

การพัฒนาระบบจัดการซื้อขายพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Peer-to-Peer โดยใช้ Solana Smart Contract

(Anchor Framework ในสภาพแวดล้อมแบบ Permissioned)

นายจันทร์วัฒน์ กิริยาดี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
2410717302003@live4.utcc.ac.th

บทคัดย่อ—บทความนี้นำเสนอ การประเมินประสิทธิภาพอย่างครอบคลุมของ GridTokenX ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer (P2P) บน/granary ศูนย์ที่สร้างบน Solana cluster แบบส่วนตัว เราใช้วิธีการ BLOCKBENCH (SIGMOD 2017) สำหรับการวิเคราะห์แบบชั้นต่อชั้น อย่างเป็นระบบ ร่วมกับการตัดแปลง TPC-C benchmark สำหรับการประเมินภาระงานจริง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มสามารถทำได้ 2,111 tpmC (transactions per minute Type C) โดยมีค่าเฉลี่ยความหน่วง 116ms และระบุ "Trust Premium" ที่ 58.28 เท่า เมื่อเทียบกับระบบรวมศูนย์ BLOCKBENCH micro-benchmarks แสดงว่ามีเวลาของ consensus layer ที่ 225 TPS, execution layer ที่ 231 TPS และ data model layer ที่ 192 TPS การวิเคราะห์ YCSB workload แสดง 442 ops/s สำหรับภาระงานที่อ่านมาก นอกจากนี้ยังอธิบายการปรับปรุงระบบตัวโดยเฉพาะ รวมถึงการคำนวณแบบจำานวนเต็มเท่านั้นและการอัปเดตสถานะแบบ lazy ที่ช่วยเพิ่มปริมาณงานขณะรักษาค่าคงที่ทางคณิตศาสตร์อย่างเข้มงวดสำหรับการอนุรักษ์พลังงาน

Index Terms—บล็อกเชน, การซื้อขาย พลังงาน, Solana, TPC-C, BLOCKBENCH, YCSB, การทดสอบประสิทธิภาพ, Smart Contracts

I. บทนำ

การกระจายศูนย์ของระบบพลังงานผ่านทรัพยากรพลังงานแบบกระจาย (Distributed Energy Resources หรือ DERs) ต้องการโครงสร้างพื้นฐานการซื้อขายที่แข็งแกร่งสามารถจัดการธุรกรรมขนาดเล็กความถี่สูงได้ [2] รูปแบบสารสนเทศแบบตั้งเดิมประสบปัญหาความเสี่ยงจุดล้มเหลวเดียวและขาดความโปร่งใสในการกำหนดราคา เทคโนโลยีบล็อกเชนเสนอทางออกแต่มักถูกวิพากษ์วิจารณ์เรื่องข้อจำกัดด้านความสามารถในการขยายตัว [4]

งานวิจัยนี้ประเมิน GridTokenX ซึ่งใช้ประโยชน์จาก Sealevel parallel runtime ของ Solana [3] เพื่อเอาชนะคوخัดเหล่านี้ วัตถุประสงค์ของ การศึกษานี้คือ:

- เพื่อศึกษาและนำเสนอด้านสถาปัตยกรรมของระบบจัดการซื้อขายพลังงาน P2P โดยใช้ Solana (Anchor) ในสภาพแวดล้อม Permissioned (PoA)

- เพื่อพัฒนาและพิสูจน์แนวคิด (Proof-of-Concept) ของระบบด้วยแบบที่สามารถจัดการแลกเปลี่ยน GRID Token โดยใช้ AMI Simulator
- เพื่อประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพโดยใช้การวิเคราะห์ชั้น BLOCKBENCH และชุด TPC benchmark

II. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง: วิธีการ BLOCKBENCH

BLOCKBENCH [4] ให้กรอบการทำงานอย่างเป็นระบบสำหรับการประเมินประสิทธิภาพลีกอัชันส่วนตัวผ่านสิ่งที่ชั้นสถาปัตยกรรม:

