

Analysis of Reversibility and Critical Depth in Quantum Computers under Noise via Circuit Simulation

Sittinon Chotirotpon^{1,*}

^{1,*}Science and Technology Program, Thaksin University Demonstration Secondary School, Phatthalung Province, 93210, Thailand; Email: 670255@tsu.ac.th

**Corresponding author: Sittinon Chotirotpon (670255@tsu.ac.th)*

Received: 24 January 2026; **Revised:** 16 April 2026;

Accepted: 20 April 2026; **Published:** 30 April 2026

Abstract

This research aims to: 1) simulate the time-reversibility behavior in chaotic quantum systems (Ising model), 2) analyze the quantitative relationship between noise levels (ϵ) and system sizes (N), and 3) propose the critical depth criterion for evaluating the preliminary limits of quantum computers. The research methodology involves simulating the behavior of quantum systems via circuit simulation using Qiskit to evaluate the return probability under depolarizing error ranging from 0-2%. The results indicate that noise causes a rapid decay in the system's reversibility. Larger systems ($N = 6$) demonstrate approximately 45% higher sensitivity to noise than smaller systems ($N = 4$), based on the relative reduction of the critical depth, which decreases from 15 steps to 11 steps at a 1% noise level. Based on these findings, this study proposes critical depth as a simulation-based index for evaluating noise-induced limitations in NISQ-era quantum computers.

Keywords: Quantum Computing, Circuit Simulation, Loschmidt Echo, Noise, Critical Depth



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

Citation:

Chotirotpon, S. (2026). Analysis of Reversibility and Critical Depth in Quantum Computers under Noise via Circuit Simulation. *Journal of Computer and Creative Technology*, 4(1), e3448. <https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3448>

การวิเคราะห์ความผันกลับได้และค่าความลึกวิกฤตของควอนตัมคอมพิวเตอร์ ภายใต้สัญญาณรบกวนด้วยการจำลองวงจร

สิทธิพันธ์ โชติโรจน์ผล^{1,*}

¹โครงการห้องเรียนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยทักษิณ ฝายมัธยม จังหวัดพัทลุง 93210
ประเทศไทย; Email: 670255@tsu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บทความ: สิทธิพันธ์ โชติโรจน์ผล (670255@tsu.ac.th)

รับบทความ: 24 มกราคม 2569; แก้ไขบทความ: 16 เมษายน 2569;
ตอบรับบทความ: 20 เมษายน 2569; เผยแพร่บทความ: 30 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) จำลองพฤติกรรมการย้อนกลับของเวลาในระบบควอนตัมโกลาหล 2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างระดับสัญญาณรบกวนและขนาดระบบ และ 3) นำเสนอเกณฑ์ความลึกวิกฤตสำหรับประเมินขีดจำกัดเบื้องต้นของคอมพิวเตอร์ควอนตัม วิธีดำเนินการวิจัยเป็นการศึกษาเชิงจำลองพฤติกรรมของระบบควอนตัมผ่านการจำลองวงจรด้วย Qiskit เพื่อประเมินค่าความน่าจะเป็นในการย้อนกลับภายใต้สัญญาณรบกวนชนิด Depolarizing ในช่วงร้อยละ 0-2 ผลการวิจัยพบว่า สัญญาณรบกวนส่งผลให้ความสามารถในการย้อนกลับของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว โดยระบบขนาดใหญ่ $N = 6$ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าระบบขนาดเล็ก $N = 4$ ประมาณร้อยละ 45 เมื่อพิจารณาจากการลดลงเชิงสัมพัทธ์ของค่าความลึกวิกฤต ซึ่งลดลงจาก 15 ชั้น เหลือเพียง 11 ชั้น ที่ระดับสัญญาณรบกวนร้อยละ 1 จากผลการศึกษานี้ จึงเสนอให้ใช้ค่าความลึกวิกฤตเป็นดัชนีเชิงการจำลองสำหรับการประเมินข้อจำกัดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในระบบคอมพิวเตอร์ควอนตัมยุค NISQ

คำสำคัญ: คอมพิวเตอร์ควอนตัม, การจำลองวงจร, ลอซมิตต์เอคโค, สัญญาณรบกวน, ความลึกวิกฤต



Copyright © 2026 Journal of Computer and Creative Technology. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC-ND).

