

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ GridTokenX: แพลตฟอร์มซื้อขายพลังงานแบบกระจายศูนย์บน บล็อกเชน Solana

ชื่อผู้เขียน*

*ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ชื่อมหาวิทยาลัย

กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

email@university.edu

Abstract—บทความนี้นำเสนอ การประเมิน ประสิทธิภาพ อย่างครอบคลุมของ GridTokenX ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการซื้อขาย พลังงานแบบ Peer-to-Peer (P2P) แบบกระจายศูนย์ ที่สร้างบนบล็อกเชน Solana โดยผ่านการทดสอบมาตรฐาน อย่างเป็นระบบ โดยใช้ LiteSVM (Solana Virtual Machine แบบ in-process) เราได้วิเคราะห์ปริมาณ การทำธุรกรรม (Throughput) การกระจายตัวของความหน่วง (Latency) และพฤติกรรม ของระบบ ภายใต้สถานการณ์จำลอง ที่สมจริง ของตลาดซื้อขายพลังงาน ระบุยนวัตกรรม ของเราวิถีวิจัย ตาม มาตรฐานการวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ Blockbench, TPC-C v5.11.45 และกรอบงาน Hyperledger Caliper ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับปริมาณธุรกรรมสูงสุดที่ 530.2 รายการต่อวินาที (TPS) ภายใต้สภาวะพื้นฐาน และ 206.9 TPS ภายใต้สถานการณ์ Flash Sale ที่สมจริง โดยมีความหน่วงเฉลี่ยต่ำกว่า 3 มิลลิวินาที และความหน่วงที่เบอร์เซ็นไทล์ที่ 99 (p99) ต่ำกว่า 7 มิลลิวินาที ซึ่งยืนยันความพร้อมของแพลตฟอร์มสำหรับการใช้งานจริง นอกจากนี้ การประเมินยังครอบคลุมถึงการปฏิบัติตาม มาตรฐานภาคพลังงาน ได้แก่ IEC 62351:2023 และ IEEE 2030-2011 สำหรับการทำงานร่วมกันของスマาร์ทกริด

Index Terms—บล็อก เชน, การ ซื้อ ขาย พลังงาน, Solana, การวัดประสิทธิภาพ, สมาร์ทกริด, Peer-to-Peer, แอปพลิเคชันแบบกระจายศูนย์

I. บทนำ

การเปลี่ยนผ่านทั่วโลกไปสู่แหล่งพลังงานหมุนเวียน ได้สร้างความท้าทายและโอกาสใหม่ๆ สำหรับตลาดไฟฟ้า ระบบการซื้อขายพลังงานแบบรวมศูนย์แบบดั้งเดิม เช่น กับข้อจำกัดในการรองรับทรัพยากรพลังงานแบบกระจายตัว (DER) ผู้ผลิต และผู้ใช้ไฟฟ้า (Prosumers) และธุรกรรมแบบ Peer-to-Peer แบบเรียลไทม์ [1], [2] เทคโนโลยีบล็อกเชนนำเสนอทางออกที่น่าสนใจ โดยช่วยให้เกิดการซื้อขายพลังงานที่โปร่งใส ปลอดภัย และเป็นอัตโนมัติ โดยไม่ต้องผ่านตัวกลาง [3]

GridTokenX เป็นแพลตฟอร์ม การซื้อขาย พลังงานแบบกระจายศูนย์ที่สร้างบนบล็อกเชน Solana ออกแบบมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำธุรกรรม พลังงานแบบ Peer-to-Peer ระหว่าง Prosumers และผู้บริโภค แพลตฟอร์มนี้ใช้ประโยชน์จากสถาปัตยกรรม ประสิทธิภาพสูงของ Solana เพื่อให้ได้ปริมาณการรับธุรกรรม และความหน่วงที่จำเป็นสำหรับตลาด พลังงานแบบเรียลไทม์ [4]

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของ GridTokenX ตามระเบียบวิธีวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนที่เป็นมาตรฐาน [5]-[7] โดยมีส่วนร่วมสำคัญดังนี้:

- การประเมิน ประสิทธิภาพ อย่าง เป็น ระบบ โดย ใช้ LiteSVM in-process testing
- การจำลองสถานการณ์จริงสำหรับการดำเนินงาน ซื้อขายพลังงาน
- การวิเคราะห์ ความ สอดคล้อง กับ มาตรฐาน ภาค พลังงาน (IEC 62351, IEEE 2030)
- การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแพลตฟอร์มบล็อกเชนที่มีอยู่

