การซื้อขายพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Peer-to-Peer ผ่าน Smart Contract บน Solana Consortium Blockchain

จันทร์ธวัฒ กิริยาดี [1]
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ (Computer Engineering and Artificial Intelligence)
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย (University of the Thai Chamber of Commerce)
กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
2410717302003@live4.utcc.ac.th

บทคัดย่อ (Abstract) — การเติบโตของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา นำมาซึ่งพลังงานส่วนเกินที่เหลือจากการใช้ และยังไม่สามารถซื้อขายไฟฟ้าแบบ Peer-to-Peer (P2P) ได้โดยตรง เนื่องจากข้อจำกัดด้านโครงข่าย DSO และการขาดกลไกราคาที่เหมาะสม บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบซื้อขายพลังงาน P2P ภายใต้เทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain) โดยใช้กลไกตลาดประมูลสองทางแบบต่อเนื่อง (Continuous Double Auction: CDA) ขับเคลื่อนผ่าน Smart Contract บนเครือข่าย Consortium Blockchain พร้อมทั้งใช้ฉันทามติแบบ Proof-of-Authority (PoA) เพื่อตอบโจทย์ด้านการกำกับดูแล (Governance) และความรวดเร็วในการยืนยันธุรกรรม เพื่อรองรับการขยายตัวของผู้ใช้งาน ระบบถูกพัฒนาขึ้นบนสถาปัตยกรรม Microservices โดยมี NATS JetStream บริหารจัดการลำดับข้อมูลในสภาวะที่มีปริมาณการใช้งานหนาแน่น จุดเด่นของงานนี้คือการออกแบบระบบแบบลดการพึ่งพากัน (Decoupling) โดยแยกกระบวนการตรวจสอบข้อมูลนอกเชน (Off-chain) ผ่าน Aggregator Bridge ที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทมิเตอร์ ออกจาก Settlement Layer บนบล็อกเชน ส่งผลให้ Smart Contract บันทึกเฉพาะธุรกรรมที่ผ่านการยืนยันแล้วเท่านั้น ผลการจำลองเพื่อประเมินเส้นทางรับข้อมูลมาตรวัดด้วยสมาร์ทมิเตอร์จำนวน 80 เครื่อง ที่บีบอัดเวลาประมาณ 60 เท่าเมื่อเทียบกับรอบการส่งข้อมูลของมาตรวัดจริง (60x Compressed Real-time) พบว่า Aggregator Bridge รับและตรวจสอบลายเซ็นค่าอ่านได้อย่างต่อเนื่องที่อัตราเชิงออกแบบ 5.33 รายการต่อวินาที (readings/s) โดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าสถาปัตยกรรมแบบแยกชั้นสามารถรองรับภาระการรับข้อมูลของมาตรวัดได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของเส้นทาง settlement บนบล็อกเชนเป็นงานในลำดับถัดไป ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการต่อยอดสู่อุตสาหกรรมพลังงานในอนาคต

คำสำคัญ (Index Terms) — Consortium Blockchain, Peer-to-Peer, Continuous Double Auction, Proof-of-Authority, Microservices

I. INTRODUCTION

การขยายตัวของพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy: RE) ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมากเปลี่ยนบทบาทจากผู้บริโภคเพียงอย่างเดียวไปสู่การเป็นผู้ผลิตและผู้บริโภคพลังงานในเวลาเดียวกัน (Prosumer) การเปลี่ยนแปลงนี้สร้างความท้าทายต่อโครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ซึ่งออกแบบมาสำหรับการจ่ายไฟจากศูนย์กลางไปยังผู้ใช้ปลายทางเป็นหลัก งานวิจัยด้านตลาดพลังงานแบบ Peer-to-Peer จึงให้ความสำคัญกับกลไกซื้อขายที่รักษาทั้งข้อจำกัดของโครงข่ายและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า [1], [2], [3]

การเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบ Smart Grid บริบทประเทศไทยตามแผนแม่บทการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าประเทศไทย มีการใช้โครงสร้างพื้นฐานมาตรวัดขั้นสูง (Advanced Metering Infrastructure: AMI) ทำให้ข้อมูลการผลิตและการใช้พลังงานมีความละเอียดมากขึ้น การบูรณาการทรัพยากรพลังงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed Energy Resources: DER) เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า (EV) และระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) ต้องคำนึงถึงข้อกำหนดด้านการเชื่อมต่อ DER, Microgrid controller, Islanding และข้อจำกัดของโครงข่ายแรงดันต่ำ [4], [5], [6]

บทความนี้มีส่วนสนับสนุนหลักสามประการ ประการแรก การออกแบบสถาปัตยกรรมแบบลดการพึ่งพากัน (decoupled) ที่แยกการตรวจสอบข้อมูลนอกเชนผ่าน Aggregator Bridge ได้แก่ การตรวจลายเซ็น Ed25519 ของข้อมูลมาตรวัดตามมาตรฐาน DLMS/COSEM และการประเมินเงื่อนไข Grid stability ร่วมกับการจับคู่คำสั่งด้วย Continuous Double Auction (CDA) ออกจากการชำระธุรกรรมบนเชน (on-chain settlement) อย่างชัดเจน ประการที่สอง การออกแบบขอบเขตความเชื่อถือ (trust boundary) ของการชำระธุรกรรมบนเครือข่าย Anchor/Solana-compatible แบบ Proof-of-Authority (PoA) consortium โดยบล็อกเชนตรวจสอบลายเซ็น Ed25519 ของทั้งผู้ซื้อและผู้ขาย การกันส่งซ้ำผ่าน order nullifier และสถานะ escrow ขณะที่เงื่อนไขปริมาณพลังงานและ oracle attestation ถูกบังคับใช้ในชั้น off-chain ทำให้บล็อกเชนทำหน้าที่เป็นชั้น settlement และ audit พร้อมระบุเงื่อนไขความถูกต้อง (invariants) ของระบบไว้อย่างชัดเจน (ดู Section III) และประการที่สาม การพัฒนาชุดจำลอง AMI ที่อาศัยแบบจำลองโครงข่ายด้วย pandapower และ smart-meter simulator เพื่อสร้างข้อมูลมาตรวัดแบบ deterministic พร้อมการวัดอัตราการรับข้อมูลของเส้นทาง telemetry ingest เบื้องต้น ทั้งนี้ขอบเขตของงานเป็นการออกแบบและประเมินเชิงสถาปัตยกรรมบนระบบจำลอง ไม่ใช่การวัดจากเครือข่ายไฟฟ้าภาคสนามหรือเครือข่าย Solana production

ในด้านกลไกเชิงเศรษฐศาสตร์ ระบบใช้โทเคนพลังงาน (energy token) ที่ออกจากการผลิตจริงและรับรองด้วย Renewable Energy Certificate (ERC/REC) ร่วมกับเหรียญ stablecoin ที่ตรึงค่ากับเงินบาท (THBG) สำหรับการตั้งราคาและชำระธุรกรรม และโทเคน GRX สำหรับการ stake และการกำกับดูแล (governance) โดยรายละเอียดของโปรแกรมที่เกี่ยวข้องอธิบายไว้ใน Section IV.D

บทความนี้จัดเรียงเนื้อหาดังนี้ Section II ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านบล็อกเชนและตลาดพลังงานแบบ Peer-to-Peer Section III อธิบายแบบจำลองการชำระธุรกรรมและเงื่อนไขความถูกต้อง (invariants) ของระบบ Section IV อธิบายสถาปัตยกรรมและการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบหลัก Section V สรุปการประเมินเชิงสถาปัตยกรรม และ Section VI อภิปรายผล ข้อจำกัด และแนวทางพัฒนาระบบในอนาคต

II. RELATED WORK

เทคโนโลยีบล็อกเชนถือกำเนิดจาก Bitcoin [7] ในฐานะระบบบัญชีแยกประเภทแบบกระจายศูนย์ที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง และขยายขีดความสามารถสู่การประมวลผล Smart Contract ด้วย Ethereum [8], [9] ภาพรวมของเทคโนโลยีและการจำแนกประเภทเครือข่ายแบบ permissionless และ permissioned ได้รับการสรุปไว้โดย NIST [10] ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงในการเลือกสถาปัตยกรรมเครือข่ายให้เหมาะกับข้อกำหนดด้านการกำกับดูแล

