is recorded on the blockchain through a smart contract developed in Solidity. A prototype web application was implemented and integrated with an Ethereum Virtual Machine (EVM)-compatible blockchain network using a Minimal On-chain approach that stores only the hash of the activity dataset on the blockchain. Experimental evaluation shows that deploying the smart contract required approximately 0.0265 USD (0.82 Baht), while recording an activity dataset cost about 0.002 USD (0.06 Baht) per transaction. The gas consumption of transactions ranged from 119,900 - 119,950 units, and the transaction confirmation latency ranged from about 4 to 7 seconds. The results demonstrate that the proposed hybrid architecture with a Minimal On-chain design can effectively enhance the verifiability of student activity records while maintaining low transaction costs and minimizing the exposure of personal data on the blockchain.

คำสำคัญ: บล็อกเชน สมาร์ทคอนแทรกต์ สถาปัตยกรรมแบบผสม ความโปร่งใส ระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษา

Keywords: Blockchain, Smart Contract, Hybrid Architecture, Transparency, Student Activity Recording System

บทนำ

การจัดกิจกรรมเสริมหลักสูตรเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนาศักยภาพของนักศึกษาในสถาบันอุดมศึกษา เนื่องจากกิจกรรมดังกล่าวช่วยส่งเสริมทักษะด้านสังคม ภาวะผู้นำ และการทำงานร่วมกัน ซึ่งเป็นสมรรถนะสำคัญที่ไม่สามารถพัฒนาได้จากการเรียนในห้องเรียนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม ระบบสารสนเทศกิจกรรมนักศึกษาที่ใช้งานในหลายสถาบัน ยังคงใช้ระบบสารสนเทศแบบรวมศูนย์ (centralized systems) ที่จัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลส่วนกลาง ซึ่งเน้นการบริหารจัดการข้อมูลภายในองค์กรเป็นหลัก (ธนพลและอรอุมา, 2568) โครงสร้างดังกล่าวแม้มีความสะดวกในการบริหารจัดการ แต่ยังคงพึ่งพาความน่าเชื่อถือของผู้ดูแลระบบเป็นหลัก และอาจมีข้อจำกัดด้านความโปร่งใสและความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง (Islam and Apu, 2024) เมื่อเกิดข้อโต้แย้งเกี่ยวกับข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม

เทคโนโลยีบล็อกเชนได้รับความนิยมอย่างมากในฐานะระบบบัญชีรายการแบบกระจายศูนย์ที่ออกแบบมาเพื่อลดการพึ่งพาหน่วยงานกลางในการจัดเก็บและตรวจสอบข้อมูล โดยข้อมูลจะถูกบันทึกในรูปของบล็อกที่เชื่อมโยงกันด้วยค่าฟังก์ชันแฮช ส่งผลให้ข้อมูลมีความต่อเนื่อง โปร่งใส และยากต่อการแก้ไขย้อนหลัง (Nakamoto, 2008; Singh and Srivastava, 2025) องค์ประกอบสำคัญของบล็อกเชนประกอบด้วยบล็อก สายโซ่ กลไกฉันทามติ และเครือข่ายโหนดที่ร่วมกันตรวจสอบธุรกรรมก่อนบันทึกลงในสายโซ่อย่างถาวร คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้บล็อกเชนสามารถสนับสนุนความน่าเชื่อถือของข้อมูลและเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติดังกล่าวทำให้บล็อกเชนได้รับความสนใจและถูกประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขา เช่น ด้านการเงินและกลยุทธ์ธุรกิจ (Chen *et al.*, 2021) ด้านสาธารณสุขและการจัดการข้อมูลทางการแพทย์ (Agbo *et al.*, 2019) ห่วงโซ่อุปทาน (Saber *et al.*, 2019) รวมถึงด้านการศึกษาเพื่อการจัดการข้อมูลนักศึกษา การรับรองผลการเรียน และการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษา (Vu, 2022; Rafdhi and Hayati, 2023; Tran *et al.*, 2023)

นอกเหนือจากโครงสร้างพื้นฐานของบล็อกเชนแล้ว สมาร์ทคอนแทรกต์ (smart contract) หรือสัญญาอัจฉริยะยังเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้ระบบสามารถดำเนินการตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ล่วงหน้าโดยอัตโนมัติเมื่อมีการเรียกใช้ (Shaker *et al.*, 2021) สมาร์ทคอนแทรกต์เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานอยู่บนเครือข่ายบล็อกเชน โดยตรรกะของสัญญาจะถูกบันทึกไว้บนเครือข่ายและสามารถตรวจสอบได้ จึงช่วยลดการพึ่งพาตัวกลางและเพิ่มความโปร่งใสของกระบวนการทำธุรกรรม สมาร์ทคอนแทรกต์สามารถนำมาใช้เพื่อควบคุมการบันทึกข้อมูล การกำหนดสิทธิ์ และการสร้างกลไกตรวจสอบย้อนหลัง (audit trail) ผ่านการบันทึกธุรกรรมในลักษณะที่ไม่สามารถแก้ไขได้ (Regueiro *et al.*, 2021) คุณสมบัตินี้จึงมีความสำคัญต่อระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือและความโปร่งใส

อย่างไรก็ตาม แนวทางการใช้บล็อกเชนในงานวิจัยจำนวนมากยังคงมุ่งเน้นการจัดเก็บข้อมูลโดยตรงบนเครือข่ายบล็อกเชน ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อจำกัดด้านต้นทุนธุรกรรมและประสิทธิภาพของระบบโดยเฉพาะในกรณีที่ข้อมูลจำนวนมากหรือมีการทำธุรกรรมบ่อยครั้ง นอกจากนี้ ในบริบทของสถาบันอุดมศึกษาไทย การจัดเก็บข้อมูลนักเรียนบนเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะยังต้องคำนึงถึงข้อกำหนดด้านการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลตามพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (PDPA) และหลักการกำกับดูแลข้อมูล (data governance) อย่างเหมาะสม (จักรกริชและคณะ, 2567) ซึ่งทำให้การนำข้อมูลทั้งหมดขึ้นสู่บล็อกเชนอาจไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสมจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยผสานการทำงานระหว่างระบบฐานข้อมูลแบบดั้งเดิมกับเครือข่ายบล็อกเชน ผ่านการแยกการจัดเก็บข้อมูลระหว่างส่วน on-chain และ off-chain อย่างชัดเจน กล่าวคือ ใช้บล็อกเชนเป็นกลไกในการสร้างร่องรอยธุรกรรมและพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล ขณะที่ข้อมูลรายละเอียดทั้งหมดถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลภายนอกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการและการควบคุมสิทธิ์การเข้าถึง (Regueiro *et al.*, 2021; Islam and Apu, 2024) ภายใต้แนวทางนี้ แนวคิด Minimal On-chain มุ่งบันทึกเฉพาะค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากฟังก์ชันแฮชเชิงเข้ารหัสบนเครือข่ายบล็อกเชน ซึ่งช่วยลดต้นทุนธุรกรรม ลดปริมาณข้อมูลบนเชน และสอดคล้องกับหลักการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลในบริบทไทย ขณะเดียวกันยังคงรักษาความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลังของข้อมูลผ่านกลไกของบล็อกเชนได้

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยด้านบล็อกเชนในภาคการศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนในการจัดเก็บและรับรองข้อมูลวุฒิการศึกษาและผลการเรียน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ลดการปลอมแปลงเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล งานของ Tran *et al.* (2023) ได้นำเสนอระบบบริหารจัดการข้อมูลมหาวิทยาลัยที่พัฒนาบนสถาปัตยกรรมบล็อกเชนแบบกระจายศูนย์ เพื่อรองรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างสถาบันอย่างปลอดภัยและโปร่งใส ขณะที่ Rafdhi and Hayati (2023) ได้วิเคราะห์ศักยภาพของบล็อกเชนในด้านการรับรองข้อมูลทางการศึกษา และชี้ให้เห็นถึงประเด็นท้าทายด้านความซับซ้อนทางเทคนิคและการนำไปใช้งานจริงในสถาบันอุดมศึกษา นอกจากนี้ Amnuaysin *et al.* (2022) ได้นำเสนอการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ประยุกต์ใช้บล็อกเชนเพื่อเพิ่มความโปร่งใสของข้อมูลนักศึกษา ส่วน Vu (2022) ได้เสนอแบบจำลองการบริหารจัดการกิจกรรมนักศึกษาบนบล็อกเชนโดยใช้สมาร์ทคอนแทรกต์เพื่อบันทึกและตรวจสอบข้อมูลกิจกรรม รวมถึงการออกใบรับรองดิจิทัล ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของบล็อกเชนในการสนับสนุนความโปร่งใสในการบริหารจัดการกิจกรรม