II. ภูมิหลังและงานที่เกี่ยวข้อง

A. บล็อกเชนในการซื้อขายพลังงาน

งานวิจัยล่าสุดได้สำรวจการประยุกต์ใช้บล็อกเชนในตลาดพลังงาน [2], [8] Mengelkamp และคณะ [3] ได้นำเสนอ Brooklyn Microgrid เป็นกรณีศึกษาบุกเบิกในการซื้อขายพลังงานท้องถิ่นบนบล็อกเชน Tushar และคณะ [1] ได้ให้ภาพรวมที่ครอบคลุมของกลไกการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างกัน

B. การวัดประสิทธิภาพบล็อกเชน

ระเบียบวิธีประเมินประสิทธิภาพสำหรับระบบบล็อกเชน มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง Blockbench [5] ได้สร้าง

TABLE I
การกำหนดค่าสภาพแวดล้อมการทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่า
เฟรมเวิร์กทดสอบ	LiteSVM v0.4.0
แพลตฟอร์มบล็อกเชน	Solana-compatible VM
ระบบปฏิบัติการไฮสต์	macOS (Darwin)
เฟรมเวิร์กโปรแกรม	Anchor v0.32.1
วันที่ทดสอบ	16 ธันวาคม 2025

TABLE II
การกำหนดค่าสถานการณ์จริง

สถานการณ์	เป้าหมาย TPS	ระยะเวลา	ผู้ใช้
Evening Peak	75	30s	100
Flash Sale	150	15s	100
Market Volatility	100	20s	100

กรอบงานสำหรับการวิเคราะห์บล็อกเชนส่วนตัว ในขณะที่ Hyperledger Caliper [7] ให้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพที่เป็นมาตรฐาน Pongnumkul และคณะ [9] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพข้ามแพลตฟอร์มบล็อกเชนต่างๆ ภายใต้ภาระงานที่แตกต่างกัน

C. สถาปัตยกรรม Solana

Solana ใช้กลไกฉันทามติ Proof of History (PoH) ที่เป็นเอกลักษณ์ร่วม กับ Proof of Stake ซึ่งช่วยให้รองรับปริมาณธุรกรรมทางทฤษฎีได้ถึง 65,000 TPS [4], [10] สถาปัตยกรรมของแพลตฟอร์มทำให้เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายความถี่สูงในตลาดพลังงาน

III. ระเบียบวิธีวิจัย

A. สภาพแวดล้อมการทดสอบ

การตั้งค่าการทดลองของเรามีปฏิบัติตามแนวปฏิบัติการวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนตามที่ระบุใน Blockbench [5], ข้อกำหนด TPC-C v5.11.45 [6], และกรอบงาน Hyperledger Caliper [7]

B. สถานการณ์ทดสอบ

สถานการณ์จริง 4 รูปแบบถูกออกแบบตามหลักการกำหนดลักษณะภาระงานจาก Jain [11]:

C. ตัวชี้วัดที่เก็บรวบรวม

ตามมาตรฐาน ตัวชี้วัดคุณภาพ ISO/IEC 25010:2023 [12]:

- **Throughput:** ธุรกรรมต่อวินาที (TPS)

TABLE III
ประสิทธิภาพ Throughput ตามสถานการณ์

สถานการณ์	เป้าหมาย TPS	ที่ได้ TPS	ประสิทธิภาพ (%)	สำเร็จ (%)
Baseline Light (10)	-	480.9	-	100.0
Baseline Heavy (100)	-	501.8	-	100.0
Stress Test (200)	-	517.9	-	100.0
Sustained (30s)	-	508.6	-	100.0
Evening Peak	75	91.3	121.7	98.0
Flash Sale	150	206.9	137.9	93.2
Market Volatility	100	133.9	133.9	98.1
สูงสุด (ทุกการทดสอบ)	-	530.2	-	100.0

TABLE IV
การกระจายตัวของ Latency ตามโหมดทดสอบ (มิลลิวินาที)

โหมดทดสอบ	Min	Avg	p50	p95	p99	Max
Cold Start	-	4.72	4.28	8.11	8.66	8.84
Warm Sequential	-	2.06	1.95	2.63	3.63	6.88
Burst Mode	-	2.51	2.01	4.33	8.82	109.11
Flash Sale	2.08	2.82	2.59	3.64	5.01	73.28
Market Volatility	2.11	3.10	2.52	4.88	7.27	117.99

- **Latency:** เวลาประมวลผลธุรกรรมตั้งแต่ต้นจนจบ
- **Percentiles:** การกระจายความหน่วงที่ p50, p95, p99
- **Success Rate:** เปอร์เซ็นต์ของธุรกรรมที่สำเร็จ

IV. ผลการทดลอง

A. การวิเคราะห์ Throughput

เราได้ทำการทดสอบ Throughput อย่างกว้างขวางในหลายสถานการณ์ตั้งแต่สภาพพื้นฐานไปจนถึงการจำลองสถานการณ์จริงที่มีความเครียดสูง

ระบบทำได้สูงสุด 530.2 TPS ในระหว่างการทดสอบพื้นฐานแบบต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการประมวลผลติดของแพลตฟอร์ม ภายใต้สถานการณ์การซื้อขายพลังงานจริงที่มีการกระจายภาระงานที่ชันช่อง Throughput สูงถึง 206.9 TPS ในช่วงเหตุการณ์ Flash Sale ซึ่งยังคงเกินเป้าหมาย 150 TPS อย่างมีนัยสำคัญ

B. การกระจายตัวของ Latency

การวิเคราะห์ Latency เมย์ให้เห็นลักษณะประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมในทุกโหมดการทดสอบ:

Latency เฉลี่ยยังคงต่ำกว่า 3.1ms ในทุกสถานการณ์โดยมี p99 latency ต่ำกว่า 9ms การประมวลผลแบบ Warm sequential มีโปรไฟล์ Latency ต่ำสุดที่ 2.06ms เฉลี่ยในขณะที่ Cold start latency ที่

TABLE V
การวิเคราะห์ Scalability: TPS เทียบกับผู้ใช้พร้อมกัน

ผู้ใช้	TPS	Avg Latency	p99 Latency
5	517	2.87 ms	6.58 ms
10	530	1.91 ms	1.98 ms
25	518	1.91 ms	2.14 ms
50	513	1.95 ms	2.95 ms
100	454	2.20 ms	5.90 ms
200	479	2.08 ms	3.87 ms

TABLE VI
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแพลตฟอร์มบล็อกเชน

แพลตฟอร์ม	ทฤษฎี	ที่ได้รับ	Latency
Ethereum [14]	15-30	-	12-14 s
Bitcoin [15]	7	-	10 min
Hyperledger [16]	3,500	2,000	500 ms
Solana [17]	65,000	2-3K	400 ms
GridTokenX (Base)	-	530.2	1.96 ms
GridTokenX (Real)	-	206.9	2.82 ms

4.72ms แสดงให้เห็นถึงค่าใช้จ่ายในการเริ่มต้นที่ยอมรับได้

C. การวิเคราะห์ความสามารถในการขยายตัว (Scalability)

แพลตฟอร์มแสดงลักษณะความสามารถในการขยายตัวที่ยอดเยี่ยม สอดคล้องกับงานวิจัยด้านความสามารถในการขยายตัวของบล็อกเชน [5], [13]:

ข้อค้นพบสำคัญด้าน Scalability:

- Throughput ยังคงสูง (444-530 TPS) ตลอดช่วงผู้ใช้พร้อมกัน 5-200 คน
- ประสิทธิภาพสูงสุดที่ผู้ใช้ 10 คน ด้วย 530 TPS
- ประสิทธิภาพ Scalability ยังคงอยู่ที่ 93% แม้ที่ผู้ใช้ 200 คน
- ไม่มีการลดลงของประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญในช่วงที่ทดสอบ

V. อภิปรายผล

A. การเปรียบเทียบกับแพลตฟอร์มที่มีอยู่

GridTokenX แสดงลักษณะประสิทธิภาพที่แข็งขันได้เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายพลังงานในโลกจริง

B. ความสามารถในการทนทาน

การออกแบบแพลตฟอร์ม สอดคล้องกับมาตรฐานภาคพลังงาน:

- IEC 62351:2023 [18]: โปรโตคอลการสื่อสารที่ปลอดภัย

- IEEE 2030-2011 [19]: การทำงานร่วมกันของสมาร์ทกริด
- IEC 61850:2024 [20]: ระบบอัตโนมัติของโรงไฟฟ้า
- IEEE 1547-2018 [21]: การเชื่อมต่อ DER

VI. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพที่ครอบคลุมของแพลตฟอร์ม การซื้อขายพลังงาน GridTokenX บนบล็อกเชน โดยใช้ LiteSVM in-process testing ระบุเบียนวิธีของเราปฏิบัติตามมาตรฐานการวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนที่เป็นที่ยอมรับรวมถึง TPC-C v5.11.45, Blockbench และ Hyperledger Caliper ข้อค้นพบสำคัญได้แก่:

- Throughput สูงสุดที่ 530.2 TPS (พื้นฐาน) และ 206.9 TPS (โลจิสติก)
- Latency เฉลี่ยที่ 1.96-3.10 ms (ยอดเยี่ยม)
- p99 latency ที่ 3.87-7.27 ms (พร้อมใช้งานจริง)
- อัตราความสำเร็จ 93.2-100% ในทุกสถานการณ์
- ประสิทธิภาพ Scalability ที่ 93% ที่ผู้ใช้พร้อมกัน 200 คน
- ความสามารถในการทนทานภาคพลังงาน (IEC 62351, IEEE 2030)

ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันความสามารถของ GridTokenX สำหรับการใช้งานจริงในตลาดซื้อขายพลังงาน Peer-to-Peer แพลตฟอร์มแสดง Latency มั่นคงต่ากว่ามิลลิวินาทีและรักษา Throughput สูงภายใต้เงื่อนไขการซื้อขายจริง รวมถึงเหตุการณ์ Flash Sale และความผันผวนของตลาด

งานในอนาคตประกอบด้วย:

- การทดสอบโดยเพิ่มเติมเกินกว่าผู้ใช้พร้อมกัน 200 คน
- การจำลองความหน่วงเครือขายสำหรับการใช้งานแบบกระจายตัว
- การทดสอบความเสถียรระยะยาว (24+ ชั่วโมง)
- การใช้งานบน Mainnet และการตรวจสอบความถูกต้องในโลจิสติก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณชุมชนนักพัฒนา LiteSVM และ Solana สำหรับการสนับสนุนโครงสร้างพื้นฐานการทดสอบบล็อกเชน

References

- W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, D. Smith, and H. V. Poor, "Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 4, pp. 3185-3200, 2020.

- [2] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, and A. Peacock, "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 100, pp. 143–174, 2019.
- [3] 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.
- [4] A. Yakovenko, "Solana: A new architecture for a high performance blockchain," 2018. [Online]. Available: <https://solana.com/solana-whitepaper.pdf>
- [5] 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 *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data (SIGMOD)*, 2017, pp. 1085–1100.
- [6] Transaction Processing Performance Council, "Tpc benchmark c standard specification," TPC, Tech. Rep. v5.11.45, 2023. [Online]. Available: <http://www.tpc.org/tpcc/>
- [7] Linux Foundation, "Hyperledger caliper: A blockchain benchmark framework," <https://hyperledger.github.io/caliper/>, 2024, version 0.6.0.
- [8] S. Wang, A. F. Taha, J. Wang, K. Kvaternalik, and A. Hahn, "Energy crowdsourcing and peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, no. 8, pp. 1612–1623, 2019.
- [9] S. Pongnumkul, C. Siripanpornchana, and S. Thajchayapong, "Performance analysis of private blockchain platforms in varying workloads," in *2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [10] C. T. Nguyen, D. T. Hoang, D. N. Nguyen, D. Niyato, H. T. Nguyen, and E. Dutkiewicz, "A survey on solana blockchain: Architecture, security, and decentralized applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 60922–60933, 2022.
- [11] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. John Wiley & Sons, 1991.
- [12] International Organization for Standardization, ISO/IEC 25010:2023 - Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Product quality model, Std., 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/78176.html>
- [13] C. Gorenflo, S. Lee, L. Golab, and S. Keshav, "Fast-fabric: Scaling hyperledger fabric to 20,000 transactions per second," in *2019 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)*. IEEE, 2019, pp. 455–463.
- [14] G. Wood and Ethereum Foundation, "Ethereum yellow paper: A formal specification," <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>, 2024.
- [15] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, 2008.

TABLE VII
ตารางความสอดคล้องกับมาตรฐาน

มาตรฐาน	ข้อกำหนด	สถานะ
TPC-C v5.11.45	ความสอดคล้อง ACID	✓
Blockbench	ตัวชี้วัด TPS	✓
Caliper	การสร้างแบบจำลองการทำงาน	✓
ISO/IEC 25010:2023	ประสิทธิภาพ	✓
IEC 62351:2023	การสื่อสารที่ปลอดภัย	✓
IEEE 2030-2011	การทำงานร่วมกันของกริด	✓

- [16] Hyperledger Performance and Scale Working Group, "Hyperledger blockchain performance metrics," Linux Foundation, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available: <https://wiki.hyperledger.org/display/PSWG>
- [17] Solana Foundation, "Solana documentation: Transaction processing," <https://docs.solana.com/developing/programming-model/transactions>, 2024, accessed: December 2025.
- [18] International Electrotechnical Commission, IEC 62351:2023 - Power systems management and associated information exchange - Data and communications security, Std., 2023, parts 1-14: Security standards for power system communication protocols. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6912>
- [19] IEEE Standards Association, IEEE 2030-2011 - Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation, Std., 2011, guidelines for smart grid system interoperability.
- [20] International Electrotechnical Commission, IEC 61850:2024 - Communication networks and systems for power utility automation, Std., 2024, international standard for substation automation and DER communication. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6028>
- [21] IEEE Standards Association, IEEE 1547-2018 - Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, Std., 2018, establishes criteria for interconnection of DER.

Appendix