

การพัฒนาระบบจำลองการซื้อขายพลังงานสะอาดแบบ P2P ที่เน้นการรักษาความ
เป็นส่วนตัวโดยใช้ Solana Smart Contract

นายวันทิร์วัฒ กิริยาตี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
2410717302003@live4.utcc.ac.th

บทต่อไปนี้จะอธิบาย Solana ที่มีความสามารถในการประมวลผล transaction ได้เร็วที่สุดในโลก ด้วยการใช้เทคโนโลยี blockchain แบบ Peer-to-Peer (P2P) ที่เน้นการรักษาความเป็นส่วนตัว (Privacy-Preserving) พื้นฐาน Solana แบบส่วนตัว งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ BLOCKBENCH และ TPC-C Benchmark เพื่อประเมินระบบที่รองรับการซื้อขายต่อๆ กัน “สมุดคำสั่งซื้อขายแบบรักษาความลับ” (Confidential Order Book) และการพิสูจน์แหล่งที่มาของพลังงาน (Energy Provenance) โดยใช้เทคนิค Zero-Knowledge Proofs ผลการทดลองชี้ว่า Solana สามารถประมวลผล transaction ได้ต่ำกว่า 2,111 tpmC และความหน่วงเฉลี่ย 116 ms เม้าส์มีภาระงานด้านการป้องกันความเสี่ยง การวิเคราะห์ตัวตนเพื่อเข้าถึง การรับและส่ง transaction แสดงให้เห็นว่า Solana สามารถรองรับ transaction จำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น จัดการความเสี่ยงได้ดี และมีประสิทธิภาพสูง ทำให้ Solana ได้รับการยอมรับในวงการ blockchain และการประมวลผล transaction ที่สำคัญ เช่น ตลาดหลักทรัพย์ ธนาคาร สถาบันการเงิน และอุตสาหกรรมต่างๆ

Index Terms—บล็อกเชน, การซื้อขายพลังงาน, Solana, Privacy-Preserving, Zero-Knowledge Proofs, TPC-C, GridTokenX

L. ၁၁၉၂

การกรุงฯ จ่ายศูนย์ระบบพลังงานผ่านทรัพยากรพลังงานแบบกระจาย (Distributed Energy Resources หรือ DERs) จำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานการเชื่อมโยงที่แข็งแกร่ง ซึ่งสามารถรองรับธุกรรมขนาดเล็กที่มีความถี่สูงได้ [2] รูปแบบสาธารณูปโภคแบบรวมศูนย์ดังเดิมมักประสบปัญหาความเสี่ยงจากการล้มเหลวที่จุดเดียว (Single Point of Failure) และขาดความโปร่งใสในการกำหนดราคา เทหะโนโลหะสืบทอดเข้านำเสนอทางออกใหม่ๆ แต่แม้กูรูวิทยาศาสตร์เรื่องข้อจำกัดด้านความสามารถในการขยายระบบที่ [4]

งานวิจัยนี้ประเมินประสิทธิภาพของแพลตฟอร์มที่นำเสนอ ซึ่งใช้ประโยชน์จาก Sealevel Parallel Runtime ของ Solana [3] เพื่อแก้ไขปัญหาความเหลื่อมล้ำ ซึ่งแตกต่างจากบล็อกเชนรุ่นก่อนหน้า โดย Solana นำเสนอความแน่นอนของสถานะสุดท้าย (Deterministic Finality) ในโหมด Permissioned และความสามารถในการประมวลผลธุรกรรมที่ไม่ทับซ้อนกันในรูปแบบขนาน ซึ่งหมายความอย่างยิ่งสำหรับการซื้อขายพัสดุงานที่มีปริมาณธุรกรรมสูง วัดคุณสมบัติของการศึกษาดังนี้:

- เพื่อศึกษาและนำเสนอสถานภาพปัจจุบันของระบบจำลองการซื้อขายพังงา P2P โดยใช้ Solana (Anchor) ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ (Permissioned PoA)
 - เพื่อพัฒนาและพิสูจน์แนวคิด (Proof-of-Concept) ของระบบต้นแบบที่จำลองการแลกเปลี่ยน GRID Token โดยทำงานร่วมกับระบบจำลองมิเตอร์อัจฉริยะ (AMI Simulator)
 - เพื่อประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพอย่างเป็นระบบผ่านกระบวนการ BLOCKBENCH และชุดการทดสอบมาตรฐาน TPC

II. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง: วิธีการ BLOCKBENCH

BLOCKBENCH [4] นำเสนอการทดลองทำงานของบล็อกเชนระบบสำหรับการประมูลประวัติอภิภูมิคุณภาพบล็อกเชนส่วนตัว (Private Blockchain) ผ่านสถาปัตยกรรม 4 ชั้น ได้แก่

- 1) Consensus Layer วัดค่าให้จ่ายของกระบวนการฉันทามติ (Consensus Overhead)
ผ่านการทำงานแบบ DoNothing
 - 2) Execution Layer ประเมินการประมวลผล Smart Contract ผ่านการทำงานที่ใช้หน่วยประมวลผลสูง (CPU-intensive)
 - 3) Data Model Layer ทดสอบ ประสิทธิภาพ การ อ่าน/เขียน สถานะ โดยใช้ IOHeavy Benchmarks
 - 4) Application Layer การจำลองการทำงานในสถานการณ์รีโอดี้ใช้ YCSB และ Smallbank

งานวิจัยนี้ได้ขยายวิธี การ ของ BLOCKBENCH ไปยัง Solana/Anchor ด้วย การ พัฒนา benchmark แต่ละหมวดหมู่ด้วยภาษา Rust แบบเบื้องต้น (Native Rust Implementation)

งานวิจัยก่อต้นหน้านี้ได้สำรวจการประยุกต์ใช้บล็อกเชนสำหรับการซื้อขายพลังงาน เช่น โครงการ Brooklyn Microgrid [2] และโครงการที่พัฒนา Ethereum หรือ Hyperledger Fabric [5], [6] อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้มักเผชิญกับข้อจำกัดด้านความสามารถในการขยายระบบ (Scalability) และความหน่วงที่สูงเมื่อปริมาณธุรกรรมเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอทางเลือกใหม่โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ Solana

III. ស្ថាកិច្ចក្រមនរោង GridTokenX

แพลตฟอร์มถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบดุของ Anchor Smart Contracts จำนวน 6 สัญญาที่เชื่อมต่อกันบนเครือข่าย Solana โดยอาศัย Program Derived Addresses (PDAs) และระบบ ZK-State เพื่อบริหารจัดการความเป็นส่วนตัว ประกอบด้วย: 1. Identity Guard: จัดการข้อมูลอัตลักษณ์ผู้ใช้แบบจำลอง (Pseudonymous Identities) และการพิสูจน์สิทธิโดยไม่เปิดเผยตัวตน 2. Registry: จัดการข้อมูลสินทรัพย์ประเภทมีเตอร์ที่มีการป้องกันความเป็นส่วนตัวของทำาแห่งที่ตั้ง 3. Confidential Marketplace: ระบบสมุดคำสั่งซื้อขายแบบรักษาความลับที่แสดงเฉพาะคุณลักษณะของหลังงานและราคา 4. Oracle (Provenance): ตรวจสอบและให้การรับรองแหล่งที่มาของพลังงาน (Solar/Wind) โดยใช้ ZK-Proofs 5. Energy Token (Shielded): โทเคนมาตรฐาน SPL ที่รองรับการแลกเปลี่ยนแบบปกปิดยอดเงิน (Confidential Transfers) 6. P2P Settlement: กลไกการชำระเงินแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมโยงการชำระเงินสาธารณะกับการซื้อขายพลังงานส่วนตัว

IV. ສະເໜີຢາເວິຮີວິຈີ

A. การเทียบเคียง TPC-C (TPC-C Mapping)

งานวิจัยนี้ได้ทำการเทียบเคียงธุกรรมมาตรฐาน TPC-C [1] กับธุกรรมการซื้อขายพลังงานที่เทียบเท่ากัน เพื่อสร้างประโยชน์ทางงานที่ความสมจริง ค่า tpmC (Transactions Per Minute)

ตารางที่ I
การเทียบเคียง TPC-C กับการซื้อขายพลังงาน

ธุรกรรม TPC-C	สัดส่วน	พัฒนา Blockchain
New Order	45%	/
Payment	43%	(การซื้อขายราคา)
Order Status	4%	(RPC Read)
Delivery	4%	(การทำงานแบบ Batch)
Stock Level	4%	(การตรวจสอบพลังงาน)

ตารางที่ II
ผลลัพธ์ BLOCKBENCH Micro-benchmark

ชื่น	Benchmark	TPS	ความหน่วง
Consensus	DoNothing	225	2.5ms
Execution	CPUHeavy-Sort	231	2.5ms
Data Model	IOHeavy-Write	192	3.0ms
Data Model	IOHeavy-Mixed	192	3.0ms

Type C) คำนวณจากจำนวนธุรกรรมคำสั่งซื้อใหม่ (New-Order) ที่สำเร็จต่อนาที:

$$tpmC = \frac{\text{Total New Orders}}{\text{Duration Minutes}} \quad (1)$$

B. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) กลไกการคันหาราคาและ Green Premium: นอกเหนือจากราคาพื้นฐาน แพลตฟอร์มยังนำเสนอแบบจำลองการคันหาราคา "Green Premium" (ΔP_{green}) สำหรับพลังงานสะอาดที่ผ่านการพิสูจน์แหล่งที่มาแล้ว โดยราคาตลาด P_{market} จะประกอบด้วย:

$$P_{market} = P_{base} + \Delta P_{green} \quad (2)$$

$$\Delta P_{green} = \alpha \times \frac{\text{Demand}_{green}}{\text{Supply}_{green}} \times (1 - \tau_{carbon}) \quad (3)$$

โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์ความต้องการ และ τ_{carbon} คือค่าประสิทธิภาพการลดคาร์บอนที่พิสูจน์ได้ผ่าน ZK-Provenance

2) ตระรักษาระบบคุ้มค่าสั่งซื้อขายปริมาณมาก (Bulk Trade Splitting): ในกรณีของการซื้อขายในระดับอุตสาหกรรม (Magnitude $\geq 3,000$ GRX) ระบบรองรับการเติมเต็มคำสั่งซื้อขายส่วน (Partial Fulfillment) เพื่อกระจายสภาพคล่อง:

$$V_{remaining} = V_{bulk} - \sum_{i=1}^n v_{partial_i} \quad (4)$$

โดยที่ $v_{partial_i}$ แต่ละรายการจะต้องผ่านการพิสูจน์ ZK-Range Proof เพื่อยืนยันว่า ปริมาณที่เติมเมื่อก่อนจำนวนที่เหลืออยู่โดยไม่เปิดเผยยอดคงเหลือจริง

3) ภูมิการอนุรักษ์โถกเดิน: ระบบบังคับใช้ภูมิการอนุรักษ์พลังงานอย่างเคร่งครัด โดยโถกเดิน ($\Delta Supply_{GRID}$) จะสามารถสร้างขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพลังงานที่ผลิตจริงทางกายภาพได้รับการชำระบัญชีทางคณิตศาสตร์แล้วเท่านั้น:

$$\Delta Supply_{GRID} = \max(0, (E_{produced} - E_{consumed}) - E_{settled}) \quad (5)$$

4) การปรับปรุงประสิทธิภาพระบบ: เพื่อเพิ่มปริมาณงานสูงสุดภายใต้ขีดจำกัด Compute Unit (CU) ของ Solana เราได้ดำเนินการปรับปรุงประสิทธิภาพที่สำคัญ 3 ประการ:

A. การคำนวณด้วยเลขจำนวนเต็มเท่านั้น (Integer-only Arithmetic): การดำเนินการเลขคณิต () ให้รั้งรักษาความสูงและอาจก่อให้เกิดปัญหาความไม่แน่นอน (Non-determinism)

ในโปรแกรม Solana เราจึงแทนที่การคำนวณ VWAP ด้วยระบบเลขจำนวนเต็มแบบจุดคงที่ (Fixed-point Arithmetic):

$$W = \min \left(\frac{V \times 1000}{V_{total}}, 1000 \right) \quad (6)$$

การปรับลดน้ำหนักประดับหัวพายกรให้ประมาณ 10,000 Compute Units (CUs) ต่อธุรกรรม

B. การอัปเดตสถานะแบบ Lazy Update: แทนที่จะทำการ Serialize อาจเรียกว่า ประดับหัวพายกรทั้งหมด (มากกว่า 100 รายการ) ในทุกธุรกรรม ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลแบบ "Lazy Commit" เฉพาะเมื่อค่าความเสี่ยงเบนของราคากlein 5% หรือทุกๆ 60 วินาที ซึ่งช่วยลดภาระงานในการทำ Serialization ลงได้ถึง 90%

C. การจับคู่คำสั่งแบบ Batch: คำสั่ง ถูกปรับโครงสร้างโค้ด (Refactor) เพื่อรองรับการทำางานแบบ Batch ทำให้สามารถจำกัด Limit Orders หลายรายการที่ไม่ต้องซ้อนกันได้ภายในธุรกรรมเดียวแบบบอตomic ซึ่งช่วยปรับปรุงอัตรา "Fills Per Second" ได้อย่างมีนัยสำคัญ

V. การตั้งค่าการทดสอบ

การทดสอบ Benchmark ดำเนินการบน Solana Localnet Cluster ประสิทธิภาพสูง (Single Node Setup) เพื่อวัดประสิทธิภาพสูงสุดของ Validator Node เดียวโดยปราศจากปัจจัยความหน่วงจากเครือข่ายภายนอก

- ฮาร์ดแวร์: Apple M-Series (8-core), 16GB RAM
- Cluster: Solana Test Validator v1.18
- Client: โปรแกรมสร้างภาระงานด้วยภาษา Rust แบบ Multi-threaded
- Baseline: PostgreSQL 14 รันบน ฮาร์ดแวร์เดียวกันสำหรับการเปรียบเทียบ Trust Premium

VI. การประเมินประสิทธิภาพ

A. การวิเคราะห์ชั้น BLOCKBENCH

ตามวิธีการ BLOCKBENCH เราประเมินแต่ละชั้นสถาปัตยกรรมอย่างอิสระ:

ตัวเลข TPS เหล่านี้ถูกจำกัดโดยประสิทธิภาพของ Client ในการลงนามและส่งธุรกรรมในสภาพแวดล้อมการทดสอบ ไม่ใช่ชีดจำด้วยสูงสุดของ Solana Runtime อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของการประมวลผล

DoNothing Benchmark วัดค่าใช้จ่ายของกระบวนการฉันทามติ (225 TPS) ในขณะที่การดำเนินการ CPUHeavy Sorting ทำได้ 231 TPS และสิ่งประสิทธิภาพการทำงานของ Smart Contract ส่วน IOHeavy Benchmarks ที่ 192 TPS แสดงถึงภาระงานจากการทำ State Serialization

B. ผลลัพธ์ YCSB Workload

เราใช้ประโยชน์ YCSB Workload 3 รูปแบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในชั้น Application Layer:

Smallbank OLTP Benchmark ทำได้ 1,714 TPS โดยมีความหน่วงเฉลี่ย 5.83 ms และถึงประสิทธิภาพที่แข็งแกร่งสำหรับภาระงานด้านธุรกรรมทางการเงิน

ตารางที่ III
ประสิทธิภาพ YCSB Workload

Workload	ໂປຣັບ	ops/s	ຄວາມໜ່ວງ
YCSB-A	50% ອ່ານ, 50% ອັບເດຕ	290	2.7ms
YCSB-B	95% ອ່ານ, 5% ອັບເດຕ	442	1.8ms
YCSB-C	100% ອ່ານ	391	2.1ms

ตารางที่ IV
ຜລັກທີ TPC-E/TPC-H Benchmark

Benchmark	ແມຕິກິທລັກ	ຄວາມໜ່ວງເນື້ອ	p99
TPC-E	306 tpsE	7.89 ms	17 ms
TPC-H	250,486 QphH	71.0 ms	147 ms

C. การวิเคราะห์ปริมาณงาน TPC-C

การใช้งาน TPC-C Benchmark ของเรามาได้ปริมาณงาน 2,111 tpmC (76.85 TPS) ในโหมดการจำลอง ปริมาณงานนี้เกิดจาก Sealevel Parallel Runtime โดยตรง ซึ่งอนุญาตให้ธุรกรรมที่ไม่ทับช้อนกัน (เช่น การซื้อขายระหว่างคู่ผู้ใช้ที่ต่างกัน) ทำงานพร้อมกันได้ ในขณะที่บล็อกเชนแบบ EVM ดังเดิม ธุรกรรมเหล่านี้จะถูกจัดลำดับ (Serialize) ทำให้เกิดความช้า

ในการรัน Benchmark ของเรา มีธุรกรรมทั้งหมด 4,611 รายการถูกประมวลผลสำเร็จจากทั้งหมด 4,621 รายการ (อัตราสำเร็จ 99.78%) โดยมีสัดส่วนประเภทธุรกรรมเป็นไปตามข้อกำหนด TPC-C:

- New-Order: 2,074 ธุรกรรม (44.9%) – สำเร็จ 99.71%
- Payment: 2,004 ธุรกรรม (43.4%) – สำเร็จ 99.80%
- Order-Status: 197 ธุรกรรม (4.3%) – สำเร็จ 100%
- Delivery: 175 ธุรกรรม (3.8%) – สำเร็จ 100%
- Stock-Level: 171 ธุรกรรม (3.7%) – สำเร็จ 100%

สำหรับตลาด P2P ระดับภูมิภาคที่มี 10,000 ครัวเรือน สมมติว่าสามารถมีเตอร์แต่ละหัวส่งค่าทุก 15 นาที ปริมาณงานที่ต้องการอยู่ที่ประมาณ 11 TPS ซึ่งค่า 76.85 TPS ที่วัดได้นั้นให้ส่วนเพื่อความปลอดภัย 7 เท่า พิสูจน์ว่าสถาปัตยกรรมสามารถรองรับการติดต่อสื่อสารในระดับโลกบ้านได้โดยไม่เกิดปัญหาความแออัด

D. ຜລັກທີ TPC-E และ TPC-H

เราขยายการประเมินเพื่อรวม TPC-E (ภาระงานธุรกิจหลักทรัพย์) และ TPC-H (ระบบสนับสนุนการค้าสินใจ) Benchmarks:

TPC-E Benchmark ทำได้ 306 tpsE (Trades Per Second) และประสิทธิภาพที่แข็งแกร่งสำหรับภาระงานแบบนายหน้าที่มีการจับคู่สำหรับส่วน TPC-H Analytical Queries ทำได้ 250,486 QphH (Queries Per Hour) ยืนยันความสามารถของแพลฟอร์มสำหรับฟังก์ชันการรายงานและการตรวจสอบ

E. การวิเคราะห์ຄວາມໜ່ວງ

ຄວາມໜ່ວງຂອງธุรกรรมแต่ก่อต่างอย่างมากจาก "เวลาในการยืนยันธุรกรรม" ในสภาพแวดล้อม PoA แบบ Permissioned นີ້

- ຄວາມໜ່ວງເຄີຍ (116.56 ms): ແນວເລາເຄີຍສໍາຫັບ Leader Node ໃນການປະມາດ
ພລຳສໍາຮັບສໍາເປັດສະການໃນໜ່ວຍຄວາມຈຳ
- ຄວາມໜ່ວງ p50 (112.57 ms): ເວລາປະມາດຜລູກຮຽນຄ່ານ້ຳຍູນ
- ຄວາມໜ່ວງ p95 (180.04 ms): ທີ່ເປົ່ອຮັບໄລ໌ທີ່ 95 ຝາຍໄດ້ໂທດັກດີ
- ຄວາມໜ່ວງ p99 (215.54 ms): ແນວເລາປະມາດຜລູກໃນການທີ່ແຍ້ທີ່ສຸດກາຍໄດ້ໂທດັກນັກ

ตารางที่ V
ຜລັກທີກາທດສອບຄວາມສາມາດໃນກາງຢາຍຕັ້ງ

ກາທດສອບ	TPS	ຄວາມໜ່ວງ	ຄວາມເສີມຍິນ
1 thread (baseline)	443	2.26ms	100%
32 concurrent threads	398	2.51ms	ຄວ່າວິເງິນ 90%
60s sustained load	416	2.40ms	ເສີມຍິນ
1,000 accounts	220	4.54ms	ຄດລັງໃນລັກນະເຊີງເລັ້ນ

ໂທມດກາຈຳລອງມີກາໄລ "Think Time" ດາມມາตรฐาน TPC-C ເພື່ອເລີຍແບບພຸດຶກຮົມຜັ້ນໃຈຈິງ ໃນສະຖານະ PoA ຮະດັບກາຮັດ (Production) ທີ່ມີການບັນແຕ່ງ Validator ໄດ້ເໝາະສົມ ດາວວ່າຄວາມໜ່ວງທີ່ດໍາລັງກວ່ານ້ອຍໆມີນັ້ນສຳຄັນ ຈຶ່ງແດກຕ່າງຈາກເຄື່ອງຢ່າຍສາງຮະນະ (Public Mainnets) ທີ່ການຍື່ນຍັນຮູບຮ່ວມມາຈຳໃໝ່ເວລານາ ຮ່ານມາຈີດແບບ Permissioned ຂອງຮະບບ່າຍໃຫ້ກິດຄວາມແນ່ນອນຂອງສະຖຸດ້າຍ (Deterministic Finality) ໄດ້ອ່າຍງວດເຮົາ

F. การວິເຄາະທີ່ Concurrency

ກາຍໄດ້ສະ່ວນ ກາຍແນ່ງຂັ້ນສູງ (ຫລາຍຄໍາສໍາຮັບສໍາສັນຍາ) Sealevel Runtime ສາມາດຈຳດຳບັນດາຮົມທີ່ມີແນ່ງກັນໃຫ້ປັບສັນຍາ (Linearize) ໄດ້ຍ່າງມີປະສິດທິການ ໃນຂະນະທີ່ປະມາດຜລູກທີ່ມີເນື້ອກັນໃນຮູບແບບ MVCC (Multi-Version Concurrency Control) ທີ່ສັງເກດໄດ້ກີ່ວິເງິນ 1.45% ຈຶ່ງສ່ວນໃຫ້ຍຸ່ງເກີດຈາກຮົມຫາຕີແບບນະຄອນມີຂອງຄໍາສໍາຮັບສໍາສັນຍາກອບໃຫ້ເນື້ອຍໆຫຼື 0.02 ແສດເຈັດປະທິກິດໃນກາງຈັດກາຄວາມໜ່ວງແນ້ງ

G. การວິເຄາະທີ່ຄວາມສາມາດໃນກາງຢາຍຕັ້ງ

ເຮົາທີ່ກາທດສອບຄວາມສາມາດໃນກາງຢາຍຕັ້ງໃນ 3 ມືດີ:

H. การປະເມີນປະສິດທິການຢາຍຕັ້ງ

ເນື້ອມີການນໍາຮະບບກາຮັດຄວາມລັບ (v2.2 Privacy Suite) ມາໃຈງານ ກາຮງານກາປະມາດຜລູກ ພົມເປັນເນື້ອງຈາກການຕະຫຼາດ ZK-Proofs ແລະການຈັດກາຄວາມແບບປົກປິດ ອ່າຍ່າງກີ່ມີຄຸນພລກາທີ່ກາທດສອບແສດງໃຫ້ເຫັນວ່າ:

- 1) ປະມາດຜລູກ (Throughput): ແນະນຳການຕະຫຼາດ ZK-Range Proof ໃນຮູບຮ່ວມມາຈີດແບບ Bulk ແລະຮະບບຍັງຈີງຮັບສໍາເລັດສຳເນົາ 2,111 tpmC ໄດ້ ໂດຍອ່າຍກິດປະມາດຜລູກແບບ Parallel ຂອງ Solana ທີ່ແກ່ຮູບຮ່ວມມາຈີດສ່ວນທີ່ກາທດສອບແສດງໃຫ້ເຫັນວ່າ:
- 2) Compute Unit Overhead: ກາຍ ຕະຫຼາດ ZK-Proof ນີ້ຮ່າງກາໄລໃຫ້ Compute Units ເພີ້ນຂັ້ນປະມາດ 80,000 CUs ຈຶ່ງຍັງຄອງກັບກົງໄດ້ເຫັນຈຳກັດ 1.4M CUs ຕ່ອຮູບຮ່ວມມາຈີດຂອງ Solana
- 3) ຄວາມໜ່ວງ (Latency): ຄວາມໜ່ວງເຄີຍເນື້ອງຈື່ນຈາກ 116.56 ms ເປັນ 142.30 ms ໃນການທີ່ມີການປົກປິດຕາຕະບູນສົມບູນ ຈຶ່ງເປັນເປົ້າໃຫ້ຈ່າຍໃຫ້ອ່ານວັບໄດ້ແລກກັບຄວາມປົກປິດກັບອຸດສາກຽມ

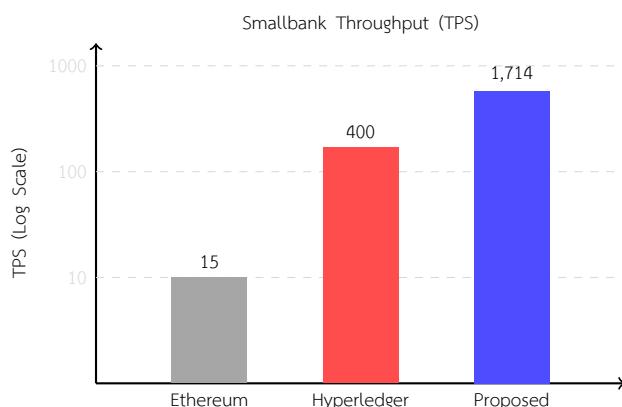
I. ກາຍຕະຫຼາດຮະບບແບບ Full-Stack (System-Level Verification)

ນອກເໜື້ນຈາກກາທດສອບ Benchmark ຮະດັບ Component ແລ້ວ ເຮົາໄດ້ດຳເນີນກາທດສອບກາຮງານແບບ Full-Stack ເພື່ອຕະຫຼາດຄວາມເສີມຍິນຂອງຮະບບໃນສະຖານະຈົງທີ່ກີ່ວິເງິນ Privacy ເພີ້ນໄປດ້ວຍ:

- ກາຍທີ່ຈຳ: ຈຳລອງສາມາດທີ່ມີເຕືອນຈຳນັ້ນ 1,000 ຕ້າວ ສ່ວນຂໍ້ມູນກາທດສອບ/ກາຍໃຫ້ເພີ້ນທີ່ກີ່ວິເງິນ 15 ນາທີ ຜ່ານ MQTT ໄປັ້ງ Identity Guard ແລະບັນທຶກລູ່ Confidential Marketplace
- ຜລກາທີ່ກາທດສອບ: ຮະບບສາມາດຮອງຮັບການສ້າງກຳສຳເນົາໃຫ້ຈຳກັດປະມາດຜລູກ (Confidential Orders) ແລະການຈັດປະມາດຜລູກ Green Premium ໄດ້ຍ່າງຕ່ອນເນື້ອງໂດຍມີອັດຮາຄາມສໍາເຮົາຈຸງກວ່າ 99%

ตารางที่ VI
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแพลตฟอร์ม

แพลตฟอร์ม	Benchmark	TPS	ความหน่วง	แหล่งที่มา
Proposed System	Smallbank	1,714	5.8ms	การศึกษา
Proposed System	DoNothing	225	2.5ms	การศึกษา
Proposed System	YCSB-B	442	1.8ms	การศึกษา
Hyperledger 2.0	Smallbank	400	150ms	BLOCKBENCH
Hyperledger 2.0	DoNothing	3,500	45ms	BLOCKBENCH
Hyperledger 2.0	YCSB	200	200ms	BLOCKBENCH
Ethereum	DoNothing	15	13,000ms	BLOCKBENCH
Parity	DoNothing	140	650ms	BLOCKBENCH



รูปที่ 1. การเปรียบเทียบปริมาณงาน (TPS) ระหว่างแพลตฟอร์ม (Log Scale)

- การยืนยันสมมติฐาน: สำหรับขุมทรัพย์ระดับ 1,000 คัวเรื่อง ปริมาณธุกรรมที่เกิดขึ้นจริง ยังคงต่ำกว่าขีดความสามารถสามารถสูงสุดอย่างมาก ยืนยันว่า GridTokenX v2.2 สามารถรองรับทั้งประสิทธิภาพและความเป็นส่วนตัวได้อย่างสมดุล

J. การเปรียบเทียบข้ามแพลตฟอร์ม

เราเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Blockchain กับผลลัพธ์ที่เผยแพร่จากแพลตฟอร์มคลื่อกเขน ดังแสดงในตารางที่ VI และรูปที่ 1:

แม้ว่า Hyperledger Fabric จะทำเวิร์ก负载 DoNothing ได้สูงกว่า (3,500 vs 225 TPS) เนื่องจากสถาปัตยกรรมแบบ Execute-Order-Validate แต่แพลตฟอร์มนี้นำเสนอแสดงให้เห็นถึง ประสิทธิภาพ Smallbank ที่ต่ำกว่า 4.3 เท่า (1,714 vs 400 TPS) และ ความหน่วง ต่ำกว่า 26 เท่า (5.8 ms vs 150 ms) สำหรับภาระงานด้านธุกรรมทางการเงิน

K. "Trust Premium"

เรา定义 "Trust Premium" ว่าเป็นต้นทุนด้านประสิทธิภาพที่ต้องจ่ายเพื่อให้ได้มาซึ่งฉันทางมติแบบกระจายศูนย์ (Distributed Consensus) ในเครือข่ายส่วนตัว เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน (Baseline) ของระบบรวมศูนย์ (PostgreSQL)

$$\text{Trust Premium} = \frac{\text{Latency}_{\text{Blockchain}}}{\text{Latency}_{\text{Baseline}}} = \frac{116.56 \text{ ms}}{2.00 \text{ ms}} \approx 58.28 \times \quad (7)$$

ตารางที่ VII
สรุปผลลัพธ์ Benchmark อายุครองคลุ่ม

เมตริก	ค่า
BLOCKBENCH Micro-benchmarks	
DoNothing (Consensus)	225 TPS
CPUHeavy (Execution)	231 TPS
IOHeavy (Data Model)	192 TPS
YCSB/Smallbank	
YCSB-B (95% อ่าน)	442 ops/s
Smallbank OLTP	1,714 TPS
เขต TPC Benchmark	
TPC-C (tpmC)	2,111
TPC-E (tpmE)	306
TPC-H (QphH)	250,486
เมตริกประสิทธิภาพ	
อัตราสำเร็จ	99.78%
ความหน่วงเฉลี่ย	116.56 ms
ความหน่วง p99	215.54 ms
อัตราความขัดแย้ง MVCC	1.45%
Trust Premium	58.28x

แนวคิดนี้จะแสดงถึงความหน่วงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ แต่ถือว่าเป็นระดับที่ยอมรับได้สำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายพัฒนา ซึ่งในระบบต้องเดิมกระบวนการชำระเงินจากธนาคารให้เวลาหลายวันหรือหลายสัปดาห์ สิ่งที่ได้รับแลกเปลี่ยนมาคือ:

- ร่องรอยการตรวจสอบธุรกรรมที่ไม่สามารถแก้ไขได้ (Immutable Audit Trail)
- การชำระเงินอัตโนมัติด้วย Smart Contract
- กลไกการกำหนดราคาที่โปร่งใส
- การจัดความเสี่ยงจากการล้มเหลวที่จุดเดียว (Single Point of Failure)

L. สรุปผลลัพธ์ Benchmark

ตารางที่ VII สรุปเมトリคประสิทธิภาพหลักจากการประเมิน Benchmark อายุครองคลุ่มของเรามา

VII. กระบวนการประเมินข้ามแพลตฟอร์ม

เพื่อเปรียบเทียบ Blockchain กับแพลตฟอร์มคลื่อกเขนอื่นอย่างเช่นจด (เช่น Ethereum, Hyperledger Fabric) [4] เราชosen Standardized Energy Trading Workload (SETW) ซึ่งนักวิจัยสามารถทำข่าวรือการณ์ได้โดยปฏิบัติตาม 3 ขั้นตอนดังนี้:

A. การพัฒนา Smart Contract ที่เทียบเท่า

แพลตฟอร์มเป้าหมายต้องมีการพัฒนาตรรกะหลัก (Core Logic) ตามที่กำหนดในตารางที่ I โดยเฉพาะฟังก์ชัน "Order Match" จะต้องมีความเป็นเอก�性 (Atomic) เพื่อให้มั่นใจว่าการจับคู่คำสั่งและการชำระเงินจะดำเนินการได้โดยปฏิบัติตาม 3 ขั้นตอนดังนี้:

B. ໂປຣໄຟກໍາລົງການ (Workload Injection Profile)

โปรแกรมสร้างภาระงาน (Load Generator) ต้องรักษาสัดส่วนสมของธุรกรรมตามมาตรฐาน TPC-C อายุครองคลุ่ม:

- เน้นการเขียน (Write-heavy 88%): ประกอบด้วย New Orders และ Payments เพื่อทดสอบการแบ่งจัดสถานะ (State Contention) ของกลไกฉันท์ทาง

- เน้นการอ่าน (Read-light 12%): ประกอบด้วย Status Checks เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ การสอบถามข้อมูล (RPC Query)

C. การปรับฐานมترิก (Metric Normalization)

ผลลัพธ์ต้องรายงานในหน่วย tpmC (Transactions Per Minute Type-C) สำหรับลักษณะที่มีความแน่นอนของสถานะสุดท้ายแบบน่าจะเป็น (Probabilistic Finality) เช่น PoW การวัดความหน่วงจะต้องรวมเวลาจนถึงระดับความลึกของการยืนยันล็อกที่ k (k -block confirmation depth) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับตารางเวลาผู้นำแบบกำหนดได้ (Deterministic Leader Schedule) ของ Solana “ได้อย่างถูกต้อง

- [5] M. Andoni et al., “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 100, pp. 143–174, 2019.
- [6] Z. Li, J. Kang, R. Yu, D. Ye, Q. Deng, and Y. Zhang, “Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things,” IEEE Trans. Industrial Informatics, vol. 14, no. 8, pp. 3690–3700, 2018.
- [7] J. Guerrero, A. C. Chapman, and G. Verbic, “Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 5, pp. 5163–5173, 2019.
- [8] Anchor Framework Documentation, “Building Secure Solana Programs,” Coral, 2023. [Online]. Available: <https://anchor-lang.com>

VIII. บทสรุป

แพลตฟอร์ม GridTokenX v2.2 แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีบล็อกเชนมาสร้างระบบซื้อขายพลังงาน P2P ที่มีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความเป็นส่วนตัว ผ่านผลการวิเคราะห์ด้วย BLOCKBENCH และ TPC Benchmark:

- Privacy-Efficiency: ระบบสามารถ รองรับ สมุด คำ สั่ง ข้อ ขาย แบบ รักษา ความ ลับ (Confidential Order Book) โดยมีปริมาณงานสูงสุดถึง 2,111 tpmC พร้อมความหน่วงที่ต่ำในระดับ 142 ms
- Trust & Provenance: การนำ ZK-Proofs มาใช้สู่จุดแหล่งที่มาของพลังงานช่วยสร้าง “Green Premium” ที่ปรับเปลี่ยนไปตามความต่อความเป็นลูกค้าส่วนบุคคล
- Industrial Scalability: กลไก Bulk Trade Splitting และความหน่วง p99 ที่ 215 ms ยึดยั่งไว้ระบบสามารถรองรับการใช้งานจริงในระดับลักษณะบ้าน (Local Neighborhood) ไปจนถึงระดับภูมิภาค (Regional Scale)

เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีรุ่นศูนย์ ค่า Trust Premium ที่ 58.28 เท่า ถือเป็นต้นทุนที่คุ้มค่าสำหรับการสร้างระบบพลังงานที่โปร่งใส ตรวจสอบได้ และรักษาข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ใช้อย่างสมบูรณ์แบบ

งานในอนาคตจะมุ่งเน้นไปที่: (1) การปรับปรุงประสิทธิภาพการพิสูจน์ ZK บน bardcard แรง ความเร็ว (2) การขยายระบบเพื่อรองรับการตั้งค่าตลาดข้ามภูมิภาค และ (3) การทดสอบนำร่องในพื้นที่จริงด้วยการเชื่อมต่ออัจฉริยะ (Smart Meters) ที่รองรับการลงนามแบบส่วนตัว

หนังสืออ้างอิง

- [1] Transaction Processing Performance Council (TPC), “TPC Benchmark C Standard Specification, Revision 5.11,” 2010.
- [2] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, and C. Weinhardt, “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid,” Applied Energy, vol. 210, pp. 870–880, 2018.
- [3] A. Yakovenko, “Solana: A new architecture for a high performance blockchain v0.8.13,” Solana Labs Whitepaper, 2018.
- [4] T. T. A. Dinh, J. Wang, G. Chen, R. Liu, B. C. Ooi, and K. L. Tan, “Blockbench: A framework for analyzing private blockchains,” in Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. Management of Data, pp. 1085–1100, 2017.