แม้ว่างานวิจัยข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของบล็อกเชนในการสนับสนุนความน่าเชื่อถือและความสามารถในการตรวจสอบข้อมูลทางการศึกษา แต่ในมุมมองเชิงสถาปัตยกรรม ยังมีงานวิจัยไม่มากนักที่อธิบายอย่างชัดเจนถึงการใช้บล็อกเชนในฐานะกลไกพิสูจน์ความถูกต้องที่แยกออกจากระบบจัดเก็บข้อมูลหลัก โดยเฉพาะในบริบทของการบันทึกกิจกรรมนักศึกษา อีกทั้งการประเมินผลเชิงต้นทุนและสมรรถนะของแนวทางดังกล่าวยังปรากฏไม่มากนักในวรรณกรรมที่ทบทวน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาโดยใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสมและแนวทาง Minimal On-chain ตลอดจนประเมินสมรรถนะของระบบในด้านต้นทุนธุรกรรม ความหน่วงเวลา และอัตราการประมวลผลของธุรกรรมบนเครือข่ายบล็อกเชน เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของแนวทางดังกล่าวในการสนับสนุนความโปร่งใส ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง และความน่าเชื่อถือของข้อมูลกิจกรรมนักศึกษาในบริบทของสถาบันอุดมศึกษา

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยของงานวิจัยนี้อาศัยระเบียบวิธีวิจัยเชิงออกแบบ (design science research: DSR) ตามกรอบ Design Science Research Methodology (DSRM) ของ Peffers *et al.* (2007) เพื่อพัฒนาและประเมินสิ่งประดิษฐ์เชิงสถาปัตยกรรมที่ตอบโจทย์ปัญหาการบันทึกกิจกรรมนักศึกษา กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การระบุปัญหา (2) กำหนดวัตถุประสงค์ (3) ออกแบบและพัฒนา (4) สาธิต (5) ประเมินผล และ (6) สื่อสารองค์ความรู้ โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. การระบุปัญหาและแรงจูงใจ

ระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาในหลายสถาบันยังใช้ฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ ซึ่งแม้มีประสิทธิภาพเชิงปฏิบัติการ แต่ยังพึ่งพาความเชื่อถือในผู้ดูแลระบบและขาดกลไกตรวจสอบย้อนหลังที่เป็นอิสระ งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ประยุกต์ใช้บล็อกเชนในบริบทการศึกษาแล้วในหลายด้าน อย่างไรก็ตามยังขาดการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบผสมที่แยกบทบาทของบล็อกเชนให้ทำหน้าที่เป็นกลไกพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล โดยไม่จำเป็นต้องจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดไว้บนเครือข่าย

จากช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงกำหนดคำถามวิจัยไว้ดังนี้

RQ1: การใช้สถาปัตยกรรมแบบผสมภายใต้แนวคิด Minimal On-chain สามารถสร้างกลไกตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลกิจกรรมได้อย่างไร

RQ2: แนวทาง Minimal On-chain ส่งผลต่อค่าธรรมเนียมธุรกรรม และสมรรถนะของระบบ (latency และ throughput) อย่างไร

RQ3: การบันทึกข้อมูลในรูปแบบค่าพิสูจน์ความถูกต้องสามารถลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลบนบล็อกเชนได้หรือไม่

2. วัตถุประสงค์ของการแก้ปัญหา

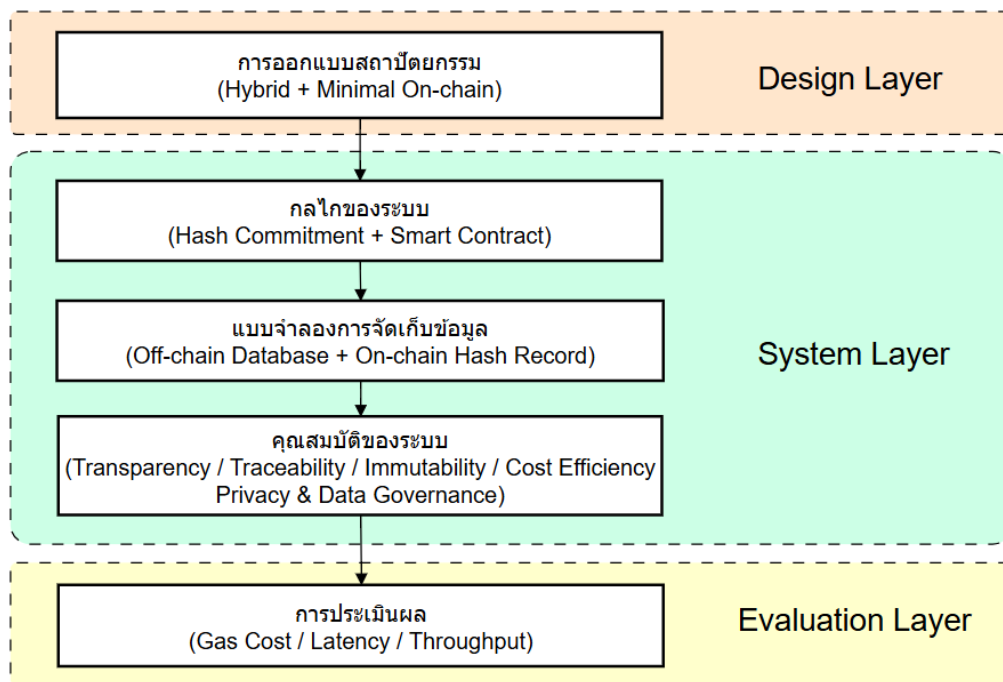
- 1) เพื่อออกแบบสถาปัตยกรรมแบบผสมที่ใช้บล็อกเชนเป็นชั้นพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล
- 2) เพื่อพัฒนาสมรรถนะคอนแทรกต์ที่รองรับการบันทึกข้อมูลแบบ Minimal On-chain ผ่านค่าแฮชของข้อมูล
- 3) เพื่อประเมินต้นทุนธุรกรรมและสมรรถนะของระบบภายใต้สถานการณ์จำลองที่แตกต่างกัน

3. การออกแบบและพัฒนา

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสมและ Minimal On-chain ซึ่งครอบคลุมการกำหนดกรอบแนวคิดเชิงระบบ การวิเคราะห์ระบบ การออกแบบระบบ และการพัฒนาระบบ ดังรายละเอียดในหัวข้อต่อไปนี้

3.1 กรอบแนวคิดเชิงระบบของการวิจัย

กรอบแนวคิดเชิงระบบของงานวิจัยนี้ถูกออกแบบเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการตัดสินใจเชิงสถาปัตยกรรม กลไกการทำงานของระบบ และผลลัพธ์เชิงสมรรถนะของระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชน โดยแบ่งองค์ประกอบของกรอบแนวคิดออกเป็นสามชั้น ได้แก่ Design Layer System Layer และ Evaluation Layer ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดเชิงระบบของสถาปัตยกรรมแบบผสมสำหรับการบันทึกกิจกรรมนักศึกษา

Design Layer: ระบบถูกออกแบบภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสมร่วมกับแนวคิด Minimal On-chain โดยจัดเก็บข้อมูลรายละเอียดกิจกรรมในฐานะข้อมูลแบบ off-chain และบันทึกเฉพาะค่าแฮชของข้อมูลบนบล็อกเชน เพื่อใช้เป็นหลักฐานในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

System Layer: ระบบใช้กลไก cryptographic commitment ผ่านการคำนวณค่าแฮชของชุดข้อมูลและบันทึกลงบนบล็อกเชนผ่านสมาร์ตคอนแทรกต์ ส่งผลให้ระบบสามารถสร้างคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ ความโปร่งใสของข้อมูล (transparency) ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง (traceability) ความไม่สามารถแก้ไขข้อมูลย้อนหลัง (immutability) ประสิทธิภาพด้านต้นทุน (cost efficiency) และการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลและธรรมาภิบาลข้อมูล (privacy and data governance)

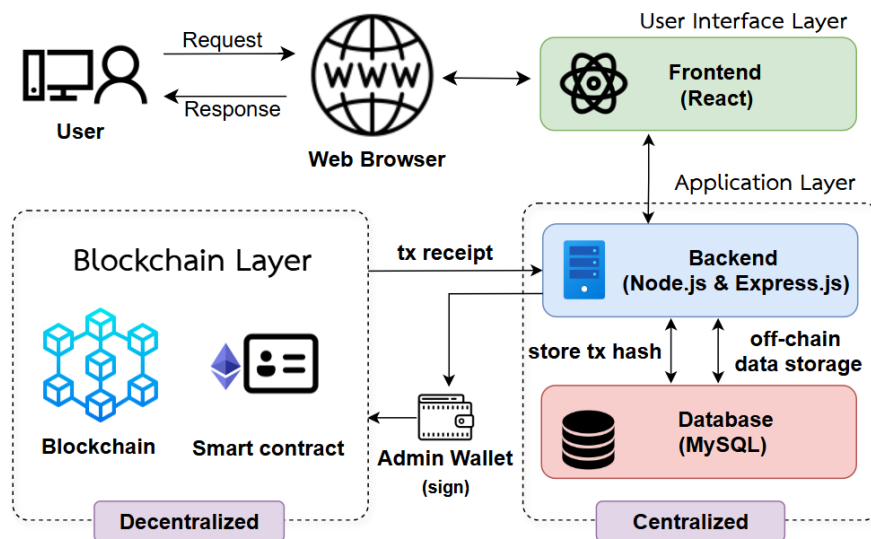
Evaluation Layer: ระบบถูกประเมินผ่านตัวชี้วัด ได้แก่ ต้นทุนธุรกรรม ความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรม และอัตราการประมวลผลธุรกรรม ซึ่งเป็นตัวชี้วัดมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบบล็อกเชน เนื่องจากสามารถสะท้อนต้นทุนการดำเนินธุรกรรม ความเร็วในการยืนยันข้อมูล และความสามารถในการรองรับธุรกรรมของเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zheng *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2019; Casino *et al.*, 2019)

3.2 การวิเคราะห์ระบบ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความต้องการของระบบและกำหนดขอบเขตการทำงานของระบบผ่านการสร้าง Use Case Diagram ดังแสดงในรูปที่ 2 พร้อมทั้งกำหนดฟังก์ชันการทำงานของระบบดังตารางที่ 1 โดยมีผู้ใช้งานแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ (1) นักศึกษา มีหน้าที่ลงทะเบียนเข้าร่วมกิจกรรม และสามารถตรวจสอบข้อมูลกิจกรรมรวมถึงประวัติการเข้าร่วมของตนเอง (2) อาจารย์ มีหน้าที่ตรวจสอบข้อมูลกิจกรรมและติดตามข้อมูลการเข้าร่วมของนักศึกษา (3) ผู้ดูแลระบบ มีหน้าที่จัดการข้อมูลกิจกรรม อนุมัติข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม และดำเนินการบันทึกข้อมูลสำคัญลงบนเครือข่ายบล็อกเชน

3.3 การออกแบบระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบที่นำเสนอถูกออกแบบภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสม ซึ่งผสมผสานการทำงานของระบบแบบรวมศูนย์และแบบกระจายศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ ชั้นส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface Layer) ชั้นประมวลผลของระบบ (Application Layer) และชั้นบล็อกเชน (Blockchain Layer)



รูปที่ 3 ภาพรวมของสถาปัตยกรรมระบบ

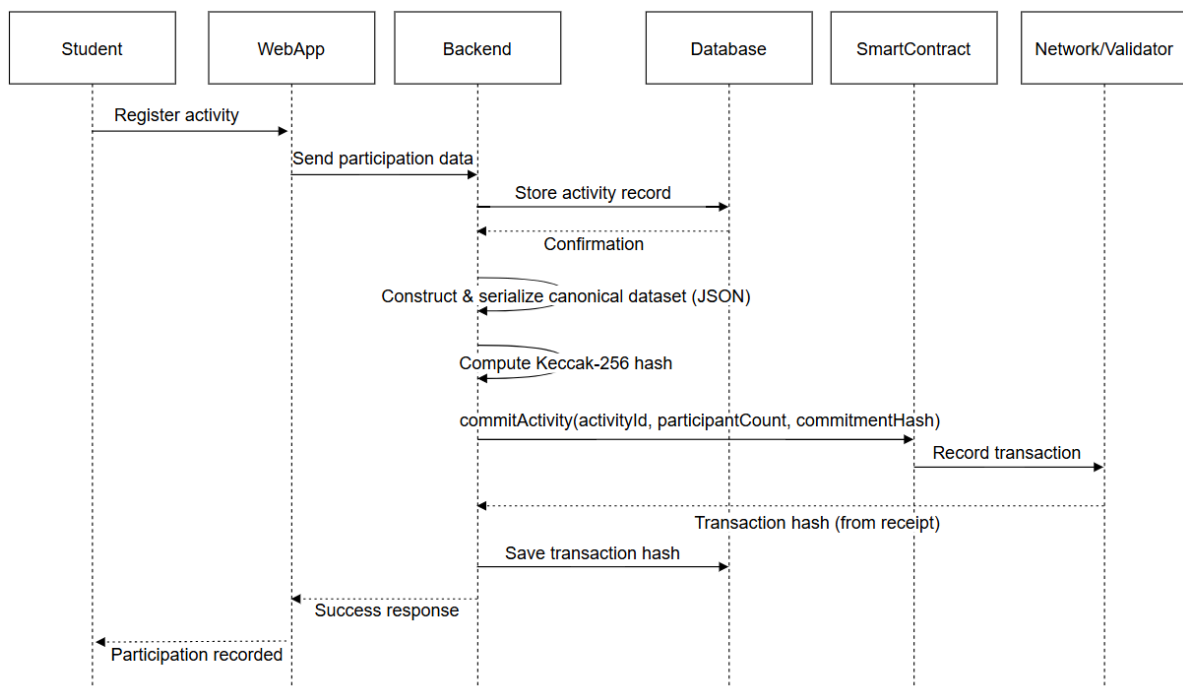
ในส่วนของชั้นส่วนติดต่อผู้ใช้ ระบบถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยี React เพื่อรองรับการใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลกิจกรรม ลงทะเบียนเข้าร่วมกิจกรรม และตรวจสอบประวัติการเข้าร่วมกิจกรรมได้ผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบ

ชั้นประมวลผลของระบบ ถูกพัฒนาด้วย Node.js และ Express.js ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการประมวลผลคำร้องขอจากผู้ใช้ จัดการตรรกะของระบบ และเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล MySQL สำหรับจัดเก็บข้อมูลกิจกรรมและข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมในรูปแบบ off-chain การจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลแบบดั้งเดิมช่วยให้ระบบสามารถรองรับการประมวลผลข้อมูลจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดภาระต้นทุนธุรกรรมบนเครือข่ายบล็อกเชน

ในส่วนของชั้นบล็อกเชน ระบบถูกออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับเครือข่ายที่อยู่บนสถาปัตยกรรม Ethereum Virtual Machine โดยบล็อกเชนทำหน้าที่เป็นกลไกในการพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลแทนการจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดบนเครือข่าย โดยระบบจะสร้างค่าแฮชเชิงเข้ารหัสของชุดข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมด้วยอัลกอริทึม Keccak-256 และบันทึกค่าแฮชดังกล่าวลงบนเครือข่ายบล็อกเชนผ่านสมาร์ตคอนแทรกต์

สมาร์ตคอนแทรกต์ดังกล่าวได้รับการออกแบบให้รองรับการบันทึกข้อมูลแบบหลายชุดต่อกิจกรรมเดียว เพื่อลดจำนวนธุรกรรมและควบคุมต้นทุนค่าแก๊ส ภายใต้แนวคิด Minimal On-chain ซึ่งจะบันทึกเฉพาะข้อมูลที่จำเป็นต่อการพิสูจน์ความถูกต้องเท่านั้น โดยธุรกรรมจะถูกส่งผ่านส่วน backend ของระบบและลงนามด้วยกุญแจดิจิทัลของผู้ดูแลระบบที่ระบบจัดการได้ตามกลไกการกำหนดสิทธิ์ที่กำหนด และผลลัพธ์ของธุรกรรม (transaction receipt) จะถูกส่งกลับมายังระบบเพื่อนำไปจัดเก็บเป็นหลักฐานสำหรับการตรวจสอบในภายหลัง

กระบวนการบันทึกการเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษาแสดงด้วยแผนภาพลำดับเหตุการณ์ (sequence diagram) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมจะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลแบบ off-chain ก่อน จากนั้นระบบ backend จะสร้างค่าพิสูจน์ความถูกต้องของชุดข้อมูลภายใต้แนวคิด Minimal On-chain และส่งค่า commitment hash ไปยังสมาร์ตคอนแทรกต์บนเครือข่ายบล็อกเชน เมื่อธุรกรรมได้รับการบันทึกสำเร็จ ระบบจะได้รับ Transaction Hash เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการติดตามธุรกรรมบนเครือข่าย ขณะที่การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจะดำเนินการโดยการคำนวณค่าแฮชจากข้อมูล off-chain ซ้ำอีกครั้ง แล้วเปรียบเทียบกับค่า commitment hash ที่บันทึกไว้ในสมาร์ตคอนแทรกต์



รูปที่ 4 ลำดับการทำงานของระบบ

3.4 การพัฒนาระบบ

ระบบต้นแบบถูกพัฒนาตามสถาปัตยกรรมที่กำหนดไว้ โดยประกอบด้วยส่วนติดต่อผู้ใช้ ระบบประมวลผลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ฐานข้อมูลแบบ off-chain และสมาร์ตคอนแทรกต์บนเครือข่ายบล็อกเชน ระบบเว็บแอปพลิเคชันทำหน้าที่รับคำร้องขอจากผู้ใช้งานและส่งต่อไปยังส่วน backend เพื่อประมวลผลข้อมูลกิจกรรม รวมถึงการสร้างและบันทึกค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลลงบนบล็อกเชน

กระบวนการบันทึกข้อมูลกิจกรรมเริ่มต้นจากการรวบรวมข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษาที่จัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูล จากนั้นระบบส่วน backend จะนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างเป็นชุดข้อมูล (dataset) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลสำคัญ ได้แก่ รหัสกิจกรรม (activityId) รายการผู้เข้าร่วม (participants) ข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม (attendanceDays) และข้อมูลประกอบอื่น ๆ (metadata)

เพื่อให้ชุดข้อมูลมีลักษณะที่แน่นอนและให้ผลลัพธ์ซ้ำได้อย่างสม่ำเสมอ ระบบจะจัดโครงสร้างและลำดับข้อมูลให้คงที่ จากนั้นแปลงชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐาน (canonical format) เช่น canonical JSON ก่อนนำไปคำนวณค่าแฮช

ในการสร้างกลไกการพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล ระบบจะคำนวณค่าแฮชของชุดข้อมูลด้วยฟังก์ชัน Keccak-256 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแฮชที่ใช้ในเครือข่าย Ethereum โดยค่าแฮชที่ได้จะทำหน้าที่เป็นค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งในระบบนี้แทนด้วยตัวแปร commitmentHash ของชุดข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม และใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในภายหลัง รายละเอียดของกระบวนการดังกล่าวแสดงใน Algorithm 1 ซึ่งประกอบด้วยการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล การสร้างชุดข้อมูล การจัดลำดับข้อมูลให้แน่นอน การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ canonical JSON และการคำนวณ commitmentHash

หลังจากได้ค่า commitmentHash แล้ว ระบบจะคำนวณค่า participantCount จากจำนวนรายการผู้เข้าร่วมในตัวแปร participants และเรียกใช้ฟังก์ชัน commitActivity (activityId participantCount commitmentHash) ของสมาร์ตคอนแทรกต์เพื่อบันทึกค่าพิสูจน์ความถูกต้องลงบนเครือข่ายบล็อกเชน

สมาร์ตคอนแทรกต์ถูกพัฒนาด้วยภาษา Solidity และออกแบบให้รองรับการบันทึกข้อมูลแบบหลายชุด (batch) ต่อกิจกรรมเดียว โดยใช้โครงสร้างข้อมูลที่เชื่อมโยงระหว่าง activityId และ batchId ซึ่ง batchId ใช้แทนรอบของการบันทึกข้อมูลสำหรับกิจกรรมนั้น ในกรณีที่กิจกรรมมีผู้เข้าร่วมทยอยสมัครหรือมีการอนุมัติข้อมูลหลายรอบ ระบบสามารถรวบรวมข้อมูลของกิจกรรมเดียวกันในแต่ละรอบก่อนสร้าง commitment และบันทึกขึ้นบล็อกเชน เพื่อลดจำนวนธุรกรรมและควบคุมต้นทุนค่าแก๊ส

เมื่อธุรกรรมได้รับการยืนยันบนเครือข่าย ระบบจะได้รับ transaction receipt จากผู้ให้บริการเครือข่ายหรือโหนดที่เชื่อมต่อ และดึงค่า Transaction Hash (transactionHash) จาก receipt เพื่อนำไปจัดเก็บในฐานข้อมูลแบบ off-chain เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับธุรกรรมและการตรวจสอบย้อนหลัง

รายละเอียดของข้อมูลที่จัดเก็บบนบล็อกเชนแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย activityId batchId commitmentHash participantCount และ timestamp โดย commitmentHash ทำหน้าที่เป็นหลักฐานพิสูจน์ความถูกต้องของชุดข้อมูลที่สร้างจากข้อมูล off-chain ด้วยฟังก์ชัน Keccak-256 ส่วน participantCount และ timestamp ช่วยสนับสนุนการอ้างอิงและการวิเคราะห์ธุรกรรมในภายหลัง

ตารางที่ 2 โครงสร้างข้อมูลที่จัดเก็บบนบล็อกเชน

Field	Type	Description
activityId	uint256	รหัสกิจกรรมที่ใช้ระบุชุดข้อมูล
batchId	uint32	หมายเลขรอบการบันทึกข้อมูลของกิจกรรมเดียวกัน
commitmentHash	bytes32	ค่าแฮชของข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม
participantCount	uint32	จำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม
timestamp	uint64	เวลาที่ธุรกรรมถูกบันทึก

รายละเอียดของขั้นตอนการสร้าง commitmentHash และการบันทึกข้อมูลผ่านฟังก์ชัน commitActivity แสดงดังใน Algorithm 1

Algorithm 1: Cryptographic Commitment Generation**Input:** activityId, batchId, participants, attendanceDays, metadata**Output:** commitmentHash, transactionHash

- 1: Retrieve participation records for activityId that belong to batchId from the off-chain database
- 2: Construct a structured dataset including activityId, batchId, ordered list of participant identifiers, attendance records, metadata
- 3: Normalize the structured dataset to ensure deterministic ordering
- 4: Serialize the dataset into a canonical JSON format to obtain serializedDataset
- 5: Compute the cryptographic commitment using Keccak-256

$$\text{commitmentHash} \leftarrow \text{keccak256}(\text{serializedDataset})$$
- 6: Set participantCount $\leftarrow \text{length}(\text{participants})$
- 7: Send an on-chain transaction to the smart contract function:

$$\text{commitActivity}(\text{activityId}, \text{participantCount}, \text{commitmentHash})$$
- 8: Wait for the transaction to be mined and obtain the transaction receipt
- 9: Extract transactionHash from the receipt
- 10: Store {activityId, batchId, commitmentHash, participantCount, transactionHash} in the off-chain database for audit and later verification
- 11: Return commitmentHash, transactionHash

เมื่อระบบส่งธุรกรรมไปยังเครือข่ายบล็อกเชนและธุรกรรมได้รับการยืนยัน ระบบจะได้รับ Transaction Hash จาก transaction receipt ซึ่งใช้เป็นตัวอ้างอิงธุรกรรมสำหรับการติดตามย้อนหลังผ่าน EVM-based blockchain explorer เช่น Etherscan หรือ Polygonscan อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบความถูกต้องของชุดข้อมูลกิจกรรม ไม่ได้อาศัยค่า Transaction Hash แต่ใช้การเปรียบเทียบ commitmentHash ที่บันทึกไว้ในสมาร์ตคอนแทรกต์กับค่าแฮชที่คำนวณซ้ำจากข้อมูล off-chain ในรูปแบบเดียวกัน

แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิด Minimal On-chain โดยระบบบันทึกเฉพาะค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลบนบล็อกเชน ขณะที่ข้อมูลรายละเอียดจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลแบบ off-chain จึงช่วยลดต้นทุนธุรกรรมและลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคล

นอกจากนี้ ระบบยังรองรับกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยดึงชุดข้อมูลกิจกรรมจากฐานข้อมูล off-chain มา serialize แบบ canonical และคำนวณค่าแฮชใหม่ด้วย Keccak-256 จากนั้นจึงค่า commitmentHash จากสมาร์ตคอนแทรกต์มาเปรียบเทียบ หากค่าแฮชทั้งสองตรงกันแสดงว่าชุดข้อมูลดังกล่าวยังคงถูกต้องและสอดคล้องกับหลักฐานบนบล็อกเชน รายละเอียดของกระบวนการดังกล่าวแสดงใน Algorithm 2

Algorithm 2: Data Integrity Verification**Input:** activityId, batchId**Output:** verificationResult

- 1: Retrieve dataset for (activityId, batchId) from the off-chain database
- 2: serializedDataset $\leftarrow$ serialize(dataset) in canonical format
- 3: recomputedHash $\leftarrow$ keccak256(serializedDataset)
- 4: storedHash $\leftarrow$ retrieve commitmentHash for (activityId, batchId) from blockchain
- 5: if recomputedHash == storedHash then
- 6: verificationResult $\leftarrow$ valid
- 7: else
- 8: verificationResult $\leftarrow$ invalid
- 9: return verificationResult

ด้วยกลไกดังกล่าว ระบบจึงสามารถตรวจสอบย้อนหลังข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมผ่านบล็อกเชนได้ โดยไม่ต้องจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดบนเชน ซึ่งช่วยสร้างสมดุลระหว่างความโปร่งใส การตรวจสอบย้อนหลัง และต้นทุนของระบบ

4. การสาธิตการใช้งาน

ภายหลังจากผ่านการทดสอบในระยะพัฒนาแล้ว ระบบถูกนำไปปรับใช้บนเครือข่าย Polygon Mainnet ซึ่งเป็นเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะที่รองรับ Ethereum Virtual Machine (EVM) เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง ระบบเว็บแอปพลิเคชันเชื่อมต่อกับสมาร์ทคอนแทรคต์เพื่อรองรับการสร้างกิจกรรม การบันทึกข้อมูลการเข้าร่วม และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยระบบจะบันทึกค่า cryptographic commitment (hash ของชุดข้อมูลกิจกรรม) ลงบนบล็อกเชน ขณะที่แต่ละธุรกรรมจะมี Transaction Hash ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจสอบและติดตามธุรกรรมบนเครือข่ายบล็อกเชนได้ ผลการสาธิตแสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบ Minimal On-chain สามารถทำงานได้จริงบนเครือข่ายสาธารณะ โดยบันทึกเฉพาะค่าพิสูจน์ความถูกต้องและช่วยลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลโดยตรงบนบล็อกเชน

5. การประเมินผล

การประเมินผลมุ่งเน้น 3 มิติ ได้แก่ (1) ต้นทุนธุรกรรมต่อการบันทึกข้อมูลหนึ่งครั้ง (2) ความหน่วงเวลาของการยืนยันธุรกรรม (3) อัตราการประมวลผลภายใต้จำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรมที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ได้ตรวจสอบข้อมูลบนบล็อกเชนเพื่อยืนยันว่าไม่มีข้อมูลส่วนบุคคลถูกเปิดเผยโดยตรง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

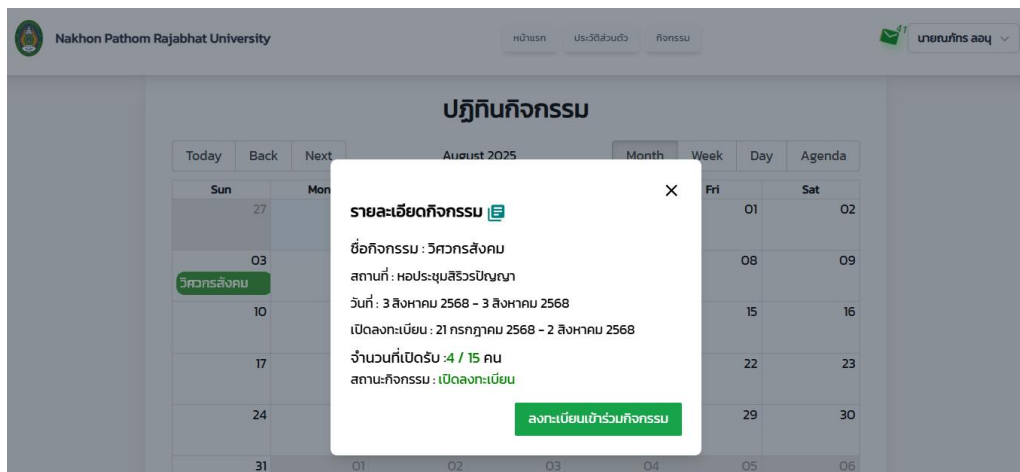
6. การสื่อสารองค์ความรู้

ผลการออกแบบและประเมินถูกนำเสนอในรูปแบบบทความวิชาการ เพื่อเสนอแนวทางเชิงสถาปัตยกรรมสำหรับการประยุกต์ใช้บล็อกเชนในบริบทการจัดการกิจกรรมนักศึกษา

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

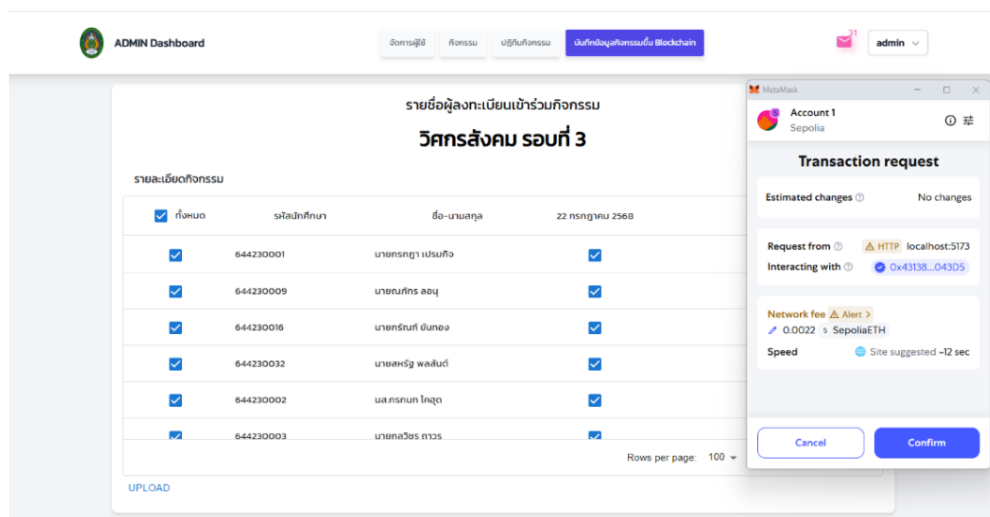
1. ผลการสาธิตการใช้งานระบบต้นแบบ

เพื่อแสดงให้เห็นการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น งานวิจัยได้พัฒนาระบบต้นแบบในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการจัดการกิจกรรมนักศึกษาและการบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมบนบล็อกเชน ระบบถูกออกแบบให้ผู้ใช้สามารถลงทะเบียนเข้าร่วมกิจกรรมผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้ของระบบ ขณะที่ผู้ดูแลระบบสามารถตรวจสอบและบันทึกข้อมูลกิจกรรมลงบนบล็อกเชนผ่านสมาร์ตคอนแทรกต์



รูปที่ 5 การลงทะเบียนเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษาในระบบเว็บแอปพลิเคชัน

จากรูปที่ 5 แสดงหน้าจอการลงทะเบียนเข้าร่วมกิจกรรมของนักศึกษา ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกกิจกรรมจากปฏิทินกิจกรรมและทำการลงทะเบียนผ่านระบบ โดยข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลของระบบเพื่อใช้ในการสร้างค่าแฮชของข้อมูลกิจกรรม



รูปที่ 6 การยืนยันและบันทึกข้อมูลกิจกรรมลงบนบล็อกเชนโดยผู้ดูแลระบบ

จากรูปที่ 6 แสดงขั้นตอนการยืนยันและบันทึกข้อมูลกิจกรรมโดยผู้ดูแลระบบ ซึ่งระบบจะรวบรวมข้อมูลผู้เข้าร่วมกิจกรรม สร้างค่า cryptographic commitment ของชุดข้อมูล และส่งธุรกรรมไปยังสมาร์ตคอนแทรกต์ผ่านส่วน backend ของระบบเพื่อบันทึกค่า commitment ลงบนบล็อกเชน