การอ้างอิง:

สิทธิพันธ์ โชติโรจน์ผล. (2569). การวิเคราะห์ความผันกลับได้และค่าความลึกวิกฤตของควอนตัมคอมพิวเตอร์ภายใต้สัญญาณรบกวนด้วยการจำลองวงจร. วารสารคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์, 4(1), e3448. <https://doi.org/10.65205/jcct.2026.e3448>

1. บทนำ (Introduction)

เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ควอนตัม (Quantum Computing) ได้ก้าวเข้าสู่ยุคที่เรียกว่า NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เรามีฮาร์ดแวร์ควอนตัมขนาดกลาง (ประมาณ 50-100 คิวบิต) ที่สามารถใช้งานได้จริง แต่ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพและเทคโนโลยีการแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction) ที่ยังไม่สมบูรณ์ (Kim et al., 2023) แม้ว่าคอมพิวเตอร์ควอนตัมจะมีศักยภาพมหาศาลในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง เช่น การจำลองโมเลกุลยา หรือการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) ผ่านคุณสมบัติการซ้อนทับ (Superposition) และการพัวพัน (Entanglement) แต่ศักยภาพดังกล่าวมักถูกกลดทอนลงเมื่อความลึกของวงจร (Circuit Depth) หรือจำนวนขั้นตอนการคำนวณเพิ่มมากขึ้น

อุปสรรคสำคัญที่สุดในยุค NISQ คือ “สัญญาณรบกวน” (Noise) และ “ความไม่เชื่อมโยงทางควอนตัม” (Decoherence) ซึ่งเกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างคิวบิตกับสภาพแวดล้อมภายนอก ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้สถานะควอนตัมเกิดความคลาดเคลื่อนและสูญเสียข้อมูลไปตามกาลเวลา การทำความเข้าใจพฤติกรรมของสัญญาณรบกวนในวงจรที่มีความซับซ้อนจึงเป็นโจทย์วิจัยที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาคำตอบว่า “เราสามารถคำนวณได้ลึกแค่ไหนก่อนที่จะล้มเหลว” (Jurcevic et al., 2021) ซึ่งเป็นคำถามพื้นฐานที่กำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของแอปพลิเคชันควอนตัมในปัจจุบัน

หนึ่งในวิธีการทดสอบเสถียรภาพของระบบควอนตัมที่มีประสิทธิภาพคือการตรวจสอบ “ความผันกลับได้ของเวลา” (Time-Reversibility) ตามหลักกลศาสตร์ควอนตัม การวิวัฒนาการของสถานะภายใต้สมการชเรอดิงเงอร์ (Schrödinger Equation) เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ (Unitary Evolution) กล่าวคือ หากเราประยุกต์ใช้กระบวนการย้อนกลับกับระบบ ระบบควรจะกลับคืนสู่สถานะเริ่มต้นได้อย่างสมบูรณ์ เปรียบเสมือนการกรอภาพยนตร์กลับหลัง (Peres, 1984) อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีความโกลาหล (Chaos) หรือมีสัญญาณรบกวน การย้อนกลับนี้จะทำได้ยากขึ้นเรื่อย ๆ ปรากฏการณ์นี้ถูกวัดค่าได้ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า Loschmidt Echo (LE) ซึ่งเป็นการวัดความเหมือน (Fidelity) ระหว่างสถานะเริ่มต้นกับสถานะที่ถูกย้อนกลับ หากค่านี้ลดลง แสดงว่าระบบสูญเสียข้อมูลให้กับสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาขีดจำกัดดังกล่าวผ่าน การจำลองวงจรควอนตัม (Circuit Simulation) บนระบบจำลองแบบ Ising Model ซึ่งเป็นระบบที่มีพฤติกรรมโกลาหล (Chaotic regime) ภายใต้พารามิเตอร์ $J=1.0$, $h_x=0.8$, $h_z=0.5$ และมีความไวต่อการรบกวนสูง โดยใช้เฟรมเวิร์ก Qiskit (Aleksandrowicz et al., 2019) ในการสร้างสภาพแวดล้อมทดลองที่มีการควบคุมสัญญาณรบกวนแบบ Depolarizing Noise อย่างเป็นระบบ วัดผลกระทบหลักคือการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของสัญญาณรบกวน ขนาดของระบบ และความลึกของวงจร เพื่อนำเสนอเกณฑ์ชี้วัดใหม่ในรูปแบบของ “Critical Depth” (ความลึกวิกฤต) ซึ่งกำหนดจากจุดที่ค่า Fidelity ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ 0.5 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินสมรรถนะของฮาร์ดแวร์และออกแบบอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับข้อจำกัดในยุคปัจจุบัน