- Consensus Layer:** วัดค่าใช้จ่าย consensus บริสุทธิ์ผ่านการทำงาน DoNothing
- Execution Layer:** ประเมินการคำนวณ smart contract ผ่านภาระงานที่ใช้ CPU มาก
- Data Model Layer:** ทดสอบประสิทธิภาพการอ่าน/เขียนสถานะโดยใช้ IOHeavy benchmarks
- Application Layer:** การจัดการภาระงานจริงโดยใช้ YCSB และ Smallbank

เราย้ายวิธีการ BLOCKBENCH ไปยัง Solana/Anchor ด้วยการใช้งาน Rust ดังเดิมของแต่ละหมวดหมู่ benchmark

III. สถาปัตยกรรมระบบ

แพลตฟอร์มถูกใช้งานเป็นชุดของท้า Anchor smart contracts ที่เชื่อมต่อกันบน Solana:
1. **Registry:** จัดการตัวตนผู้ใช้และทรัพย์สินมีเตอร์
2. **Oracle:** ตรวจสอบข้อมูลเชื่อมต่อเครือข่าย
3. **Energy Token:** โทเคนที่เป็นไปตาม SPL แทน 1 kWh
4. **Trading:** order book และเครื่องมือการชำระราคา
5. **Governance:** การกำหนดค่าและพารามิเตอร์ DAO

IV. วิธีการ

A. การแมป TPC-C

เราแมปธุรกรรม TPC-C มาตรฐาน [1] กับการซื้อขายพลังงานที่เทียบเท่าเพื่อสร้างโปรไฟล์ภาระงานที่สมจริง:

ตารางที่ I
การแมป TPC-C กับการซื้อขายพลังงาน

ธุรกรรม TPC-C	สัดส่วน	ฟังก์ชัน GridTokenX
New Order	45%	create_sell_order / create_buy_order
Payment	43%	transfer_tokens (การชำระเงิน)
Order Status	4%	get_order_status (RPC Read)
Delivery	4%	match_orders (การทำงานแบบ Batch)
Stock Level	4%	get_balance (การตรวจสอบคงเหลือ)

B. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) กลไกการกำหนดราคา VWAP: เพื่อให้มั่นใจในมูลค่าตลาดที่เป็นธรรม แพลตฟอร์มใช้อัลกอริทึมการค้นหาราคาถ้วนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักปริมาณ (VWAP) ราคา clearing $P_{clearing}$ คำนวณแบบดีนามิก:

$$P_{base} = \frac{P_{bid} + P_{ask}}{2} \quad (1)$$

$$P_{clearing} = P_{base} + \left(P_{base} \times \min \left(\frac{V_{trade}}{V_{total}}, 1.0 \right) \times \delta_{max} \right) \quad (2)$$

โดยที่ V_{trade} คือปริมาณการจับคู่ปัจจุบัน, V_{total} คือปริมาณในอดีต และ δ_{max} คือปัจจัยความเสียหายน้ำหนักสูงสุด (10%)

2) ค่าคงที่การอนุรักษ์ໂທเค็น: ระบบบังคับใช้การอนุรักษ์พลังงานอย่างเข้มงวด ໂທเค็น ($\Delta SupplyGRID$) สามารถสร้างได้เฉพาะเมื่อพลังงานที่ผลิตทางกายภาพถูกำไรทางคณิตศาสตร์:

$$\Delta SupplyGRID = \max(0, (E_{produced} - E_{consumed}) - E_{settled}) \quad (3)$$

3) การปรับปรุงระบบ: เพื่อเพิ่มปริมาณงานสูงสุดภายในชีด จำกัด Compute Unit (CU) ของ Solana เราใช้การปรับปรุงสำคัญสามประการ:

A. การคำนวณแบบจำนวนเต็ม เท่านั้น: การดำเนินการจุดศูนย์ (f64) มีค่าใช้จ่ายคำนวณสูงและไม่แนะนำในโปรแกรม Solana เราแทนที่การคำนวณ VWAP ด้วยคณิตศาสตร์จุดคงที่จำนวนเต็ม:

$$W = \min \left(\frac{V \times 1000}{V_{total}}, 1000 \right) \quad (4)$$

การลดน้ำหนักต่อไปนี้ได้ประมาณ 10,000 CUs ต่อการทำธุรกรรม

B. การอัปเดตสถานะแบบ Lazy: แทนที่จะ serialize รายการประจำวันที่ราคาทั้งหมด (100+ รายการ) ทุกธุรกรรม การอัปเดตจะถูก "commit"

แบบ "lazy" เฉพาะเมื่อการเปลี่ยนแปลงเกิน 5% หรือทุก 60 วินาที ซึ่งลดค่าใช้จ่าย serialization ลง 90%

C. การจับคู่คำสั่งแบบ Batch: คำสั่ง match_orders ถูก refactor เพื่อจัดการการทำงานแบบ batch ทำให้สามารถจำกัด orders หลายรายการที่ไม่ทับซ้อนกันในธุรกรรมของตัวมิกเดียว ปรับปรุงอัตรา "fills per second" อย่างมีนัยสำคัญ

V. การตั้งค่าการทดสอบ

Benchmarks ดำเนินการบน Solana localnet cluster ประสิทธิภาพสูงเพื่อขัดตัวแปรความหน่วงอินเทอร์เน็ต

- ฮาร์ดแวร์: Apple M-Series (8-core), 16GB RAM
- คลัสเตอร์: Solana Test Validator v1.18
- ลูกค้า: ตัวสร้างภาระงาน Rust แบบ multi-threaded

VI. การประเมินประสิทธิภาพ

A. การวิเคราะห์ชั้น BLOCKBENCH

ตามวิธีการ BLOCKBENCH เราประเมินแต่ละชั้นสถาปัตยกรรมอย่างอิสระ:

ตารางที่ II ผลลัพธ์ BLOCKBENCH Micro-benchmark			
ชั้น	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

DoNothing benchmark วัดค่าใช้จ่าย consensus บริสุทธิ์ (225 TPS) ในขณะที่การดำเนินการ CPUHeavy sorting ทำได้ 231 TPS และการทำงาน smart contract ที่มีประสิทธิภาพ IOHeavy benchmarks ที่ 192 TPS และค่าใช้จ่ายของ state serialization

B. ผลลัพธ์ YCSB Workload

เราใช้สามโปรไฟล์ YCSB workload เพื่อประเมินประสิทธิภาพ application-layer:

ตารางที่ III ประสิทธิภาพ YCSB Workload			
Workload	โปรไฟล์	ops/s	ความหน่วง
YCSB-A	50% อ่าน, 50% อัปเดต	290	2.7ms
YCSB-B	95% อ่าน, 5% อัปเดต	442	1.8ms
YCSB-C	100% อ่าน	391	2.1ms

Smallbank OLTP benchmark ทำได้ 1,714 TPS โดยมีความหน่วงเฉลี่ย 5.83ms และประสิทธิภาพที่แข็งแกร่งสำหรับภาระงานทางการเงิน

C. การวิเคราะห์ปริมาณงาน TPC-C

การใช้งาน TPC-C benchmark ของเราทำได้ปริมาณงาน 2,111 tpmC (76.85 TPS) ในโหมดจำลอง ปริมาณงานนี้เกิดจาก Sealevel parallel runtime โดยตรง ซึ่งอนุญาตให้ธุรกรรมที่ไม่ทับช้อนกัน (เช่น การซื้อขายระหว่างคู่ผู้ซื้อที่ต่างกัน) ทำงานพร้อมกัน ในแบบล็อกเชนแบบ EVM ดังเดิม ธุรกรรมเหล่านี้จะถูก serialize ทำให้เกิดความชัด

ในการรัน benchmark ของเรา มีธุรกรรมทั้งหมด 4,621 รายการถูกประมวลผลโดย 4,611 รายการสำเร็จ (อัตราสำเร็จ 99.78%) ส่วนผสมธุรกรรมเป็นไปตามข้อกำหนด 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 สมมติว่าสามารถมีเตอร์แต่ละตัวส่งค่าทุก 15 นาที ปริมาณงานที่ต้องการประมาณ 11 TPS 76.85 TPS ที่สังเกตได้ให้ ส่วนเพื่อความปลอดภัย 7 เท่า พิสูจน์ว่า สถาปัตยกรรมสามารถจัดการการติดตั้งระดับลักษณะบ้านได้โดยไม่มีความแออัด

D. ผลลัพธ์ TPC-E และ TPC-H

รายงานการประเมินเพื่อรวม TPC-E (ภาระงานนายหน้า) และ TPC-H (การสนับสนุนการตัดสินใจ) benchmarks:

ตารางที่ IV
ผลลัพธ์ TPC-E/TPC-H Benchmark

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

TPC-E benchmark ทำได้ 306 tpsE (trades per second) แสดงประสิทธิภาพที่แข็งแกร่งสำหรับภาระงานแบบนายหน้าที่มีการจับถือคำสั่งซึ่งช้อน TPC-H analytical queries ทำได้ 250,486 QphH (queries per hour) ยืนยันความสามารถของแพลตฟอร์มสำหรับฟังก์ชันการรายงานและการตรวจสอบ

E. การวิเคราะห์ความหน่วง

ความหน่วงธุรกรรมแตกต่างอย่างมากจาก "เวลา ยืนยัน" ในสภาพแวดล้อม PoA แบบ permissioned นี้

- 1) ความหน่วงเฉลี่ย (116.56ms): แทนเวลาเฉลี่ยสำหรับ leader node ในกระบวนการคำสั่งและอัปเดตสถานะในหน่วยความจำ
- 2) ความหน่วง p50 (112.57ms): เวลาประมวลผลธุรกรรมมั่งคั่งฐาน
- 3) ความหน่วง p95 (180.04ms): เปอร์เซ็นไทล์ที่ 95 ภายใต้โหลดปกติ
- 4) ความหน่วง p99 (215.54ms): แทนเวลาประมวลผลกรณีเลวร้ายที่สุดภายใต้โหลดหนัก

ໂທນີດ จำลอง รวม ความ ลໍາຫຼາ ເຫັນ ເພື່ອ ຈຳລອງ ພຸດຕິກຣມ ບລືອກ ເຊນ ທີ່ ສະຈົບ ໃນສະພາວແວດລົມ PoA ກາຮປິລິຕິທີ່ມີ validators ທີ່ປັບປຸງແລ້ວ ຄວາມໜ່ວງ ດາວ ຈະ ຕໍ່າ ກ່າວໆອ່າງມີນັບສຳຄັນ ໂນ່ ເໜື້ອນກັບ mainnets ສາරັນະ ທີ່ finality ຈາກໃຊ້ເວລາທາຍວິນາທີ ຮຽມໝາດີ permissioned ຂອງ GridTokenX cluster ອຸນູາດໃໝ່ deterministic finality