ในบริบทของตลาดพลังงานแบบ Peer-to-Peer มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษากลไกตลาดและการออกแบบการประมูล Mengelkamp และคณะ [11] เปรียบเทียบการออกแบบตลาดพลังงานท้องถิ่นและกลยุทธ์การเสนอราคา ขณะที่ Munsing และคณะ [12] เสนอการใช้บล็อกเชนเพื่อกระจายการหาค่าเหมาะที่สุด (decentralized optimization) ของทรัพยากรพลังงานในเครือข่ายไมโครกริด งานเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของบล็อกเชนในการรองรับการซื้อขายพลังงานโดยตรงระหว่างผู้ใช้ แต่ส่วนใหญ่ยังประเมินบนเครือข่ายสาธารณะที่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนธุรกรรมและความหน่วงในการยืนยันบล็อก

เพื่อตอบโจทย์ด้านการกำกับดูแลและความสามารถในการคาดการณ์ต้นทุน งานวิจัยจำนวนหนึ่งจึงหันมาใช้เครือข่ายแบบ Consortium หรือ permissioned Kang และคณะ [13] ใช้ consortium blockchain สำหรับการซื้อขายไฟฟ้าแบบ Peer-to-Peer ระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าแบบ plug-in และ Hyperledger Fabric [14] เป็นตัวอย่างของระบบปฏิบัติการแบบกระจายสำหรับเครือข่าย permissioned ที่กำหนดสิทธิ์ผู้เข้าร่วมได้ชัดเจน ในด้านฉันทามติ ปัญหา Byzantine Generals [15] และอัลกอริทึม Practical Byzantine Fault Tolerance [16] เป็นรากฐานเชิงทฤษฎีของการยืนยันธุรกรรมในเครือข่ายที่มีโหนดจำนวนจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของฉันทามติแบบ Proof-of-Authority ที่ใช้ในงานนี้

ต่างจากงานข้างต้น บทความนี้มุ่งเน้นการออกแบบและประเมินสถาปัตยกรรมของระบบจำลองที่แยกการตรวจสอบนอกเชน (off-chain verification) ผ่าน Aggregator Bridge ออกจากชั้น Settlement บนบล็อกเชนอย่างชัดเจน ขอบเขตของงานนี้จึงเป็นการออกแบบและประเมินสถาปัตยกรรม ไม่ใช่การรายงานผลวัดจากเครือข่ายไฟฟ้าภาคสนามหรือ Solana production network โดยข้อมูลพลังงานที่ใช้ในต้นแบบมาจาก AMI Simulator และผลที่บันทึกบนบล็อกเชนเป็น Settlement event ที่ผ่านการตรวจสอบจาก Backend/Aggregator Bridge แล้ว ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางเบื้องต้นในการทดสอบระบบควบคุมไมโครกริด [17] ตำแหน่งของงานนี้เทียบกับงานที่ใช้บล็อกเชนสำหรับตลาดพลังงานแบบ Peer-to-Peer สรุปไว้ใน ตารางที่ I โดยจุดต่างหลักคือการผสาน CDA แบบแบ่งโซนบนเครือข่าย consortium แบบ PoA เข้ากับการแยกชั้นตรวจสอบข้อมูลมาตรวัด (Ed25519/DLMS) นอกเชนออกจากชั้น settlement อย่างชัดเจน

Table I
Positioning of this work vs prior blockchain-based P2P energy-trading studies.

งาน	เครือข่าย	ฉันทามติ	กลไกตลาด	แยก off/on-chain
Mengelkamp [11]	Public (LEM)	Public	Local market / bidding	ไม่แยกชัดเจน
Munsing [12]	Public	Public	Decentralized optimization	ไม่แยกชัดเจน
Kang [13]	Consortium	Consortium	Iterative double auction	บางส่วน
Hyperledger Fabric [14]	Permissioned	Pluggable (Raft/ BFT)	แพลตฟอร์ม (ไม่เจาะตลาด)	—
งานนี้ (This work)	Consortium (Solana-compatible)	PoA (governance)	CDA price-time แบ่งโซน	แยกชัดเจน + Ed25519/DLMS telemetry

III. SETTLEMENT MODEL & INVARIANTS

A. Solana Architecture

ระบบนี้ออกแบบบนสถาปัตยกรรมของ Solana ซึ่งประมวลผล Smart Contract ผ่าน Solana Virtual Machine (SVM) [18] โดยใช้ Anchor Framework [19] เป็นชั้นกำหนดโครงสร้างของโปรแกรม ได้แก่ account validation, instruction handler และ Event log คุณสมบัติสำคัญที่นำมาใช้คือ Program Derived Address (PDA) สำหรับสร้างบัญชีที่ตรวจสอบ ownership ได้แบบ deterministic และ Sealevel parallel runtime สำหรับประมวลผลธุรกรรมที่ไม่ใช้ account เดียวกันแบบขนาน ทั้งนี้บทความนี้ไม่ใช่ผลวัดจากเครือข่าย Solana production แต่ใช้คุณสมบัติของ SVM และ PDA เป็นข้อกำหนดเชิงออกแบบสำหรับระบบจำลอง

B. Settlement Model

แบบจำลองการชำระธุรกรรมของระบบแบ่งความรับผิดชอบออกเป็นสองชั้นอย่างชัดเจน ชั้นนอกเชน (off-chain) ประกอบด้วย Aggregator Bridge ซึ่งตรวจสอบลายเซ็น Ed25519 ของข้อมูลมาตรวัด ตรวจรูปแบบข้อมูลตามมาตรฐาน DLMS/COSEM และประเมินเงื่อนไขปริมาณพลังงานคงเหลือ (available surplus) และ Grid stability ร่วมกับ Trading Service ที่จับคู่คำสั่งซื้อขายด้วยอัลกอริทึม Continuous Double Auction (CDA) ส่วนชั้นบนเชน (on-chain) คือ Anchor program [19] ที่รับเฉพาะคู่คำสั่งที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว และทำหน้าที่บันทึกการชำระธุรกรรมที่ตรวจสอบย้อนหลังได้ ก่อนบันทึก settlement โปรแกรมจะตรวจสอบ account ownership ลายเซ็น Ed25519 ของทั้งผู้ซื้อและผู้ขายบน order payload การกันส่งซ้ำผ่านบัญชี order nullifier และสถานะ escrow โดยเงื่อนไขปริมาณพลังงานและ oracle attestation ถูกบังคับใช้ในชั้น off-chain ก่อนการ submit มิได้ตรวจซ้ำบนเชน โครงสร้างบัญชีทั้งหมดใช้ Program Derived Address (PDA) เพื่อแยก state ของแต่ละธุรกรรมและตรวจสอบ ownership ได้แบบ deterministic รายละเอียดของโปรแกรมและบัญชี PDA อธิบายใน Section IV.D [20]

C. Invariants

จากแบบจำลองข้างต้น ระบบกำหนดเงื่อนไขความถูกต้อง (invariants) ที่ต้องคงไว้ดังนี้

- I1 (Replay-freedom): คู่คำสั่งที่จับคู่แล้วถูกชำระได้เพียงครั้งเดียว โดยบัญชี order nullifier บนเชนกันการส่งซ้ำของคำสั่งเดิม
- I2 (Settlement authorization): การชำระธุรกรรมต้องมีลายเซ็น Ed25519 ของทั้งผู้ซื้อและผู้ขายบน order payload จึงจะถูกบันทึก
- I3 (Surplus bound): ปริมาณพลังงานของคำสั่งขายต้องไม่เกินค่าพลังงานคงเหลือที่รับรอง (available surplus) ซึ่งบังคับใช้ในชั้น off-chain ก่อน submit
- I4 (Mint idempotency): การสร้าง energy token ผ่าน mint_generation ใช้คีย์ (meter_id, ช่วงเวลา settlement) จึงสร้างได้เพียงครั้งเดียวต่อหนึ่งหน้าต่างเวลา
- I5 (ERC double-claim freedom): การออก Renewable Energy Certificate (ERC) ถูกจำกัดด้วยปริมาณการผลิตที่ยังไม่ถูกอ้างสิทธิ์ (unclaimed generation) และตัดยอดผ่าน Cross-Program Invocation (CPI) ไปยังโปรแกรม registry
- I6 (Governance authorization): การเปลี่ยนแปลงนโยบายและการรับรอง ERC ต้องลงนามโดยผู้มีสิทธิ์หลัก (PoA authority) ส่วนการลงคะแนน DAO ป้องกันการลงคะแนนซ้ำด้วยบัญชี vote record ต่อคู่ (proposal, voter)

เงื่อนไขเหล่านี้สอดคล้องกับการบังคับใช้จริงในโปรแกรม trading, energy-token และ governance ที่อธิบายใน Section IV.D

D. Consensus

ระบบนี้ตั้งสมมติฐานเป็นเครือข่าย permissioned แบบ consortium โดยใช้แนวคิด Proof of Authority (PoA) [21] เป็นชั้น governance และการควบคุมสิทธิ์การเข้าร่วม กล่าวคือ Validator Node และผู้เข้าร่วมเป็นหน่วยงานที่ได้รับอนุญาตตามนโยบาย governance ทั้งนี้ PoA ในบริบทนี้ไม่ใช่การปรับเปลี่ยนกลไกฉันทามติระดับ Layer 1 ของเครือข่าย Solana-compatible ซึ่งยังคงอาศัย Proof of History (PoH) ร่วมกับ Tower BFT ในการยืนยันธุรกรรมและประกาศสิ้นสุดบล็อก แต่เป็นสมมติฐานเชิงสถาปัตยกรรมด้านการกำกับดูแลและสิทธิ์ของเครือข่ายสำหรับระบบจำลอง

E. *Backend Service*

Backend Service ทำหน้าที่เป็นชั้นกลางระหว่าง Smart Meter Simulator (ดูรายละเอียดการออกแบบใน Section IV.B), Aggregator Bridge และ Smart Contract โดยรับผิดชอบการรวบรวมข้อมูล การตรวจสอบความถูกต้อง การจัดคิวธุรกรรม และการส่งคำสั่งไปยังบล็อกเชนหลังจากข้อมูลผ่านเงื่อนไขด้าน Grid stability แล้วเท่านั้น การออกแบบใช้แนวคิด Micro Service เพื่อแยกภาระงานออกเป็นภาระงานย่อยๆ ทำให้สามารถขยายระบบเฉพาะส่วนที่มีปริมาณคำขอสูงและลดผลกระทบเมื่อบริการใดบริการหนึ่งเกิดความผิดพลาด แต่ละบริการพัฒนาด้วยภาษา Rust (Axum) บน Tokio async runtime และสื่อสารระหว่างกันผ่าน ConnectRPC บน mutually authenticated TLS (mTLS) โดยผูกตัวตนของบริการด้วย SPIFFE [22] X.509 identity ที่ตรวจสอบจากใบรับรองฝั่ง client ในขั้นตอน mTLS handshake ส่วนเส้นทางธุรกรรมที่ต้องเขียนข้อมูลลงบล็อกเชนถูกแยกออกจาก application tier ผ่าน NATS JetStream [23] เพื่อรองรับ backpressure และ at-least-once delivery semantics

องค์ประกอบหลักของ Backend Service ประกอบด้วย

- IAM Service: จัดการตัวตน สิทธิ์การเข้าถึง การจัดการสิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล On-chain และบทบาทของผู้ใช้งาน เช่น Prosumer, Consumer และ Operator
- Aggregator Bridge: รับข้อมูลการผลิตและการใช้ไฟฟ้าจาก Smart Meter Simulator หรือ Smart Meter Layer ตรวจสอบรูปแบบข้อมูล เวลาอ้างอิง รหัสอุปกรณ์ และค่าพลังงานก่อนส่งต่อไปยังขั้นตอนวิเคราะห์
- Trading Service: ตรวจสอบคำสั่งซื้อขายพลังงานร่วมกับเงื่อนไขด้าน Grid stability เช่น ปริมาณพลังงานคงเหลือ ข้อจำกัดของโครงข่าย และสถานะการเชื่อมต่อของ Smart Meter
- Chain Bridge: การสื่อสารภายในเป็นการทำงานประสานกันของทุก Service บน Private Network ผ่าน ConnectRPC Protocol Internal Service กับ Smart Contract เช่น IAM Service, Aggregator Service, Trading Service, Notification Service เพื่อเป็นตัวกลางที่สามารถส่งคำสั่งไปยัง Solana Program และติดตามผลลัพธ์จาก transaction signature หรือ Event log
- Notification Service: ส่งการแจ้งเตือน เช่น Email, Alert และ Notification เมื่อคำสั่งซื้อขายหรือสถานะ settlement มีเปลี่ยนแปลง การสื่อสารภายในเป็นการทำงานประสานกันของทุก Service บน Private Network ผ่าน ConnectRPC Protocol

การแยกบริการในลักษณะนี้ช่วยให้ระบบรองรับข้อมูลแบบ Realtime Smart Meter จำนวนมากได้ดีขึ้น เนื่องจากบริการรับข้อมูลสามารถขยายจำนวน instance ได้โดยไม่กระทบต่อบริการตรวจสอบธุรกรรมหรือบริการเชื่อมต่อบล็อกเชน นอกจากนี้ Backend Services ยังเป็นจุดควบคุมความปลอดภัยก่อนบันทึกธุรกรรมลง Smart Contract ทำให้ระบบซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer ไม่พึ่งพาบล็อกเชนเพียงอย่างเดียว แต่ผสานการตรวจสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าและการควบคุมสิทธิ์ของผู้ใช้งานเข้าด้วยกัน

IV. SYSTEM DESIGN

A. *Architecture Overview*

สถาปัตยกรรมของระบบถูกออกแบบเพื่อรองรับการจำลองการซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer ในบทความนี้นำเสนอแบบจำลองไมโครกริด โดยแบ่งเส้นทางข้อมูลออกเป็นชั้น Smart Meter, Aggregator Bridge, Trading Service, Anchor Smart Contract Program, Settlement Engine และ Frontend Dashboard โดยข้อมูลการผลิตและการใช้พลังงานถูกสร้างจาก Smart Meter Simulator แล้วส่งเข้าสู่ Aggregator Bridge เพื่อคัดกรองข้อมูลก่อนแปลงเป็นคำสั่งธุรกรรมสำหรับ Anchor program บนเครือข่าย Solana-compatible แบบ permissioned

การแยกองค์ประกอบในลักษณะนี้ทำให้การตรวจสอบเชิงวิศวกรรมไฟฟ้าและการควบคุมสิทธิ์เกิดขึ้นก่อนบันทึกธุรกรรม ขณะที่ Anchor program ทำหน้าที่เป็นชั้นบังคับใช้กติกาที่ตรวจสอบได้และบันทึกสถานะเพื่อการตรวจสอบย้อนหลัง ส่วน Settlement Engine ทำหน้าที่จัดการธุรกรรมที่ลงนามแล้วติดตามผลจาก transaction signature และอ่าน Event log เพื่อนำสถานะกลับไปแสดงบน Frontend ภาพรวมของชั้นต่างๆ และเส้นทางข้อมูลแสดงใน Fig. 1

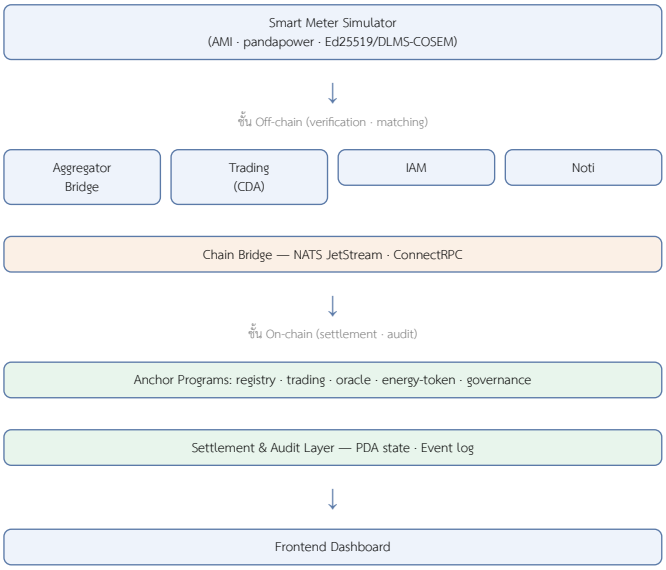

Fig. 1. Layered system architecture: off-chain verification/matching decoupled from on-chain settlement.

B. *Grid Simulator*

การออกแบบ Grid Modeling ซึ่งช่วยให้การจำลอง Advanced Metering Infrastructure (AMI) และการจัดการโครงข่ายไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง ออกแบบมาเพื่อจำลองระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อน แหล่งผลิตพลังงานแบบกระจาย (Distributed Energy Resources: DERs) และการดำเนินการของ Virtual Power Plant (VPP) แกนหลักของระบบจำลองผสานการประเมินสถานะแบบเวลาจริงที่ผ่านการตรวจสอบทางฟิสิกส์ (Physics-validated State Estimation) และ Optimal Power Flow (OPF) โดยใช้ Pandapower ซึ่งทำให้ระบบสามารถสร้างข้อมูลมาตรวัดแบบ Deterministic สำหรับโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่

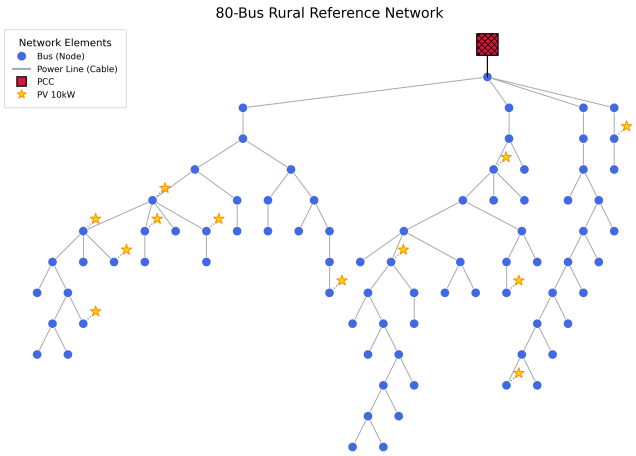

Fig. 2. Grid bus network topology used for simulator.

Grid Simulator พัฒนาด้วย Python 3.11 [24] สำหรับจำลองพฤติกรรมของการใช้ไฟฟ้า Distribution Grid ใช้รูปแบบ Network Topology จากไฟล์ GridLAB-D GLM [25] แล้วแปลงเป็น grid modeling ซึ่งประกอบด้วย bus, line, load และ photovoltaic unit ดังแสดงใน Fig. 2 เครื่องมือหลักที่ใช้ ได้แก่ FastAPI [26] NetworkX [27] สำหรับแทนโครงสร้าง topology, pvlib [28] สำหรับจำลอง photovoltaic generation และ pandapower [29] สำหรับคำนวณ power flow

กระบวนการจำลองทำงานแบบ discrete time-step โดยในแต่ละรอบ smart meter จะสร้าง energy reading จาก user load profile, photovoltaic generation, weather condition, voltage response และ telemetry replay ในกรณีที่มีการใช้งาน จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณ net power injection ของแต่ละ bus เพื่อนำไปอัปเดต grid state ได้แก่ bus voltage, line flow, power loss และ line utilization นอกจากนี้ ระบบยังสามารถ replay ข้อมูล telemetry จริงจากไฟล์ CSV และเชื่อมโยงข้อมูลกับ bus ผ่าน meter registry ทำให้รองรับ hybrid simulation ระหว่าง measured data และ synthetic data ได้ ความถูกต้องของ simulator ตรวจสอบผ่านชุดทดสอบที่ครอบคลุม topology loading, meter-to-bus mapping

เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมและรับรองที่มาของข้อมูล Aggregator Bridge รับข้อมูลมาตรวัดความถี่สูงแบบเวลาจริงแล้วกระจายผ่าน Redis Streams ที่แบ่งตามโซน (zone-partitioned) สำหรับการเฝ้าระวังสถานะโครงข่ายแบบพลวัต พร้อมรวมค่าอ่านเป็นหน้าต่างเวลา 15 นาทีเพื่อใช้ในการประเมินกำลังการผลิตและการสั่งการ (dispatch) ในชั้น Backend รูปแบบข้อมูลมาตรวัดเป็นไปตามมาตรฐาน DLMS/COSEM (IEC 62056) โดยถอดรหัสส่วน payload แบบ Binary ด้วย AES-256-GCM และเผยแพร่ต่อในรูปแบบ JSON นอกจากนี้ ระบบรับประกันความไม่ปฏิเสธเชิงรหัสวิทยา (Cryptographic Non-repudiation) ด้วยการตรวจสอบลายเซ็นเข้ารหัสแบบอสมมาตร Ed25519 ทั้งแบบค่าอ่านรายจุดและแบบกลุ่ม (Batch) ก่อนรับข้อมูลเข้าสู่ระบบ ทั้งนี้ในต้นแบบปัจจุบันยังไม่มีเส้นทางสร้าง Settlement Attestation บนเชนโดยตรงจากชั้นมาตรวัด ซึ่งเป็นแนวทางที่เปิดไว้สำหรับงานในอนาคต

C. Consortium Network

เครือข่ายบล็อกเชนในระบบนี้ออกแบบเป็น Consortium Network ภายใต้สมมติฐานฉันทามติแบบ Proof of Authority (PoA) ตามที่อธิบายไว้ใน Section III ส่วนนี้จึงเน้นรายละเอียดการออกแบบเครือข่ายและการกำกับดูแลเป็นหลัก การออกแบบทำให้ผู้ตรวจสอบบล็อกเป็นหน่วยงานมีหน้าที่ตรวจสอบหรือได้รับยินยอมจาก DSO เช่น ผู้ให้บริการรวบรวมโหลด (Load Aggregator) หน่วยงานกำกับดูแลหรือองค์กรที่ได้รับอนุญาต เหตุผลหลักในการเลือก PoA คือ Network Governance ที่ควบคุมได้ง่ายกว่าเครือข่ายสาธารณะ เช่น Solana Mainnet, Ethereum และความเหมาะสมต่อข้อกำหนดด้าน Regulatory compliance และ cost predictability สำหรับการทดลองหรือใช้งานในระบบพลังงานที่ต้องประมาณต้นทุนธุรกรรมได้ล่วงหน้า [14], [21] ทั้งนี้นโยบายด้านสิทธิ์และการกำกับดูแลถูกบังคับใช้ผ่านโปรแกรม governance บนเชน ซึ่งกำหนดหน่วยงานผู้มีสิทธิ์หลัก (REC certifying authority) การลงคะแนนแบบ DAO ที่มี quorum ขั้นต่ำผ่าน create_proposal, cast_vote และ execute_proposal การเสนอและอนุมัติเปลี่ยนผู้มีสิทธิ์ผ่าน propose_authority_change และ approve_authority_change รวมถึงการรับเข้าและถอดถอน Aggregator ที่ได้รับอนุญาตผ่าน admit_aggregator และ revoke_aggregator

ความแตกต่างจาก Solana public mainnet คือเครือข่ายนี้ไม่เปิดให้ validator ภายนอกเข้าร่วมแบบ permissionless และสามารถกำหนดนโยบายด้านสิทธิ์ การอัปเกรดโปรแกรม และการเก็บข้อมูลตามข้อกำหนดของโครงการได้ อย่างไรก็ตาม execution layer ยังคงอ้างอิงสถาปัตยกรรม Solana Virtual Machine และ Sealevel parallel runtime เพื่อให้ธุรกรรมที่ไม่ใช้ account เดียวกันสามารถประมวลผลแบบขนานได้ ค่า slot time ใกล้ 400 ms และ compute budget ที่กล่าวถึงในบทความนี้เป็นเป้าหมายเชิงออกแบบที่อ้างอิงเอกสาร Solana ไม่ใช่ผลวัดของเครือข่าย permissioned โครงสร้างการเรียงบล็อกตามลำดับเวลาแบบ Proof of History (PoH) แสดงใน Fig. 3 [18]

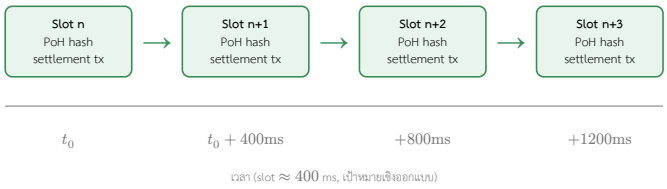

Fig. 3. Block/slot timeline: PoH-ordered slots at a design-target ≈400 ms interval, each recording settlement transactions.

ในระดับเครือข่ายดังกล่าวต้องกำหนดอย่างน้อยห้ารายการก่อนนำไปใช้งานจริง ได้แก่ จำนวน Validator และหน่วยงานเจ้าของโหนด วิธีผูก identity กับกุญแจ Validator นโยบายเพิ่มหรือลบ Validator กระบวนการอัปเกรดโปรแกรมหรือ genesis/configuration และ fault model ที่ยอมรับได้ บทความนี้จึงถือว่า PoA Solana-compatible network เป็นสมมติฐานเชิงสถาปัตยกรรมของระบบจำลอง ไม่ใช่ข้อสรุปว่ามีการปรับแต่ง consensus ของ Solana public network แล้ว

D. Smart Contract Programs

Smart Contract แบ่งออกเป็นหลายโปรแกรมตามความรับผิดชอบ ได้แก่ registry, trading, oracle, energy-token, governance และ treasury รวมถึงโปรแกรมสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพ (blockbench และ tpc-benchmark) ซึ่งพัฒนาด้วย Anchor Framework เพื่อกำหนด account validation, instruction handler และ Event log อย่างเป็นระบบ โปรแกรม registry มี register_user และ register_meter สำหรับลงทะเบียนผู้ใช้และ Smart Meter ส่วนโปรแกรม trading มี create_sell_order และ create_buy_order (รวมถึง submit_limit_order และ submit_market_order) สำหรับส่งคำสั่งขายและซื้อพลังงาน, match_orders และ clear_auction สำหรับจับคู่คำสั่งซื้อขายที่ Backend เสนอมา, settle_offchain_match และ execute_atomic_settlement สำหรับชำระธุรกรรมแบบ atomic settlement โดย settle_offchain_match จะตรวจสอบลายเซ็น Ed25519 ของทั้งผู้ซื้อและผู้ขายและใช้ order nullifier เพื่อกันการส่งซ้ำ และโปรแกรม energy-token มี mint_generation และ mint_to_wallet สำหรับสร้าง energy token ที่ต้องผ่านการร่วมลงนามของ REC validator (Renewable Energy Certificate) โดย mint_generation ใช้คีย์ (meter_id, ช่วงเวลา settlement) เพื่อรับประกัน idempotency ต่อหนึ่งหน้าต่างเวลา และ burn_tokens สำหรับเผา energy token ผ่านคำสั่ง SPL นอกจากนี้ โปรแกรม oracle มี submit_meter_reading สำหรับรับค่าอ่านจาก AMI, trigger_market_clearing สำหรับกำหนดขอบเขตหน้าต่างเวลา 15 นาที (900 วินาที) และ aggregate_readings สำหรับรวมตัวนับค่าอ่านที่ผ่านและไม่ผ่านการตรวจสอบ โปรแกรม governance ทำหน้าที่เป็นชั้นควบคุมแบบ PoA สำหรับการรับรองและเพิกถอน Renewable Energy Certificate (ERC) การกำกับสิทธิ์ผู้มีอำนาจ การจัดการ allow-list ของ aggregator และการลงคะแนนแบบ DAO (รายละเอียดคำสั่งอยู่ในส่วน Consortium Network) โปรแกรม treasury จัดการการ stake โทเคน GRX การจ่ายรางวัล และการรักษาค่าตรึงของ THBG stablecoin ผ่านคำสั่งเช่น stake_grx, unstake_grx, claim_rewards, swap_grx_for_thbg, redeem_thbg_for_grx และ record_settlement ที่เรียกผ่าน Cross-Program Invocation (CPI) จากโปรแกรม trading ส่วนโปรแกรม blockbench และ tpc-benchmark ใช้รัน workload มาตรฐาน ได้แก่ Blockbench micro-benchmark, YCSB, SmallBank และ TPC-C สำหรับการประเมินประสิทธิภาพบนเครือข่าย Solana-compatible [19], [30]

โครงสร้างบัญชีใช้ Program Derived Address (PDA) เพื่อแยก state ของระบบออกเป็นบัญชีย่อยตาม seed เฉพาะ เช่น registry และ user account, meter account, market และ market_shard, order และ trade record, escrow, order nullifier สำหรับป้องกันการส่งซ้ำ, oracle_data และ mint authority (gen_mint, thbg_mint) การใช้ PDA ทำให้โปรแกรมตรวจสอบ ownership และ deterministic address ของบัญชีได้โดยไม่ต้องพึ่ง private key ของบัญชี state แต่ละรายการ งานที่ใช้ทรัพยากรสูง เช่น การคำนวณราคาแบบซับซ้อน การจับคู่ order book ขนาดใหญ่ หรือการวิเคราะห์ Grid stability จึงถูกย้ายไปทำใน Backend และ Aggregator Bridge ก่อนส่งผลลัพธ์ที่ยืนยันแล้วเข้าสู่ Smart Contract เพื่อให้อยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้าน compute ของธุรกรรม [20], [31] โดยกลไกจับคู่คำสั่งใน Trading Service ใช้อัลกอริทึม Continuous Double Auction (CDA) แบบ price-time priority ที่แบ่ง order book ตามโซนและคำนึงถึงข้อจำกัดการไหลของพลังงาน (wheeling และ

loss) ก่อนส่งคู่คำสั่งที่จับคู่แล้วไปชำระแบบ atomic บน Smart Contract รายละเอียดสูตรการกำหนดราคาและค่าธรรมเนียมอธิบายใน Section IV.F

E. Data Model and Trust Boundary

ข้อมูลหลักของคำสั่งซื้อขายประกอบด้วย order_id, user_id (บทบาท prosumer หรือ consumer), meter_id, side (offer หรือ bid), energy_amount (quantity_kwh), price_per_kwh, status, expires_at, epoch_id และ zone_id โดยปริมาณ energy_amount ต้องไม่เกิน available_surplus_kwh ที่ Aggregator Bridge รับรองสำหรับผู้ขายในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ตรวจสอบในชั้น off-chain ส่วนการป้องกันการส่งซ้ำใช้บัญชี nullifier บนเชน (order nullifier) แทนการเก็บ nonce ไว้ในตัวคำสั่ง ส่วน settlement record ประกอบด้วย trade_id, คู่ buy_order_id/sell_order_id, energy_amount ที่ clear, price, fee_amount/net_amount, wheeling_charge, loss_factor, erc_certificate_id, blockchain_tx และ settlement timestamp (created_at/confirmed_at) ทั้งนี้สถานะ escrow ถูกเก็บแยกเป็นบัญชี EscrowRecord ต่างหาก ไม่ได้อยู่ในตัว settlement record

ขอบเขตความรับผิดชอบถูกกำหนดให้ชัดเจนดังนี้ Backend และ Aggregator Bridge เป็นผู้ประเมินข้อมูลกำลังผลิตและการใช้ไฟฟ้า เงื่อนไข Grid stability, Islanding safety, ข้อจำกัดของโครงข่าย และเงื่อนไขปริมาณ kWh ที่ไม่เกินค่ารับรอง (available_surplus) จากนั้นจึงปล่อยให้คู่คำสั่งที่ผ่านเงื่อนไขถูกส่งไปยังขั้นตอน settlement บนเชน ส่วน Anchor program ตรวจสอบเฉพาะ account ownership, signer, ลายเซ็น Ed25519 ของทั้งผู้ซื้อและผู้ขายบน order payload, timestamp validity (expires_at), การกันส่งซ้ำผ่านบัญชี order nullifier, เงื่อนไข slippage/zone-capacity, สถานะ escrow และสถานะ order/trade ที่ยังไม่ถูกใช้ซ้ำ กล่าวคือเงื่อนไขด้านปริมาณพลังงานและ oracle attestation ถูกบังคับใช้ในชั้น off-chain ก่อนการ submit ไม่ได้ตรวจซ้ำบนเชน ดังนั้นบล็อกเชนในต้นแบบนี้ทำหน้าที่เป็น settlement and audit layer ไม่ใช่ตัวคำนวณ power-flow หรือ grid-stability engine แบบเต็มรูปแบบ

F. Pricing and Settlement Model

แบบจำลองราคาของระบบแบ่งเป็นสามส่วน คือ การกำหนดราคาเคลียร์ในกลไก CDA การคำนวณค่าธรรมเนียมและยอดสุทธิในการ settlement และกลไกราคาของโทเคนในชั้น treasury สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการสรุปไว้ใน ตารางที่ II

Table II
Nomenclature for the pricing and settlement equations.

สัญลักษณ์	ความหมาย
p_s	ราคาเสนอขายต่อหน่วย (sell ask)
p_b	ราคาเสนอซื้อต่อหน่วย (buy bid)
p^*	ราคาเคลียร์ / landed cost
λ	loss factor ($\lambda \geq 1$)
c_{loss}	ต้นทุนการสูญเสียต่อหน่วย
w	ค่าผ่านสาย (wheeling charge) ต่อหน่วย
m	ตัวคูณจูงใจ (incentive multiplier)
δ	ส่วนลดภายในโซน (intra-zone discount)
q	ปริมาณพลังงานที่จับคู่ (kWh)
V	มูลค่ารวมของธุรกรรม
f	ค่าธรรมเนียมตลาด
φ	อัตราค่าธรรมเนียมตลาด (bps)
W	ค่าผ่านสายรวม ($q \cdot w$)
L	ต้นทุนการสูญเสียรวม ($q \cdot c_{\text{loss}}$)
r	อัตราแลกเปลี่ยน GRX atom ต่อ THBG
ψ	ค่าธรรมเนียม swap (bps)
A	ตัวสะสมรางวัลต่อหน่วย stake
s, s_{total}	จำนวนที่ stake และจำนวน stake รวม
R	รางวัลที่เติมเข้าระบบ

การกำหนดราคาเคลียร์ (CDA clearing) ใช้ราคาฝั่งผู้ขาย (maker price) ปรับด้วยต้นทุนโครงข่าย โดยกำหนดต้นทุนการสูญเสีย (loss cost) ต่อหน่วยจากค่า loss factor $\lambda \geq 1$ ดังสมการ

$$c_{\text{loss}} = p_s(\lambda - 1) \tag{1}$$

ราคาเคลียร์หรือ landed cost คำนวณจากราคาเสนอขาย p_s บวกค่าผ่านสาย (wheeling charge) w และต้นทุนการสูญเสีย แล้วปรับด้วยตัวคูณจูงใจ (incentive multiplier) m และส่วนลดภายในโซน (intra-zone discount) δ

$$p^* = (p_s + w + c_{\text{loss}}) \cdot m \cdot \delta \tag{2}$$

โดย $\delta = 0.95$ เมื่อผู้ซื้อและผู้ขายอยู่โซนเดียวกัน และ $\delta = 1$ เมื่อข้ามโซน คำสั่งซื้อจะจับคู่ได้เมื่อ $p^* \leq p_b$ (เมื่อ p_b คือราคาเสนอซื้อ) และระบบจัดลำดับผู้ขายที่มี landed cost ต่ำสุดให้จับคู่ก่อนตามหลัก price-time priority ปริมาณที่จับคู่เท่ากับส่วนที่เหลือน้อยที่สุดของทั้งสองฝั่ง $q = \min(q_b, q_s)$

การคำนวณค่าธรรมเนียมและยอดสุทธิในการ settlement กำหนดมูลค่ารวม ค่าธรรมเนียมตลาด และยอดสุทธิที่ผู้ขายได้รับดังนี้

$$V = q \cdot p^* \tag{3}$$

$$f = \frac{V \cdot \varphi}{10000} \tag{4}$$

$$\text{net} = V - f - W - L \tag{5}$$

โดย φ คือค่าธรรมเนียมตลาดในหน่วย basis point (ค่าตั้งต้นบนเชน 25 bps หรือ 0.25%), $W = q \cdot w$ คือค่าผ่านสายรวม และ $L = q \cdot c_{\text{loss}}$ คือต้นทุนการสูญเสียรวม ยอด f, W, L และ net ถูกโอนแยกไปยังบัญชีผู้เก็บค่าธรรมเนียม ค่าผ่านสาย การสูญเสีย และผู้ขายตามลำดับ พารามิเตอร์ของโซนถูกตีความในหน่วย bps คือ $m = m_{\text{bps}}/10000$ และ $w = w_{\text{bps}}/10000$ โดยค่าตั้งต้นของ wheeling charge เท่ากับ 0 ภายในโซนและ 0.02 ข้ามโซน ส่วน loss factor เท่ากับ 1.01 ภายในโซนและ 1.03 ข้ามโซน

กลไกราคาของโทเคนในชั้น treasury ครอบคลุมการแลกเปลี่ยนระหว่าง GRX และ THBG stablecoin ที่ตรึงค่ากับเงินบาท โดยใช้อัตรา r (จำนวน GRX atom ต่อ THBG) และค่าธรรมเนียม swap ψ (bps)

$$\text{thbg} = \frac{g \cdot r}{10^9} \cdot (1 - \psi/10000) \tag{6}$$

$$g = \frac{\text{thbg} \cdot 10^9}{r} \tag{7}$$

โดยการ redeem ตาม Equation 7 ไม่มีค่าธรรมเนียม และการรักษาค่าตรึงใช้เงื่อนไข supply ต่อ reserve แบบ 1:1 คือ $\text{supply}_{\text{thbg}} \leq \text{reserve}_{\text{attested}}$ ส่วนรางวัลการ stake ใช้ตัวสะสม (accumulator) แบบ MasterChef โดยรางวัลค้างรับของผู้ stake คำนวณจากจำนวนที่ stake s

$$\text{reward} = s \cdot A/10^{12} - \text{debt} \tag{8}$$

เมื่อมีการเติมรางวัล R ตัวสะสม A จะถูกปรับเป็น $A \leftarrow A + (R \cdot 10^{12})/s_{\text{total}}$ แบบ pro-rata ตามสัดส่วนการ stake และการ slash จะหักเต็มจำนวนที่ร้องขอแล้วกระจายคืนสู่ผู้ stake ที่เหลือผ่านตัวสะสมเดียวกัน

ในเส้นทาง CDA ที่ใช้งานจริง ตัวคูณจูงใจถูกตั้งเป็น $m = 1$ กล่าวคือ incentive multiplier มีผลเฉพาะเส้นทาง settlement แบบ feed-in หรือ grid-export มิใช่การจับคู่ CDA นอกจากนี้ค่าตั้งต้นของค่าธรรมเนียมตลาดบนเชน (25 bps) แตกต่างจากค่าตั้งต้นในไฟล์ตั้งค่านอกเชน (50 bps) และพารามิเตอร์โซนในโปรแกรม governance จัดเก็บแบบสเกล ×1000 ขณะที่ผู้บริโภคค่าจริงในชั้น trading ตีความแบบ bps ($/10000$) ซึ่งเป็นค่าที่ระบบใช้งานจริง ทั้งนี้การคำนวณในโค้ดใช้เลขทศนิยมตายตัว (fixed-point integer) แบบปัดลง (floor division) และยอดสุทธิถูกจำกัดไม่ให้ติดลบด้วย saturating subtraction ดังนั้นสมการข้างต้นจึงเป็นแบบจำลองเชิงค่าจริงที่อาจต่างจากผลคำนวณจริงในระดับเศษปัด

G. Trade Lifecycle Sequence

ลำดับการซื้อขายถูกแบ่งขอบเขตการทำงานระหว่าง off-chain และ on-chain อย่างชัดเจน ดัง Fig. 4 ฝั่ง off-chain รับผิดชอบการรวบรวมข้อมูล Smart Meter การยืนยันตัวตน การตรวจสอบเวลาอ้างอิง การประเมินเงื่อนไข Grid stability และการคำนวณคู่คำสั่งที่เสนอให้ clear ส่วนฝั่ง on-chain รับผิดชอบเฉพาะการยืนยัน account state, ลายเซ็น Ed25519 ของผู้ซื้อและผู้ขายบน order payload ที่ลงนามไว้, bounded matched pair, escrow และการบันทึก settlement event

กระบวนการนี้ช่วยให้ธุรกรรมพลังงานมีความโปร่งใสและตรวจสอบย้อนหลังได้ พร้อมลดความเสี่ยงจากการนำข้อมูล Smart Meter ที่ยังไม่ผ่านการยืนยันเข้าสู่บล็อกเชนโดยตรง การแยก boundary ระหว่าง off-chain verification และ on-chain settlement จึงเป็นหลักสำคัญในการรักษาทั้งประสิทธิภาพของระบบและความปลอดภัยของไมโครกริด ข้อจำกัดของแนวทางนี้คือผู้ใช้ต้องเชื่อถือ Aggregator Bridge และ governance ของ oracle_authority หากต้องการลด trust เพิ่มเติมควรเพิ่ม multi-oracle attestation หรือหลักฐาน cryptographic proof ในอนาคต

Fig. 4. Trade lifecycle: off-chain verification and CDA matching, then on-chain settlement and audit.

V. EVALUATION

ส่วนนี้นำเสนอการประเมินเชิงสถาปัตยกรรมของระบบจำลอง โดยพิจารณาจากสามมิติหลัก ได้แก่ Performance, I/O and Storage Efficiency และ Compute Used เพื่อสะท้อนความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมสำหรับงานซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer ในระดับไมโครกริด ในมิติด้าน Performance ส่วนนี้รายงานผลการวัดอัตราการรับข้อมูลของเส้นทาง telemetry ingest จากการรันจริงหนึ่งรอบ (ดู Section V.B) ทั้งนี้ระบบมีชุดเครื่องมือ benchmark และผลการวัด microbenchmark ของ workload มาตรฐานฐานข้อมูล (เช่น Blockbench, TPC-C และ SmallBank ที่พอร์ตมาบนเครือข่าย Solana-compatible) อยู่แล้ว แต่การประเมินเชิงปริมาณของเส้นทาง settlement บนเชนโดยตรง เช่น compute-unit ต่อ instruction ของการ settlement, latency และ throughput แบบ end-to-end รวมถึงผลทดสอบ grid-stability model ในระดับภาคสนาม ยังเป็นงานในอนาคต

A. Performance

ผลการออกแบบชี้ให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมแบบ Microservice สามารถลดการผูกติดกันของภาระงานระหว่างการรับข้อมูล Smart Meter การตรวจสอบคำสั่งซื้อขาย และการส่งธุรกรรมไปยังบล็อกเชนในเชิงโครงสร้างได้ การแยก aggregator-bridge, trading-service, chain-bridge และ settlement-engine ออกจากกันทำให้แต่ละบริการมีจุดปรับขนาดที่ชัดเจนตามประเภทภาระงาน โดยเฉพาะช่วงที่มีข้อมูลจาก Smart Meter จำนวนมากหรือมีคำสั่งซื้อขายเกิดขึ้นพร้อมกัน

ในเชิงการทำงานแบบเวลาจริง ระบบใช้ ConnectRPC และ NATS JetStream [23] เพื่อแยกงานที่ต้องตอบสนองเร็วออกจากงานที่ต้องรอการยืนยันธุรกรรมบนบล็อกเชน ดังนั้น Backend Service จึงถูกออกแบบให้ตอบสนองต่อคำขอของผู้ใช้และ Smart Meter ได้โดยไม่ต้องรอให้ธุรกรรมบน Solana-compatible network เสร็จสมบูรณ์ทันที แนวทางนี้คาดว่าจะลดผลกระทบจากความหน่วงของเครือข่ายบล็อกเชน แต่ยังต้องทดสอบด้วย workload ที่กำหนดจำนวน Meter, sampling interval, queue depth และ transaction mix อย่างชัดเจนในงานอนาคต

B. Telemetry Ingest Throughput

เพื่อประเมินความสามารถของเส้นทางรับข้อมูลภายใต้ภาระงานจำนวนมาก ผู้วิจัยรันการจำลองด้วยสมาร์ทมิเตอร์จำนวน 80 เครื่อง (NUM_METERS=80) ที่ส่งค่าอ่านทุก 15 วินาทีของเวลาจำลอง (SIMULATION_INTERVAL=15) ในที่นี้นิยาม “ธุรกรรม” (transaction) ว่าหมายถึงค่าอ่านมาตรวัดหนึ่งรายการที่ลงนามด้วย Ed25519 แล้วผ่านการตรวจสอบลายเซ็นและถูกกระจายเข้าสู่ Redis Stream ที่ Aggregator Bridge มิใช่คำสั่งซื้อขายที่จับคู่แล้วหรือธุรกรรม settlement บนบล็อกเชน

อัตราการรับข้อมูลเชิงออกแบบ (nominal ingest rate) ในเวลาจำลองเท่ากับ 80 ÷ 15 = 5.33 รายการต่อวินาที ซึ่งสอดคล้องกับการบีบอัดเวลา (time compression) ประมาณ 60 เท่าเมื่อเทียบกับรอบการส่งข้อมูลของมาตรวัดจริงที่ใช้หน้าต่างเวลา 15 นาที (900 วินาที) จากการรันจริงหนึ่งรอบเป็นเวลาประมาณ 27 นาที Aggregator Bridge รับและตรวจสอบลายเซ็นค่าอ่านได้ทั้งสิ้น 26,240 รายการจากมาตรวัด 80 เครื่องอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล โดยอัตราที่วัดได้จากเวลานาฬิกาจริง (wall-clock) อยู่ที่ประมาณ 16 รายการต่อวินาที ซึ่งสูงกว่าอัตราเชิงออกแบบเนื่องจากรอบการส่งข้อมูลของ simulator ถูกเร่งให้เร็วกว่าช่วงเวลา 15 วินาทีของเวลาจำลอง

ผลนี้แสดงให้เห็นว่าเส้นทางรับข้อมูล (ingest path) สามารถรองรับภาระการส่งข้อมูลของมาตรวัด 80 เครื่องได้อย่างเสถียร อย่างไรก็ตาม การวัดนี้ครอบคลุมเฉพาะเส้นทางรับและตรวจสอบข้อมูลมาตรวัดเท่านั้น ยังไม่รวมการวัดปริมาณงานและความหน่วงของเส้นทาง settlement บนเชน เช่น throughput และ latency ของการจับคู่คำสั่งและการบันทึกธุรกรรมบน Smart Contract นอกจากนี้การทดลองนี้ยังไม่ได้บันทึกข้อมูลฮาร์ดแวร์และโหมดของ validator ดังนั้นการทดลองถัดไปจึงควรกำหนด workload, hardware profile และ validator configuration ที่ทำซ้ำได้ พร้อมวัดเส้นทาง settlement แบบ end-to-end

C. I/O and Storage Efficiency

ด้าน I/O ระบบออกแบบให้ข้อมูลจาก Smart Meter ถูกส่งเข้าสู่ aggregator-bridge เพื่อคัดกรองและตรวจสอบก่อนบันทึกหรือส่งต่อไปยังบริการอื่น ทำให้ลดการเขียนข้อมูลซ้ำและลดปริมาณข้อมูลที่ไม่จำเป็นเข้าสู่บล็อกเชน ในเชิงออกแบบข้อมูลที่มีความถี่สูง เช่น ค่าไฟฟ้าแบบเวลาจริง จะถูกใช้ในชั้น Backend เพื่อประเมินสถานะระบบ ขณะที่บล็อกเชนจะบันทึกเฉพาะข้อมูลธุรกรรมหรือ Event log ที่จำเป็นต่อการตรวจสอบย้อนหลัง

การแยกข้อมูลชั่วคราวออกจากข้อมูลธุรกรรมถาวรเป็นแนวทางที่คาดว่าจะเพิ่มประสิทธิภาพด้าน Storage โดยข้อมูลสถานะที่เปลี่ยนแปลงเร็วสามารถจัด

เก็บในระบบ Backend หรือ queue ได้ ส่วนข้อมูลที่ต้องการความโปร่งใสและการตรวจสอบย้อนหลังจะถูกส่งไปยัง Smart Contract เท่านั้น วิธีนี้ลดขอบเขตข้อมูลที่ต้องเก็บบนบล็อกเชน แต่ยังต้องวัดปริมาณ record, retention policy และ storage cost ในการทดลองถัดไป

D. Compute Unit Used

ด้าน Compute Unit Used ระบบแบ่งภาระการประมวลผลออกเป็นสองส่วนหลัก คือการประมวลผลใน Backend และการประมวลผลบน Smart Contract งานที่ต้องใช้ทรัพยากรมาก เช่น การตรวจสอบรูปแบบข้อมูล การประเมินเงื่อนไข Grid stability และการจัดคิวคำสั่งซื้อขาย จะดำเนินการใน Backend ก่อน ส่วน Smart Contract ทำหน้าที่ตรวจสอบเงื่อนไขขั้นต่ำที่จำเป็น ได้แก่ account ownership, signer, ลายเซ็น Ed25519 ของผู้ซื้อและผู้ขาย, การกันส่งซ้ำผ่าน order nullifier, escrow state และสถานะ order/trade ที่ยังไม่ถูกใช้ซ้ำ

แนวทางนี้คาดว่าจะลดปริมาณ compute ที่ต้องใช้บนบล็อกเชน และทำให้ Smart Contract มีหน้าที่ชัดเจนในฐานะชั้น Settlement และ Audit log มากกว่าการเป็นระบบประมวลผลหลักของไมโครกริด อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปเรื่องการขยายจำนวน Smart Meter และจำนวนธุรกรรมจำเป็นต้องยืนยันด้วยการทดสอบ compute unit ต่อ instruction, จำนวน account ที่ใช้ต่อธุรกรรม, อัตรา retry และ failure mode ของ queue/validator

VI. DISCUSSION AND LIMITATIONS

A. Discussion

ผลการออกแบบระบบจำลองชี้ให้เห็นว่าแนวทางการแยกชั้นการทำงานระหว่าง Smart Meter Simulator, Backend Service และ Solana Smart Contract ช่วยให้ระบบซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer มีโครงสร้างที่ตรวจสอบได้และมีจุดขยายระบบที่ชัดเจนขึ้น Backend Service ทำหน้าที่เป็นชั้นควบคุมหลักสำหรับตรวจสอบข้อมูล การจัดการสิทธิ์ และการประเมินเงื่อนไขด้าน Grid stability ก่อนส่งธุรกรรมไปยังบล็อกเชน ทำให้ Smart Contract ไม่ต้องรับภาระการประมวลผลทั้งหมดของระบบไมโครกริด