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ยังเน้นการศึกษานฮาร์ดแวร์จริง จึงยังคงมีช่องว่างวิจัยในการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสเกลของ Fidelity ภายใต้การควบคุมระดับ Noise อย่างเป็นระบบผ่านการจำลองวงจร งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย (Research Objectives)

1. เพื่อจำลองพฤติกรรมการย้อนกลับของเวลาในระบบควอนตัมโกลาหล (Ising model)
2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างระดับสัญญาณรบกวน (ϵ) และขนาดระบบ (N)
3. เพื่อนำเสนอเกณฑ์ความลึกวิกฤต (Critical Depth) สำหรับประเมินขีดจำกัดเบื้องต้นของคอมพิวเตอร์ควอนตัม

3. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

งานวิจัยของ Peres (1984) ได้วางรากฐานแนวคิด Loschmidt Echo สำหรับการประเมินความเสถียรของระบบควอนตัม ซึ่งต่อมา Goussev et al. (2012) ได้สังเคราะห์องค์ความรู้ดังกล่าวเพื่อใช้จำแนกระบบที่มีความโกลาหล ในบริบทของคอมพิวเตอร์ควอนตัมยุค NISQ งานของ Preskill (2018) ชี้ให้เห็นว่าสัญญาณรบกวน (Noise) เป็นข้อจำกัดสำคัญ โดยสอดคล้องกับการทดลองของ Lesovik et al. (2019) บนเครื่อง IBM Quantum ที่พบว่าความผิดพลาดของฮาร์ดแวร์ส่งผล

ผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการย้อนกลับสถานะ อย่างไรก็ตาม การศึกษาความสัมพันธ์เชิงสเกล (Scaling Law) ของตัวชี้วัดการย้อนกลับภายใต้การควบคุมระดับสัญญาณรบกวนอย่างเป็นระบบผ่านการจำลองวงจรควอนตัม และ ยังมีรายงานการศึกษาอยู่อย่างจำกัด (Anand et al., 2024) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว

4. กรอบแนวคิดงานวิจัย (Conceptual Framework)

งานวิจัยนี้กำหนดให้ระดับสัญญาณรบกวน (Noise Level) และขนาดของระบบ (System Size) เป็นตัวแปรต้น ที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการย้อนกลับของสถานะควอนตัม (ตัวแปรตาม) โดยวัดผ่านค่าความเหมือน (Fidelity) จากโปรโตคอล Loschmidt Echo ทั้งนี้ ได้นำเสนอตัวแปรชี้วัดใหม่คือ ค่าความลึกวิกฤต (Critical Depth) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ประเมินสมรรถนะที่เป็นรูปธรรม

5. วิธีดำเนินงานวิจัย (Research Methodology)

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเชิงคำนวณ (Computational Experiment) ผ่านชุดเครื่องมือพัฒนาซอฟต์แวร์ควอนตัม Qiskit SDK (Quantum Information Science Kit) เวอร์ชัน 1.1.0 โดยรันบนตัวจำลอง Aer Simulator เพื่อจำลองพฤติกรรมของระบบควอนตัมภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมตัวแปรอย่างเคร่งครัด โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลอง Transverse Field Ising Model (TFIM) 1 มิติ ซึ่งเป็นระบบมาตรฐานในการศึกษาสถานะควอนตัมหลายอนุภาค (Many-body quantum systems) โดยมีสมการแฮมิลโทเนียน (Hamiltonian) ดังสมการที่ (1) (Anand et al., 2024)

$$H = -J \sum_{i=1}^{N-1} Z_i Z_{i+1} - h_x \sum_{i=1}^N X_i - h_z \sum_{i=1}^N Z_i \quad (1)$$

โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ $J = 1.0$ (Strength of Spin Interaction), $h_x = 0.8$ (Transverse Field), และ $h_z = 0.5$ (Longitudinal field) โดยที่ X_i และ Z_i คือตัวดำเนินการเพาลี (Pauli matrices) ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

การเลือกค่าพารามิเตอร์ชุดนี้มีความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลให้ระบบอยู่ในสภาวะ Non-integrable (Chaotic Regime) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบความไวต่อการรบกวนและการย้อนกลับของเวลา

5.2 การแปลงเป็นวงจรควอนตัม (Quantum Circuit Implementation)

เนื่องจากตัวดำเนินการในสมการแฮมิลโทเนียนไม่สามารถสลับที่กันได้ (Non-Commuting) งานวิจัยนี้จึงใช้วิธี First-order Trotter-Suzuki Decomposition เพื่อประมาณค่าการวิวัฒนาการเชิงเวลา $U(t) = e^{-iHt}$ ให้เป็นลำดับของเกตควอนตัมพื้นฐาน ดังสมการที่ (2) (Anand et al., 2024)

$$e^{-iH\Delta t} \approx \prod_j e^{-iH_j\Delta t} \quad (2)$$

โดยกำหนดขนาดขั้นเวลา (Time Step size) $\Delta t = 0.1$ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่า (Trotterization Error) ให้เหลือน้อยที่สุด ค่าขั้นเวลานี้ถูกเลือกมาจากการวิเคราะห์ความลู่เข้า (Convergence Analysis) ซึ่งพบว่าเพียงพอต่อการจำลองพฤติกรรมระยะยาวโดยไม่สะสมความคลาดเคลื่อนมากเกินไป

5.3 แบบจำลองสัญญาณรบกวน (Noise Modeling)

เพื่อการจำลองสภาวะแวดล้อมของคอมพิวเตอร์ควอนตัมยุค NISQ อย่างสมจริง งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองสัญญาณรบกวนชนิด Depolarizing Noise Channel แม้อาร์คแวร์จริงจะมีสัญญาณรบกวนรูปแบบอื่นร่วมด้วย แต่การเลือกใช้ Depolarizing Channel ถือเป็นโมเดลมาตรฐานที่สะท้อนกรณีเลวร้ายที่สุด (Worst-Case) ของการสูญเสียข้อมูลควอนตัม ซึ่งเหมาะสมต่อการวิเคราะห์แนวโน้ม ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3) (Preskill, 2018)

$$E(\rho) = (1 - p)\rho + 3p(X\rho X + Y\rho Y + Z\rho Z) \quad (3)$$

โดย p คือความน่าจะเป็นของการเกิดข้อผิดพลาด โดยงานวิจัยนี้ได้แทรกสัญญาณรบกวนนี้เข้าไปในวงจร ณ ตำแหน่งสำคัญ 2 จุด ได้แก่

1. Gate Error: แทรก Depolarizing error หลังการกระทำของทุก Single-Qubit Gate และ Two-Qubit Gate (CNOT) โดยแปรผันค่า p ตั้งแต่ 0% ถึง 2%
2. Readout Error: แทรกความผิดพลาดในขั้นตอนการวัดผล (Measurement) เพื่อจำลองความไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ตรวจวัด

5.4 กระบวนการวัดผลและตัวชี้วัด (Measurement and Metrics)

การทดลองใช้วิธีการ Loschmidt Echo โดยเริ่มจากการเตรียมระบบให้อยู่ในสถานะพื้นฐาน (Ground State) จากนั้นทำการวิวัฒนาการไปข้างหน้า (Forward) เป็นเวลา t และวิวัฒนาการย้อนกลับ (Backward) เป็นเวลา t ภายใต้วงจรที่มีสัญญาณรบกวน

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพ ได้ใช้ตัวชี้วัดหลักคือ ความน่าจะเป็นในการย้อนกลับ (Return Probability) หรือค่า Fidelity ซึ่งนิยามจากการวัดความน่าจะเป็นที่ระบบจะกลับคืนสู่สถานะตั้งต้นเดิมได้อย่างสมบูรณ์หลังสิ้นสุดกระบวนการ ดังสมการที่ (4) (Goussev et al., 2012)

$$F(t) = |\langle \psi_0 | U_{noise}^\dagger(t) U_{ideal}(t) | \psi_0 \rangle|^2 \quad (4)$$