การทดลองใช้งานระบบต้นแบบแสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบผสมที่นำเสนอสามารถทำงานร่วมกันระหว่างฐานข้อมูลแบบดั้งเดิมและบล็อกเชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบผ่านเว็บแอปพลิเคชันตามปกติ ขณะที่กระบวนการบันทึกข้อมูลบนบล็อกเชนจะถูกดำเนินการในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบและรับรองข้อมูลกิจกรรม

2. ผลการวิเคราะห์ต้นทุนธุรกรรม

เพื่อประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบที่นำเสนอ งานวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนธุรกรรมของสมาร์ตคอนแทรกต์ภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานบนเครือข่าย Polygon Mainnet ซึ่งเป็นเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะที่รองรับ EVM และถูกออกแบบมาเพื่อลดค่าธรรมเนียมธุรกรรมและเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลเมื่อเทียบกับเครือข่าย Ethereum หลัก โดยพิจารณาค่าแก๊สที่ใช้ในการดำเนินธุรกรรมหลักของระบบ ได้แก่ การ deploy สมาร์ตคอนแทรกต์ และการเรียกใช้ฟังก์ชัน commitActivity สำหรับบันทึกข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมลงบนบล็อกเชน ผลการวิเคราะห์ต้นทุนธุรกรรมแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณแก๊สที่ใช้ ค่าธรรมเนียมธุรกรรมในหน่วย POL (Polygon native token) ซึ่งใช้เป็นค่าธรรมเนียมในการทำธุรกรรมบนเครือข่าย Polygon และต้นทุนที่คำนวณเป็นสกุลเงินดอลลาร์สหรัฐและเงินบาท

ตารางที่ 3 ค่าธรรมเนียมในการดำเนินธุรกรรมของสมาร์ตคอนแทรกต์กรณีใช้งานบนเครือข่าย Polygon Mainnet

รายการดำเนินการ	ปริมาณ Gas ที่ใช้เฉลี่ย (Units)	ค่าธรรมเนียมธุรกรรม (POL)	ต้นทุนรวม (USD)	ต้นทุนรวม (THB)
contract deployment	666,133	0.249097865	0.0265	≈ 0.82
commitActivity function	119,939.8	0.019364941	0.0020	≈ 0.06

หมายเหตุ: 1) ต้นทุนรวม (THB) คัดจากราคา Polygon (1 POL = 0.1065 USD) และ USD (1 USD = 31 THB) ณ วันที่ 1 มีนาคม 2569

2) contract deployment รายงานค่าจากการติดตั้งจริง 1 ครั้ง ขณะที่ commitActivity รายงานค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 5 รอบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า การ deploy สมาร์ตคอนแทรกต์มีต้นทุนประมาณ 0.0265 USD (ประมาณ 0.82 บาท) ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในขั้นตอนการติดตั้งระบบ ขณะที่การเรียกใช้ฟังก์ชัน commitActivity ซึ่งเป็นธุรกรรมหลักของระบบ มีต้นทุนเฉลี่ยเพียง 0.002 USD ต่อธุรกรรม (ประมาณ 0.06 บาท) เท่านั้น

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการใช้เครือข่าย Polygon Mainnet สามารถลดต้นทุนในการดำเนินธุรกรรมบนบล็อกเชนได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่าย Ethereum Mainnet ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าธรรมเนียมธุรกรรมสูงกว่า นอกจากนี้ การออกแบบระบบภายใต้แนวคิด Minimal On-chain ซึ่งบันทึกเฉพาะค่าแฮชของข้อมูลกิจกรรมบนบล็อกเชน ยังช่วยลดปริมาณข้อมูลที่ต้องจัดเก็บบนเครือข่าย ทำให้ต้นทุนธุรกรรมต่อกิจกรรมอยู่ในระดับต่ำ

3. ผลการประเมินสมรรถนะของธุรกรรมบนบล็อกเชน

นอกจากการวิเคราะห์ต้นทุนธุรกรรมแล้ว งานวิจัยยังได้ประเมินสมรรถนะของระบบภายใต้สถาปัตยกรรมแบบผสมโดยใช้ตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ ปริมาณการใช้แก๊สของธุรกรรม (gas used) ค่าธรรมเนียมธุรกรรม (transaction fee) ความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรม (transaction latency) อัตราการประมวลผลธุรกรรม (throughput) และอัตราความล้มเหลวของธุรกรรม (failure rate)

การทดลองดำเนินการบนเครือข่ายบล็อกเชน Polygon ซึ่งรองรับ EVM โดยใช้สมาร์ตคอนแทรกต์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อบันทึกค่า commitment ของข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรม การทดลองกำหนดสถานการณ์จำลองตามจำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม ได้แก่ 50 100 200 500 และ 1,000 คน โดยในแต่ละสถานการณ์มีการดำเนินธุรกรรมหลายรอบเพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ ผลการทดลองสรุปดังแสดงใน ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินสมรรถนะของธุรกรรมบนบล็อกเชน

Participants	Gas Used	Avg Fee (POL)	Avg Fee (USD)	Latency (ms)	Throughput (TPS)	Failure Rate
50	119,935	0.01936	0.00207	5,755	0.146	0%
100	119,935	0.01980	0.00212	5,738	0.147	0%
200	119,935	0.01940	0.00208	4,384	0.186	0%
500	119,947	0.01690	0.00181	4,406	0.185	0%
1,000	119,947	0.01654	0.00177	7,098	0.123	0%

ผลการทดลองโดยรวมแสดงให้เห็นว่าแนวทางสถาปัตยกรรมแบบผสม ภายใต้แนวคิด Minimal On-chain สามารถลดต้นทุนธุรกรรมบนบล็อกเชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันยังคงรักษาความสามารถในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลผ่านกลไก cryptographic commitment ซึ่งช่วยสร้างสมดุลระหว่างความโปร่งใส ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง และข้อจำกัดด้านทรัพยากรของเครือข่ายบล็อกเชน โดยมีผลการสรุปในแต่ละด้าน ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณการใช้แก๊สของธุรกรรม

จากผลการทดลองพบว่าค่าการใช้แก๊สอยู่ในช่วงประมาณ 119,900 - 119,950 ยูนิต์ต่อธุรกรรม ซึ่งแทบไม่เปลี่ยนแปลงแม้จำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรมจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุสำคัญเกิดจากแนวคิด Minimal On-chain ที่ระบบบันทึกเฉพาะค่าแฮชของชุดข้อมูลลงบนบล็อกเชน แทนที่จะบันทึกข้อมูลผู้เข้าร่วมทั้งหมดบนเครือข่าย

3.2 การวิเคราะห์ค่าธรรมเนียมธุรกรรม

ในด้านค่าธรรมเนียมธุรกรรม พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำมาก โดยมีค่าเพียงประมาณ 0.0017 - 0.0021 USD ต่อธุรกรรม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ต้นทุนในตารางที่ 3 และสะท้อนให้เห็นว่าการใช้สถาปัตยกรรมแบบผสมสามารถลดต้นทุนในการดำเนินธุรกรรมบนบล็อกเชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3 การวิเคราะห์ความหน่วงเวลา

สำหรับความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรม พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 7 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะ และยังถือว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับระบบสารสนเทศศึกษา ซึ่งไม่ต้องการการประมวลผลแบบเรียลไทม์

3.4 อัตราการประมวลผลธุรกรรมและอัตราความล้มเหลวของธุรกรรม

ในด้านอัตราการประมวลผลธุรกรรม พบว่าระบบสามารถประมวลผลธุรกรรมได้ประมาณ 0.12 - 0.19 ธุรกรรมต่อวินาที (TPS) ภายใต้สภาพการทดลองที่มีการส่งธุรกรรมแบบต่อเนื่องและรอการยืนยันก่อนส่งธุรกรรมถัดไป ซึ่งสะท้อนถึงข้อจำกัดของเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากระบบนี้บันทึกเพียงค่า commitment ของข้อมูลกิจกรรมเท่านั้น จึงไม่จำเป็นต้องดำเนินธุรกรรมจำนวนมากต่อวินาทีเหมือนระบบธุรกรรมทางการเงิน

ในด้านความเสถียรของระบบ พบว่ามีอัตราความล้มเหลวของธุรกรรมเท่ากับ 0% ในทุกสถานการณ์ทดลอง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเรียกใช้สมาร์ตคอนแทรกต์และการบันทึกข้อมูลบนบล็อกเชนสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาพแวดล้อมของการทดลอง โดยการทดลองได้ดำเนินการส่งธุรกรรมหลายรอบในแต่ละสถานการณ์เพื่อยืนยันความเสถียรของระบบ ซึ่งไม่พบธุรกรรมที่ล้มเหลวระหว่างการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการขยายระบบ

จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มจำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรมจาก 50 คนเป็น 1,000 คน ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนธุรกรรมบนบล็อกเชน เนื่องจากระบบบันทึกเฉพาะค่าแฮชของข้อมูลการเข้าร่วมกิจกรรมเท่านั้น ขณะที่ข้อมูลรายละเอียดถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลแบบ off-chain

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของแนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสม ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถรองรับข้อมูลจำนวนมากได้โดยไม่เพิ่มภาระการจัดเก็บบนบล็อกเชน และช่วยลดข้อจำกัดด้านความสามารถในการขยายระบบที่มักเกิดขึ้นในระบบที่จัดเก็บข้อมูลทั้งหมดบนเครือข่ายบล็อกเชน

3.6 การเปรียบเทียบแนวทางการจัดเก็บข้อมูล

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแนวทางที่เสนอดังตารางที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างการจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดบนฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ร่วมกับ audit log บล็อกเชนสาธารณะ และแนวทางสถาปัตยกรรมแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พบว่า ระบบฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ร่วมกับ audit log แม้จะมีต้นทุนต่ำและสามารถรองรับข้อมูลจำนวนมากได้ดี แต่ยังคงพึ่งพาความน่าเชื่อถือของผู้ดูแลระบบเป็นหลัก และมีความเสี่ยงต่อการแก้ไขข้อมูลย้อนหลัง ในขณะที่แนวทางบล็อกเชนสาธารณะ สามารถสร้างความโปร่งใสและความไม่สามารถแก้ไขข้อมูลย้อนหลังได้อย่างชัดเจน แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนธุรกรรมและความสามารถในการขยายระบบ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบแนวทางการจัดเก็บข้อมูล

คุณลักษณะของระบบ	ฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ร่วมกับ audit log	บล็อกเชนสาธารณะ	สถาปัตยกรรมแบบผสม (งานวิจัยนี้)
รูปแบบการจัดเก็บข้อมูล	เก็บข้อมูลทั้งหมดในฐานข้อมูลส่วนกลาง	เก็บข้อมูลทั้งหมดบนบล็อกเชน	เก็บข้อมูลหลักในฐานข้อมูลและบันทึกค่าแฮชบนบล็อกเชน
กลไกตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล	audit log	smart contract และ blockchain consensus	cryptographic commitment บนบล็อกเชน
ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง	ตรวจสอบได้ผ่าน log	ตรวจสอบได้ผ่านธุรกรรมบนบล็อกเชน	ตรวจสอบได้ผ่านค่าแฮชบนบล็อกเชน
ต้นทุนธุรกรรม	ต่ำ	สูง	ต่ำ
ความโปร่งใสของข้อมูล	จำกัด (ขึ้นกับผู้ดูแลระบบ)	สูง	สูง
ความสามารถในการรองรับข้อมูลจำนวนมาก	สูง	จำกัด	สูง
ความไม่สามารถแก้ไขข้อมูลย้อนหลัง	ต่ำ (แก้ไขฐานข้อมูลได้)	สูง	สูง (ข้อมูลพิสูจน์ความถูกต้อง)

หมายเหตุ: สังเคราะห์จากวรรณกรรมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวทางแบบสถาปัตยกรรมแบบผสมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงมุ่งสร้างสมดุลระหว่างข้อดีของทั้งสองแนวทาง โดยใช้ฐานข้อมูลแบบดั้งเดิมในการจัดเก็บข้อมูลหลัก และใช้บล็อกเชนเป็นกลไกในการบันทึกค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลผ่านค่าแฮช ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลังโดยไม่เพิ่มภาระต้นทุนธุรกรรมบนเครือข่ายบล็อกเชน

อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีบล็อกเชนไม่ได้เป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับทุกบริบท หากองค์กรมีระดับความเชื่อถือภายในสูง และไม่มีความเสี่ยงต่อการแก้ไขข้อมูลย้อนหลัง ระบบฐานข้อมูลแบบดั้งเดิมก็อาจเพียงพอสำหรับการจัดการข้อมูล ดังนั้น การนำบล็อกเชนมาใช้งานจึงควรพิจารณาในกรณีที่มีความต้องการด้านความไม่สามารถแก้ไขข้อมูลย้อนหลัง และการตรวจสอบข้อมูลแบบกระจายศูนย์อย่างแท้จริง เพื่อให้การใช้เทคโนโลยีสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และความจำเป็นของระบบ

4. การอภิปรายผลตามคำถามวิจัย

ผลการทดลองและการพัฒนาระบบสามารถตอบคำถามวิจัยของงานนี้ได้ดังต่อไปนี้

สำหรับ RQ1 ผลการออกแบบและพัฒนาระบบแสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบผสมภายใต้แนวคิด Minimal On-chain สามารถสร้างกลไกตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลกิจกรรมได้ผ่านแนวคิด cryptographic commitment โดยระบบจะคำนวณค่าแฮชของชุดข้อมูลกิจกรรมและบันทึกค่าดังกล่าวลงบนบล็อกเชนผ่านสมาร์ทคอนแทรคต์ ทำให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลย้อนหลังได้โดยการคำนวณค่าแฮชใหม่และเปรียบเทียบกับค่าที่ถูกบันทึกไว้บนบล็อกเชน

สำหรับ RQ2 ผลการประเมินสมรรถนะของระบบแสดงให้เห็นว่าการใช้แนวคิด Minimal On-chain ช่วยควบคุมต้นทุนธุรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าการใช้แก๊สอยู่ในช่วงประมาณ 119,900 - 119,950 ยูนิต์ต่อธุรกรรม และค่าธรรมเนียมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.002 USD ต่อธุรกรรม ขณะที่ความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 7 วินาที และอัตราการประมวลผลธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 0.12 - 0.19 TPS

สำหรับ RQ3 แนวทาง cryptographic commitment ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ช่วยลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลบนเครือข่ายบล็อกเชน เนื่องจากระบบบันทึกเฉพาะค่าแฮชของชุดข้อมูลกิจกรรมเท่านั้น ช่วยลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลของนักศึกษาบนเครือข่ายสาธารณะ ขณะที่ข้อมูลรายละเอียดของนักศึกษาถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลแบบ off-chain ภายใต้การควบคุมของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลและหลักการกำกับดูแลข้อมูลในบริบทของสถาบันอุดมศึกษา

5. ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจากการทดลองดำเนินการในสภาพแวดล้อมต้นแบบและใช้สถานการณ์จำลองของการบันทึกกิจกรรมเท่านั้น ดังนั้นผลการประเมินสมรรถนะอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงในระดับสถาบันหรือในระบบที่มีภาระงานสูง นอกจากนี้ การประเมินผลยังมุ่งเน้นเฉพาะสมรรถนะของธุรกรรมบนบล็อกเชน โดยยังไม่ได้พิจารณาปัจจัยอื่น เช่น การจัดการตัวตนดิจิทัลของผู้ใช้งาน หรือการบูรณาการกับระบบสารสนเทศของมหาวิทยาลัย หรือการประเมินในมิติของผู้ใช้งานจริง

อีกทั้งสมรรถนะของธุรกรรมบนเครือข่ายบล็อกเชนสาธารณะอาจได้รับผลกระทบจากสภาพของเครือข่าย เช่น ความหนาแน่นของธุรกรรมในช่วงเวลาใช้งาน และความผันผวนของค่าธรรมเนียมธุรกรรม ซึ่งอาจทำให้ค่าความหน่วงเวลาและต้นทุนธุรกรรมแตกต่างจากผลการทดลองในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้

6. แนวทางการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรขยายผลโดยการนำระบบไปทดลองใช้จริงในระดับสถาบันและบูรณาการกับระบบบริหารจัดการตัวตนดิจิทัลของนักศึกษาเพื่อสนับสนุนการยืนยันตัวตนและการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูล นอกจากนี้อาจพิจารณาใช้ permissioned/consortium blockchain เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการกำกับดูแลข้อมูล พร้อมทั้งดำเนินการ Data Protection Impact Assessment (DPIA) เพื่อประเมินความเสี่ยงด้านความเป็นส่วนตัวและให้สอดคล้องกับกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล รวมทั้งควรขยายการประเมินจากสมรรถนะเชิงเทคนิคไปสู่การประเมินเชิงผู้ใช้ โดยครอบคลุมความง่ายในการใช้งาน ความไว้วางใจต่อข้อมูล ภาระงานของผู้ปฏิบัติงาน และความเท่าเทียมในการเข้าถึง เพื่อสะท้อนความเป็นไปได้ในการนำระบบไปใช้จริงอย่างรอบด้าน

นอกจากนี้ยังสามารถต่อยอดงานวิจัยในอนาคตโดยทำให้นัยเชิงการศึกษาของระบบชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยการอธิบายเส้นทางผลกระทบ (impact pathway) ว่าการบันทึกกิจกรรมที่ตรวจสอบได้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลกิจกรรม และทำให้ข้อมูลดังกล่าวนำไปใช้สนับสนุนกระบวนการเรียนรู้ภายใต้กรอบการประเมินเพื่อพัฒนา (formative assessment) ซึ่งให้ความสำคัญกับข้อมูลย้อนกลับที่ช่วยให้ผู้เรียนพัฒนาได้จริง ตัวอย่างเช่น การพัฒนาแดชบอร์ดติดตามพัฒนาการมีส่วนร่วมของนักศึกษา และการใช้ข้อมูลกิจกรรมที่ตรวจสอบได้เป็นหลักฐานประกอบการตัดสินใจทางการศึกษา

เช่น การให้คำปรึกษา การกำหนดกิจกรรมเสริม หรือการรับรองสมรรถนะ โดยมุ่งให้ระบบมีบทบาทมากกว่างานธุรการและสนับสนุนการเรียนรู้ของผู้เรียนอย่างเป็นระบบและเท่าเทียม

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบบันทึกกิจกรรมนักศึกษาโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชน เพื่อเพิ่มความโปร่งใส ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง และความน่าเชื่อถือของข้อมูลกิจกรรมของนักศึกษา ภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบผสม ซึ่งแยกการจัดเก็บข้อมูลออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การจัดเก็บข้อมูลรายละเอียดในฐานข้อมูลแบบ off-chain และการบันทึกค่าพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลบนเครือข่ายบล็อกเชนผ่านสมาร์ตคอนแทรกต์

ระบบต้นแบบถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันร่วมกับสมาร์ตคอนแทรกต์ที่ทำงานบนเครือข่ายบล็อกเชนที่รองรับ Ethereum Virtual Machine โดยใช้แนวคิด Minimal On-chain เพื่อบันทึกเฉพาะค่าแฮชของข้อมูลกิจกรรมลงบนบล็อกเชน แทนการจัดเก็บข้อมูลทั้งหมดบนเครือข่าย ซึ่งช่วยลดต้นทุนธุรกรรมและปริมาณข้อมูลบนเชน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการ deploy สมาร์ตคอนแทรกต์มีต้นทุนประมาณ 0.0265 USD ขณะที่การบันทึกข้อมูลกิจกรรมมีต้นทุนเฉลี่ยประมาณ 0.002 USD ต่อธุรกรรม นอกจากนี้ค่าการใช้แก๊สของธุรกรรมมีค่าเฉลี่ยประมาณ 119,900 - 119,950 ยูนิต์ และแทบไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรม ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบแบบ Minimal On-chain สามารถควบคุมต้นทุนธุรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านสมรรถนะของระบบ พบว่าความหน่วงเวลาในการยืนยันธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 4 - 7 วินาที และอัตราการใช้ประมวลผลธุรกรรมอยู่ในช่วงประมาณ 0.12 - 0.19 ธุรกรรมต่อวินาที โดยมีอัตราความล้มเหลวของธุรกรรมเท่ากับ 0% ในทุกสถานการณ์ทดลอง ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียรภายใต้การทดลองที่มีจำนวนผู้เข้าร่วมกิจกรรมแตกต่างกัน

โดยสรุป แนวทางสถาปัตยกรรมแบบผสมที่นำเสนอสามารถสร้างสมดุลระหว่างความโปร่งใส ความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง และต้นทุนการดำเนินงานของระบบได้อย่างเหมาะสม ทั้งยังช่วยลดการเปิดเผยข้อมูลส่วนบุคคลบนบล็อกเชนสาธารณะ แนวทางนี้จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบสารสนเทศด้านการศึกษาที่ต้องการความน่าเชื่อถือของข้อมูลและการตรวจสอบย้อนหลังในระดับองค์กร

เอกสารอ้างอิง

- จักรกริช คำสม, ธรัช อารี ราชภูร์ และอภิชาติ เหล็กดี. (2567). การพัฒนารูปแบบการบริหารจัดการสารสนเทศตามพระราชบัญญัติการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏ. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม 11(1): 42 - 55.
- ธนพล แยมทุ่ง และอรอุมา พริ้มโต. (2568). การออกแบบและพัฒนาระบบสารสนเทศกิจกรรมนักศึกษาผ่านเว็บแอปพลิเคชัน กรณีศึกษา สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. วารสารก้าวหน้าโลกวิทยาศาสตร์ 25(1): 63 - 84.
- Agbo, C.C., Mahmoud, Q.H. and Eklund, J.M. (2019). Blockchain technology in healthcare: A systematic review. Healthcare 7(2): 56. doi: 10.3390/healthcare7020056.
- Amnuaysin, O., Areepong, T. and Issaro, S. (2022). Application of Blockchain Technology in Higher education. International Journal of Educational Communications and Technology 2(1): 18 - 27.
- Casino, F., Dasaklis, T.K. and Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications. Telematics and Informatics 36: 55 - 81. doi: 10.1016/j.tele.2018.11.006.

- Chen, N.P., Shen, K.Y. and Liang, C.J. (2021). Hybrid decision model for evaluating blockchain business strategy: A bank's perspective. *Sustainability* 13(11): 5809. doi: 10.3390/su13115809.
- Islam, S. and Apu, K.U. (2024). Decentralized vs. Centralized Database Solutions in Blockchain: Advantages, Challenges, and Use Cases. *Global Mainstream Journal of Innovation. Engineering & Emerging Technology* 3(04): 58 - 68. doi: 10.62304/jjeet.v3i04.195.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Bitcoin.org. Source: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Retrieved date 29 September 2025.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A. and Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems* 24(3): 45 - 77. doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- Rafidhi, A.A. and Hayati, E.N. (2023). Leveraging Blockchain for Academic Credentialing and Student Data Management in Universities. *International Journal of Research and Applied Technology* 3(2): 429 - 436.
- Regueiro, C., Seco, I., Gutiérrez-Agüero, I., Urquizu, B. and Mansell, J. (2021). A blockchain-based audit trail mechanism: Design and implementation. *Algorithms* 14(12): 341. doi: 10.3390/a14120341.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J. and Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research* 57(7): 2117 - 2135. doi: 10.1080/00207543.2018.1533261.
- Shaker, M., Aliee, F.S. and Fotuhi, R. (2021). Online rating system development using blockchain-based distributed ledger technology. *Wireless Networks* 27: 1715 - 1737.
- Singh, M. and Srivastava, S. (2025). Immutable transparency: Leveraging blockchain transparency features to foster trust in decentralized systems. In *Digital strategy and governance in transformative technologies*. Boca Raton, FL: CRC Press. pp. 197 - 215
- Tran, V.D., Ata, S., Tran, T.H., Lam, D.K. and Pham, H.L. (2023). Blockchain-Powered Education: A Sustainable Approach for Secured and Connected University Systems. *Sustainability* 15(21): 15545. doi: 10.3390/su152115545.
- Vu, V.H. (2022). A blockchain-based model to support student activities management. *World Journal of Advanced Research and Reviews* 14(2): 515 - 524. doi: 10.30574/wjarr.2022.14.2.0460.
- Xu, X., Weber, I. and Staples, M. (2019). *Architecture for blockchain applications*. Cham, Switzerland: Springer. pp. 81 - 212.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X. and Wang, H. (2017). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress) 557 - 564. doi: 10.1109/BigDataCongress.2017.85