F. การวิเคราะห์Concurrency

ໄກຍໄດ້ການແຈ່ງຂັນສູງ (ຫລາຍຄໍາສັ່ງຕ່ອງສະຖານະຕາລາດເດືອກັນ) Sealevel runtime linearized ຊຸຽກຮົມທີ່ບັດແແຍ້ກັນອ່າງມີປະສິທິກິພາໃນຂອນທີ່ ປະມາລຸລົດຄໍາຂອງທີ່ໄຟ້ທັບໜ້ອນກັນແບບຂານ ອັດຕະການບັດແແຍ້ MVCC (Multi-Version Concurrency Control) ທີ່ສັງເກດໄດ້ກີ່ 1.45% ສ່ວນໃໝ່ ເນື່ອຈາກຮຽມໝາດີຕະຫຼອດມີກອງຄຳສັ່ງ match_orders ຈຳນວນຄັ້ງກາລອງໃໝ່ເຂົ້າລື່ອງກີ່ 0.02 ແສດກາຮແກ້ໄຂຄວາມບັດແແຍ້ທີ່ມີປະສິທິກິພາ

G. การวิเคราะห์ความสามรถในการขยายตัว

ເຮົາທຳການທົດສອບຄວາມສາມາດໃນການຂາຍຕັ້ງໃນສາມນິຕີ:

ตารางที่ V
ผลลัพธ์ການທົດສອບຄວາມສາມາດໃນການຂາຍຕັ້ງ

ການທົດສອບ	TPS	ຄວາມໜ່ວງ	ຄວາມເສື້ອຍ
1 thread (baseline)	443	2.26ms	100%
32 concurrent threads	398	2.51ms	ຄວ່າ 90%
60s sustained load	416	2.40ms	ເສື້ອຍ
1,000 accounts	220	4.54ms	ລດລົງແບບເບື້ອງເສັ້ນ

H. การເປົ້າຍາທີ່ຢູ່ບ້ານແພລຕິພອົມ

ເຮົາເປົ້າຍາທີ່ຢູ່ບ້ານແພລຕິພອົມ GridTokenX ກັບຜົນລົງທີ່ແພວ່ມຕ່າງໆ ແລະ ແພລຕິພອົມບລືອກເຊນອື່ນ:

ตารางที่ VI
ການເປົ້າຍາທີ່ຢູ່ບ້ານແພລຕິພອົມ

ແພລຕິພອົມ	Benchmark	TPS	ຄວາມໜ່ວງ	ແລ່ງທີ່ມາ
GridTokenX	Smallbank	1,714	5.8ms	ກາຮສຶກຂານ
GridTokenX	DoNothing	225	2.5ms	ກາຮສຶກຂານ
GridTokenX	YCSB-B	442	1.8ms	ກາຮສຶກຂານ
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

ແມ່ວ່າ Hyperledger Fabric ຈະທຳໄດ້ປິມານຳ DoNothing ສູງກວ່າ (3,500 vs 225 TPS) ເນື່ອຈາກສາປັບປຸງ execute-order-validate GridTokenX ແສດປະສິທິກິພາ Smallbank ຕີກວ່າ 4.3 ເທົ່າ (1,714 vs 400 TPS) ແລະ ຄວາມໜ່ວງຕໍ່າກວ່າ 26 ເທົ່າ (5.8ms vs 150ms) ສຳຮັບກາຮຈາກທາງເງິນ

I. "Trust Premium"

เรานิยาม "Trust Premium" เป็นต้นทุนประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นเพื่อให้บรรลุ distributed consensus ในเครือข่ายส่วนตัวเมื่อเทียบกับ baseline แบบรวมศูนย์ (PostgreSQL)

$$Trust\ Premium = \frac{Latency_{Blockchain}}{Latency_{Baseline}} = \frac{116.56ms}{2.00ms} \approx 58.28x \quad (5)$$

แม้ว่าจะแทนค่าใช้จ่ายความหน่วงเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ แต่เป็นที่ยอมรับได้สำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายพลังงานที่การชำระราคาโดยทั่วไปใช้เวลาหลายวันหรือหลายสัปดาห์ในระบบดั้งเดิม การแลกเปลี่ยนให้:

- เส้นทางการตรวจสอบธุรกรรมที่ไม่เปลี่ยนแปลง
- การชำระราคา smart contract อัตโนมัติ
- กลไกการกำหนดราคาที่โปร่งใส
- การจัดความเสี่ยงจุดล้มเหลวเดียว

J. สรุปผลลัพธ์ Benchmark

ตาราง VII สรุปเมตริกประสิทธิภาพหลักจากการประเมิน benchmark อย่างครอบคลุมของเรา

ตาราง VII
สรุปผลลัพธ์ Benchmark อย่างครอบคลุม

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

VII. กระบวนการประเมินข้ามแพลตฟอร์ม

เพื่อเปรียบเทียบ GridTokenX กับแพลตฟอร์มบล็อกเชนอื่นอย่างเช่น จาว (เช่น Ethereum, Hyperledger Fabric) [4] เราเสนอ Standardized Energy Trading Workload (SETW) นักวิจัยต้องทำตามสามขั้นตอนเพื่อทำข้ามวิธีการนี้:

A. การใช้งาน Contract ที่เทียบเท่า

แพลตฟอร์มเป้าหมายต้องใช้งาน logic หลักที่กำหนดในตาราง I โดยเฉพาะ พังก์ชัน "Order Match" ต้องเป็น atomic ให้แน่ใจว่าการทำธุรกรรมและการชำระราคาโดยเด็ดขาดเกิดขึ้นในการเปลี่ยนสถานะ cryptographic เดียวกัน

B. ปริมาณการใช้งาน

ตัวสร้างโหลดต้องรักษาส่วนผสม TPC-C ที่เฉพาะเจาะจง:

- **เขียนหนัก (88%):** New Orders + Payments สิ่งนี้เน้น state contention ของ consensus engine
- **อ่านเบา (12%):** Status checks สิ่งนี้ทดสอบประสิทธิภาพ RPC query

C. การ Normalize เมตริก

ผลลัพธ์ต้องรายงานใน **tpmC** (transactions per minute Type-C) สำหรับบล็อกเชนที่มี probabilistic finality (เช่น PoW) ความหน่วงต้องรวมเวลาถึง k-block confirmation depth เพื่อเปรียบเทียบกับ deterministic leader schedule ของ Solana

VIII. สรุป

GridTokenX แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีบล็อกเชนส่วนตัวเป็นไปได้สำหรับการซื้อขายพลังงาน P2P ใน การติดตั้งระดับภูมิภาค ผ่านการวิเคราะห์ขั้น BLOCKBENCH อย่างครอบคลุมและการประเมิน TPC benchmark:

- **Consensus Layer:** บริษัท DoNothing 225 TPS
- **Execution Layer:** การคำนวณ CPUHeavy 231 TPS
- **Data Model:** การดำเนินการสถานะ IOHeavy 192 TPS
- **Application Layer:** Smallbank 1,714 TPS, YCSB-B 442 ops/s
- **ชุด TPC:** 2,111 tpmC, 306 tpsE, 250,486 QphH

เมื่อเทียบกับ Hyperledger Fabric GridTokenX ทำได้ ประมาณงาน Smallbank สูงกว่า 4.3 เท่า และ ความหน่วงต่ำกว่า 26 เท่า สำหรับภาระงานทางการเงิน Trust Premium ที่ 58.28 เท่า ที่สังเกตได้แทนต้นทุนที่ยอมรับได้สำหรับการบรรลุเส้นทางการตรวจสอบที่ไม่เปลี่ยนแปลง การชำระราคา smart contract อัตโนมัติ และ กลไกการกำหนดราคาที่โปร่งใส

งานในอนาคตจะมุ่งเน้นที่: (1) การติดตั้งบัน PoA validator clusters ระดับการผลิตเพื่อให้ได้ความหน่วงต่ำลง (2) การขยายไปยังการกำหนดค่า warehouse ขนาดใหญ่ (10+ warehouses) และ (3) การทดสอบนำร่องในโลกจริงด้วยการผ่านรวมสมาร์ทมิเตอร์

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.
- [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>