โดยค่านี้จะสะท้อนถึงระดับความคงทนของข้อมูลควอนตัมที่เหลืออยู่ ทั้งนี้ การเก็บข้อมูลดำเนินการโดยการรันซ้ำ (Shots) จำนวน 4,096 ครั้ง ต่อจุดข้อมูล โดยมีการกำหนดค่าสุ่มเริ่มต้น (Random Seed) และหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ครอบคลุมความน่าจะเป็นเชิงสถิติ เพื่อให้มั่นใจว่าค่าเฉลี่ยทางสถิติมีความแม่นยำและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ งานวิจัยได้กำหนดเกณฑ์สำหรับความลึกวิกฤต (Critical Depth) ไว้ที่จุดซึ่งค่า Fidelity ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ 0.5 ($F < 0.5$) เนื่องจากเป็นจุดที่ระบบสูญเสียข้อมูลความน่าจะเป็นไปครึ่งหนึ่ง ซึ่งถือเป็นขอบเขตสูงสุด (Upper Bound) ที่ผลลัพธ์จากการจำลองจะยังคงมีความน่าเชื่อถือเชิงสถิติ

6. ผลการวิจัย (Results)

6.1 ผลการจำลองพฤติกรรมการย้อนกลับของเวลาในระบบควอนตัมโมเลกุล

ผลการจำลองพบว่าในกรณีอุดมคติ (Ideal) ค่า Fidelity คงที่ที่ 1.0 แต่เมื่อมีสัญญาณรบกวน ค่า Fidelity ลดลงในลักษณะ Exponential Decay ($F(t) \propto e^{-\gamma t}$) ซึ่งยืนยันผลของ Decoherence ที่ทำลายข้อมูลควอนตัม พฤติกรรมนี้สะท้อนกลไกการสลายตัวเชิงคุณภาพ โดยพบว่าพารามิเตอร์การสลายตัว (γ) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตรงกับระดับสัญญาณรบกวน

6.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างระดับสัญญาณรบกวนและขนาดระบบ

การเปรียบเทียบระบบ $N = 4$ และ $N = 6$ พบปรากฏการณ์ความไวต่อสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นตามขนาด โดยที่ระดับ Noise 1% ระบบ $N = 6$ มีค่า Fidelity ลดลงต่ำกว่า 0.5 เร็วกว่าระบบ $N = 4$ ถึง 4 Time Steps แสดงถึงผลกระทบที่สะสมทวีคูณในระบบที่ซับซ้อน

ผลการวิเคราะห์ ดัง Figure 1. เป็นความน่าจะเป็นในการย้อนกลับ (Fidelity) ของ Loschmidt Echo เทียบกับจำนวนก้าวเวลา (Time Steps) ภายใต้สภาวะอุดมคติและมีสัญญาณรบกวน (ระดับสัญญาณรบกวน $\epsilon = 0.005, 0.01, 0.02$, จำนวน shots = 4,096 และเกณฑ์ Critical Depth ที่ Fidelity = 0.5)

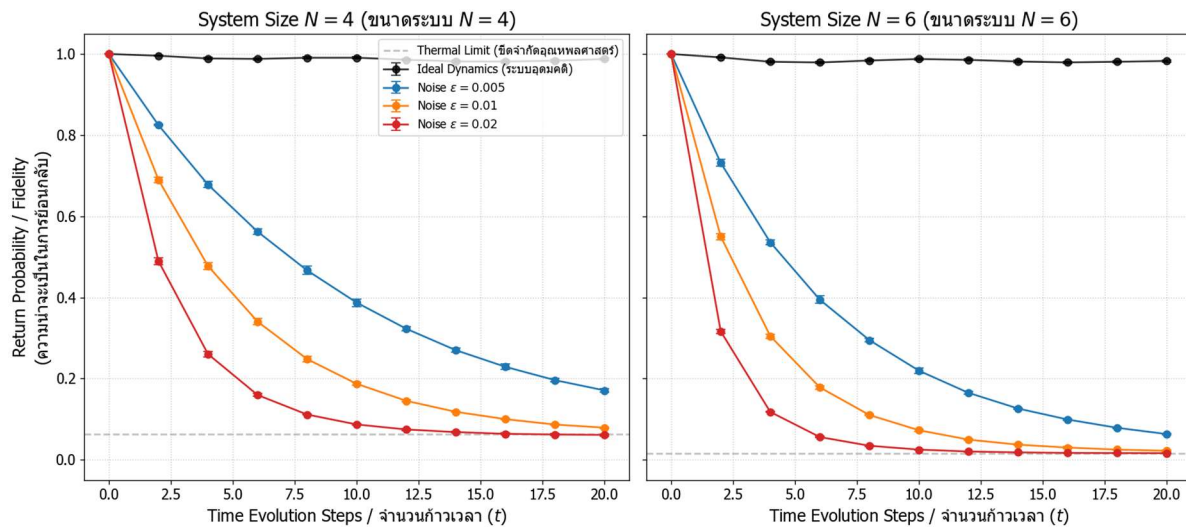


Figure 1. Return Probability/ Fidelity

6.3 ผลการศึกษาเกณฑ์ความลึกวิกฤตสำหรับประเมินขีดจำกัดเบื้องต้นของคอมพิวเตอร์ควอนตัม

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณ พบความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างขนาดของระบบและความทนทานต่อสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ระบบที่มีขนาดใหญ่ ($N = 6$) แสดงความไวต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าระบบขนาดเล็ก ($N = 4$) อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาที่ระดับสัญญาณรบกวน $\epsilon = 0.01$ พบว่าค่าความลึกวิกฤต (Critical Depth) ลดลงจาก 15 ชั้น (ในกรณี $N = 4$) เหลือเพียง 11 ชั้น (ในกรณี $N = 6$) ซึ่งคิดเป็นอัตราการถดถอยของประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Reduction) ประมาณร้อยละ 27-45 (ซึ่งคำนวณจากสมการ $[D_c(N=4) - D_c(N=6)] / D_c(N=4) * 100$) ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าความผิดพลาดในระบบควอนตัมมีการสะสมตัวเร็วขึ้นเมื่อระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น

7. สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) ผลการจำลองยืนยันอย่างชัดเจนว่า “สัญญาณรบกวน” (Noise) เป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ลายสมบัตการย้อนกลับของระบบควอนตัม โดยทำให้เกิดการสูญเสียความเชื่อมโยง (Decoherence) ของข้อมูล 2) จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงปริมาณพบว่า เมื่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ความผิดพลาดจะสะสมตัวเร็วขึ้นในอัตราเร่ง (Non-Linear Accumulation) และ 3) การพิจารณาเกณฑ์ความลึกวิกฤตแสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาที่ยาวนานที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำสั้นลงอย่างมาก

จากหลักฐานเชิงประจักษ์นี้ สรุปได้ว่าคอมพิวเตอร์ควอนตัมในยุคปัจจุบัน (NISQ) ยังมีข้อจำกัดทางกายภาพในการจำลองกระบวนการที่มีความซับซ้อนและยาวนาน ดังนั้น หากปราศจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction) หรือการบรรเทาความผิดพลาด (Error Mitigation) ที่มีประสิทธิภาพ ศักยภาพในการใช้งานจริงจะถูกจำกัดอยู่เพียงการคำนวณระยะสั้นและวงจรที่มีความลึกไม่มากนัก

8. อภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

1. กลไกการแพร่กระจายของความผิดพลาด (Mechanism of Error Propagation) พบว่า ผลการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความผิดพลาดในระบบควอนตัมไม่ได้เกิดขึ้นแบบแยกส่วน (Local) แต่มีลักษณะการแพร่กระจายแบบลูกโซ่ (Domino Effect) โดยเฉพาะในระบบที่มีความพันกัน (Entanglement) สูง การที่ระบบขนาด $N = 6$ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมากกว่า $N = 4$ อย่างมีนัยสำคัญนั้น สอดคล้องกับทฤษฎีความโกลาหลเชิงควอนตัม (Quantum Chaos) (Peres, 1984) ซึ่งอธิบายว่าในระบบที่ซับซ้อน ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยที่ควิบิตหนึ่งจะถูกขยายผล (Amplify) ผ่านเกต Two-Qubit (เช่น CNOT) ไปยังควิบิตอื่น ