

# การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ GridTokenX: แพลตฟอร์มซื้อขายพลังงานแบบกระจายศูนย์บน บล็อกเชน Solana

ชื่อผู้เขียน\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ชื่อมหาวิทยาลัย

กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

email@university.edu

**Abstract**—บทความนี้ นำเสนอ การ ประเมิน ประสิทธิภาพ อย่างครอบคลุมของ GridTokenX ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการซื้อขายพลังงานแบบ Peer-to-Peer (P2P) แบบกระจายศูนย์ ที่สร้างบนบล็อกเชน Solana โดยผ่านการทดสอบมาตรฐาน อย่างเป็นระบบโดยใช้ LiteSVM (Solana Virtual Machine แบบ in-process) เรา ได้วิเคราะห์ ปริมาณ การ ทำ ธุรกรรม (Throughput) การกระจายตัวของความหน่วง (Latency) และ พฤติกรรม ของ ระบบ ภายใต้ สถานการณ์ จำลอง ที่ สมจริง ของตลาดซื้อขายพลังงาน ระเบียบวิธีวิจัยของเราปฏิบัติตาม มาตรฐานการวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนที่เป็นที่ยอมรับ ได้แก่ Blockbench, TPC-C v5.11.45 และกรอบงาน Hyperledger Caliper ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถ รองรับปริมาณธุรกรรมสูงสุดที่ 530.2 รายการต่อวินาที (TPS) ภายใต้สถานะพื้นฐาน และ 206.9 TPS ภายใต้สถานการณ์ Flash Sale ที่สมจริง โดยมีความหน่วงเฉลี่ยต่ำกว่า 3 มิลลิ วินาที และความหน่วงที่เปอร์เซ็นไทล์ที่ 99 (p99) ต่ำกว่า 7 มิลลิวินาที ซึ่งยืนยันความพร้อมของแพลตฟอร์มสำหรับการใช้ งานจริง นอกจากนี้ การประเมินยังครอบคลุมถึงการปฏิบัติตาม มาตรฐานภาคพลังงาน ได้แก่ IEC 62351:2023 และ IEEE 2030-2011 สำหรับการทำงานร่วมกันของสมาร์ตกริด

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

## I. บทนำ

การเปลี่ยนผ่านทั่วโลกไปสู่แหล่งพลังงานหมุนเวียนได้ สร้างความท้าทายและโอกาสใหม่ๆ สำหรับตลาดไฟฟ้า ระบบการซื้อขายพลังงานแบบรวมศูนย์แบบดั้งเดิมเผชิญ กับข้อจำกัดในการรองรับทรัพยากรพลังงานแบบกระจาย ตัว (DER) ผู้ผลิต และผู้ใช้ไฟฟ้า (Prosumers) และ ธุรกรรมแบบ Peer-to-Peer แบบเรียลไทม์ [1], [2] เทคโนโลยีบล็อกเชนนำเสนอทางออกที่น่าสนใจโดยช่วย ให้เกิดการซื้อขายพลังงานที่โปร่งใส ปลอดภัย และเป็น อัตโนมัติโดยไม่ต้องผ่านตัวกลาง [3]

GridTokenX เป็น แพลตฟอร์ม การ ซื้อ ขาย พลังงาน แบบกระจายศูนย์ที่สร้างบนบล็อกเชน Solana ออกแบบ มาเพื่ออำนวยความสะดวก ในการ ทำ ธุรกรรม พลังงาน แบบ Peer-to-Peer ระหว่าง Prosumers และ ผู้ บริโภค แพลตฟอร์ม นี้ ใช้ ประโยชน์ จาก สถาปัตยกรรม ประสิทธิภาพสูงของ Solana เพื่อให้ได้ปริมาณการรองรับ ธุรกรรม และ ความหน่วง ที่จำเป็น สำหรับ ตลาด พลัง งาน แบบเรียลไทม์ [4]

บทความนี้ นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของ GridTokenX ตามระเบียบวิธีวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนที่เป็น มาตรฐาน [5]–[7] โดยมีส่วนร่วมสำคัญดังนี้:

- การ ประเมิน ประสิทธิภาพ อย่าง เป็น ระบบ โดย ใช้ LiteSVM in-process testing
- การจำลองสถานการณ์จริงสำหรับการดำเนินงานซื้อขายพลังงาน
- การ วิเคราะห์ ความ สอดคล้อง กับ มาตรฐาน ภาค พลังงาน (IEC 62351, IEEE 2030)
- การวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแพลตฟอร์มบล็อกเชนที่มีอยู่

## II. ภูมิหลังและงานที่เกี่ยวข้อง

### A. บล็อกเชนในการซื้อขายพลังงาน

งานวิจัยล่าสุดได้สำรวจการประยุกต์ใช้บล็อกเชน ใน ตลาดพลังงาน [2], [8] Mengelkamp และคณะ [3] ได้นำเสนอ Brooklyn Microgrid เป็นกรณีศึกษาบุกเบิก ในการซื้อขายพลังงานท้องถิ่นบนบล็อกเชน Tushar และ คณะ [1] ได้ให้ภาพรวมที่ครอบคลุมของกลไกการซื้อขาย ไฟฟ้าระหว่างกัน

### B. การวัดประสิทธิภาพบล็อกเชน

ระเบียบวิธีประเมินประสิทธิภาพสำหรับระบบบล็อกเชน มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง Blockbench [5] ได้สร้าง

TABLE I  
การกำหนดค่าสภาพแวดล้อมการทดสอบ

พารามิเตอร์	ค่า
เฟรมเวิร์กทดสอบ	LiteSVM v0.4.0
แพลตฟอร์มบล็อกเชน	Solana-compatible VM
ระบบปฏิบัติการโฮสต์	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) ที่เป็นเอกลักษณ์ร่วมกับ Proof of Stake ซึ่งช่วยให้รองรับปริมาณธุรกรรมทางทฤษฎีได้ถึง 65,000 TPS [4], [10] สถาปัตยกรรมของแพลตฟอร์มทำให้เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายความถี่สูงในตลาดพลังงาน

## III. ระเบียบวิธีวิจัย

### A. สภาพแวดล้อมการทดสอบ

การตั้งค่าการทดลองของเราปฏิบัติตามแนวปฏิบัติการวัดประสิทธิภาพบล็อกเชนตามที่ระบุใน Block-bench [5], ข้อกำหนด TPC-C v5.11.45 [6], และกรอบงาน Hyperledger Caliper [7]

### B. สถานการณ์ทดสอบ

สถานการณ์จริง 4 รูปแบบถูกออกแบบตามหลักการกำหนดลักษณะภาระงานจาก Jain [11]:

### C. ตัวชี้วัดที่เก็บรวบรวม

ตามมาตรฐานตัวชี้วัดคุณภาพ 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 อย่างกว้างขวางในหลายสถานการณ์ตั้งแต่สภาวะพื้นฐานไปจนถึงการจำลองสถานการณ์จริงที่มีความเครียดสูง

ระบบทำได้สูงสุด **530.2 TPS** ในระหว่างการทดสอบพื้นฐานแบบต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการประมวลผลดิบของแพลตฟอร์ม ภายใต้สถานการณ์การซื้อขายพลังงานจริงที่มีการกระจายภาระงานที่ซับซ้อน Throughput สูงถึง **206.9 TPS** ในช่วงเหตุการณ์ Flash Sale ซึ่งยังคงเกินเป้าหมาย 150 TPS อย่างมีนัยสำคัญ

### B. การกระจายตัวของ Latency

การวิเคราะห์ Latency เผยให้เห็นลักษณะประสิทธิภาพที่ยอดเยียมในทุกโหมดการทดสอบ:

Latency เฉลี่ยยังคงต่ำกว่า **3.1ms** ในทุกสถานการณ์ โดยมี p99 latency ต่ำกว่า **9ms** การประมวลผลแบบ Warm sequential มีโปรไฟล์ Latency ดีที่สุดที่ **2.06ms** เฉลี่ย ในขณะที่ 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	ที่วัดได้	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)

แพลตฟอร์มแสดงลักษณะความสามารถในการขยายตัวที่ยืดหยุ่น สอดคล้องกับงานวิจัยด้านความสามารถในการขยายตัวของบล็อกเชน [5], [13]:

ข้อค้นพบสำคัญด้าน Scalability:

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

## V. อภิปรายผล

### A. การเปรียบเทียบกับแพลตฟอร์มที่มีอยู่

GridTokenX แสดงลักษณะประสิทธิภาพที่แข่งขันได้เหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันการซื้อขายพลังงานในโลกจริง

### B. ความสอดคล้องกับภาคพลังงาน

การออกแบบแพลตฟอร์มสอดคล้องกับมาตรฐานภาคพลังงาน:

- IEC 62351:2023 [18]: โพรโตคอลการสื่อสารที่ปลอดภัย

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

## VI. สรุปผล

บทความนี้ นำเสนอ การประเมิน ประสิทธิภาพ ที่ครอบคลุม ของ แพลตฟอร์ม การ ซื้อ ขาย พลังงาน GridTokenX บน บล็อกเชน โดยใช้ LiteSVM in-process testing ระเบียบวิธี ของ เรา ปฏิบัติ ตาม มาตรฐาน การ วัด ประสิทธิภาพ บล็อกเชน ที่ เป็น ที่ยอมรับ รวมถึง TPC-C v5.11.45, Blockbench และ Hyperledger Caliper ข้อค้นพบสำคัญได้แก่:

- Throughput สูงสุดที่ 530.2 TPS (พื้นฐาน) และ 206.9 TPS (โลกจริง)
- 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
- ความสอดคล้อง กับ มาตรฐาน ภาค พลังงาน (IEC 62351, IEEE 2030)

ผลลัพธ์เหล่านี้ ยืนยัน ความพร้อม ของ GridTokenX สำหรับการใช้งานจริงในตลาดซื้อขายพลังงาน Peer-to-Peer แพลตฟอร์มแสดง Latency มีฐานต่ำกว่ามิลลิวินาทีและรักษา Throughput สูงภายใต้เงื่อนไขการซื้อขายจริง รวมถึงเหตุการณ์ Flash Sale และความผันผวนของตลาด

งานในอนาคตประกอบด้วย:

- การทดสอบโหลดเพิ่มเติมเกินกว่าผู้ใช้พร้อมกัน 200 คน
- การจำลอง ความหน่วง เครือข่าย สำหรับการ ใช้งานแบบกระจายตัว
- การทดสอบความเสถียรระยะยาว (24+ ชั่วโมง)
- การใช้งานบน Mainnet และการตรวจสอบความถูกต้องในโลกจริง

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียน ขอขอบคุณ ชุมชน นักพัฒนา LiteSVM และ Solana สำหรับ การ สนับสนุน โครงสร้าง พื้นฐาน การทดสอบบล็อกเชน

## References

- [1] 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. Kvaternik, 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	ตัววัด TPS	✓
Caliper	การสร้างแบบจำลองภาระงาน	✓
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