การใช้ Solana Smart Contract ในฐานะ Settlement และ Audit layer ช่วยเพิ่มความโปร่งใสของธุรกรรมพลังงาน เนื่องจากคำสั่งซื้อขายและสถานะการชำระพลังงานสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ อย่างไรก็ตาม ระบบยังต้องให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของโครงข่ายไฟฟ้าเป็นลำดับแรก การอนุมัติธุรกรรมจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะราคาและปริมาณพลังงานเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาเงื่อนไขด้านเสถียรภาพของระบบและสถานะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ร่วมด้วย

B. Limitations and Future Work

ข้อจำกัดสำคัญของงานนี้คือระบบยังอยู่ในระดับการจำลอง โดยข้อมูลพลังงานมาจาก Smart Meter Simulator และยังไม่ได้ทดสอบร่วมกับอุปกรณ์ Smart Meter จริงหรือระบบไฟฟ้าภาคสนาม ดังนั้นผลลัพธ์จึงสะท้อนความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมและกระบวนการทำงานเบื้องต้น มากกว่าประสิทธิภาพเชิงปริมาณในสภาพแวดล้อมจริง

งานในอนาคตควรพัฒนาการเชื่อมต่อกับ Smart Meter จริงผ่านมาตรฐาน DLMS/COSEM ทดสอบประสิทธิภาพด้าน Latency, Throughput, Storage และ Compute unit ของ Smart Contract ภายใต้ปริมาณธุรกรรมหลายระดับ รวมถึงเพิ่มแบบจำลองด้าน Grid stability, Islanding detection และ Demand response เพื่อให้ระบบสามารถประเมินความปลอดภัยของการซื้อขายพลังงานได้ใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น การทดลองถัดไปควรกำหนด workload ที่ทำซ้ำได้ เช่น จำนวน Meter, sampling interval, transaction mix, validator count, queue depth, failure/retry policy และตัวชี้วัด market-clearing output อย่างชัดเจน

VII. CONCLUSION

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบจำลองการซื้อขายพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Peer-to-Peer สำหรับไมโครกริด โดยผสาน Smart Meter Simulator, Backend/Aggregator Bridge และ Solana-compatible Smart Contract เข้าด้วยกัน ระบบถูกออกแบบให้รองรับข้อมูลพลังงานแบบเวลาจริง ตรวจสอบคำสั่งซื้อขายผ่านบริการ Backend และบันทึกผลธุรกรรมที่ผ่านเงื่อนไขลงบนบล็อกเชนเพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความสามารถในการตรวจสอบย้อนหลัง

ผลการประเมินเชิงสถาปัตยกรรมชี้ให้เห็นว่าแนวทาง Microservice ร่วมกับการจัดคิวธุรกรรมผ่าน NATS JetStream มีศักยภาพในการลดการผูกติดกันของภาระงานระหว่างการรับข้อมูล การตรวจสอบธุรกรรม และการบันทึกผลบนบล็อกเชนได้ นอกจากนี้ การจำกัดบทบาทของ Smart Contract ให้เป็นชั้น Settlement and Audit layer ช่วยกำหนดขอบเขต compute บนบล็อกเชนให้ชัดเจนขึ้น โดยการจำลองด้วยสมาร์ทมิเตอร์จำนวน 80 เครื่องที่บีบอัดเวลาประมาณ 60 เท่าแสดงให้เห็นว่าเส้นทางรับข้อมูล (telemetry ingest) รองรับอัตราเชิงออกแบบ 5.33 รายการต่อวินาทีได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการสูญหายของข้อมูล ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าสถาปัตยกรรมแบบแยกชั้นสามารถรองรับภาระการรับข้อมูลของมาตรวัดได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการต่อยอดสู่การใช้งานในระดับอุตสาหกรรมพลังงานในอนาคต

REFERENCES

[1] W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, และ H. V. Poor, “Peer-to-Peer Trading in Electricity Networks: An Overview”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, ปี 11, ฉบับที่ 4, น. 3185–3200, 2020.

[2] T. Morstyn, A. Teytelboym, และ M. D. McCulloch, “Bilateral Contract Networks for Peer-to-Peer Energy Trading”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, ปี 10, ฉบับที่ 2, น. 2026–2035, 2019.

[3] A. Paudel, K. Chaudhari, C. Long, และ H. B. Gooi, “Peer-to-Peer Energy Trading in a Prosumer-Based Community Microgrid: A Game-Theoretic Model”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ปี 66, ฉบับที่ 8, น. 6087–6097, 2019.

[4] IEEE Standards Association, “IEEE Std 1547-2018: IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces”. 2018.

[5] IEEE Standards Association, “IEEE Std 2030.7-2017: IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers”. 2018.

[6] J. Guerrero, A. C. Chapman, และ G. Verbic, “Decentralized P2P Energy Trading Under Network Constraints in a Low-Voltage Network”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, ปี 10, ฉบับที่ 5, น. 5163–5173, 2019.

[7] S. Nakamoto, “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”. 2008.

[8] V. Buterin, “Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform”. 2014.

[9] G. Wood, “Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger”. 2014.

[10] D. Yaga, P. Mell, N. Roby, และ K. Scarfone, “Blockchain Technology Overview”, technical report NIST IR 8202, 2018. doi: 10.6028/NIST.IR.8202.

[11] E. Mengelkamp, P. Staudt, J. Garttner, และ C. Weinhardt, “Trading on Local Energy Markets: A Comparison of Market Designs and Bidding Strategies”, *Applied Energy*, ปี 210, น. 870–880, 2018.

[12] E. Munsing, J. Mather, และ S. Moura, “Blockchains for Decentralized Optimization of Energy Resources in Microgrid

Networks”, ใน *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications*, 2017, น. 2164–2171.

[13] J. Kang, R. Yu, X. Huang, S. Maharjan, Y. Zhang, และ E. Hossain, “Enabling Localized Peer-to-Peer Electricity Trading Among Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Consortium Blockchains”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, ปี 13, ฉบับที่ 6, น. 3154–3164, 2017.

[14] E. Androulaki *และคณะ*, “Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains”, ใน *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference*, 2018, น. 1–15. doi: 10.1145/3190508.3190538.

[15] L. Lamport, R. Shostak, และ M. Pease, “The Byzantine Generals Problem”, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, ปี 4, ฉบับที่ 3, น. 382–401, 1982, doi: 10.1145/357172.357176.

[16] M. Castro และ B. Liskov, “Practical Byzantine Fault Tolerance”, ใน *Proceedings of the Third Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 1999, น. 173–186.

[17] IEEE Standards Association, “IEEE Std 2030.8-2018: IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers”. 2018.

[18] A. Yakovenko, “Solana: A New Architecture for a High Performance Blockchain”. 2018.

[19] Coral, “Anchor Documentation”. 2026.

[20] Solana Foundation, “Program Derived Addresses”. 2026.

[21] S. Joshi, “Feasibility of Proof of Authority as a Consensus Protocol Model”. 2021. doi: 10.48550/arXiv.2109.02480.

[22] SPIFFE Project, “X.509-SVID Specification”. 2018.

[23] NATS.io, “JetStream”. 2024.

[24] Python Software Foundation, “Python 3.11 Documentation”. 2026.

[25] D. P. Chassin, K. Schneider, และ C. Gerkensmeyer, “GridLAB-D: An Open-Source Power Systems Modeling and Simulation Environment”, ใน *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, น. 1–5. doi: 10.1109/TDC.2008.4517260.

[26] S. Ramirez, “FastAPI Documentation”. 2026.

[27] A. A. Hagberg, D. A. Schult, และ P. J. Swart, “Exploring Network Structure, Dynamics, and Function Using NetworkX”, ใน *Proc. 7th Python in Science Conference*, 2008, น. 11–15.

[28] K. S. Anderson, C. W. Hansen, W. F. Holmgren, A. R. Jensen, M. A. Mikofski, และ A. Driesse, “pvlib python: 2023 Project Update”, *Journal of Open Source Software*, ปี 8, ฉบับที่ 92, น. 5994, 2023, doi: 10.21105/joss.05994.

[29] L. Thurner *และคณะ*, “pandapower: An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, ปี 33, ฉบับที่ 6, น. 6510–6521, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2829021.

[30] Solana Foundation, “Tokens on Solana”. 2026.

[31] Solana Foundation, “Solana Documentation”. 2026.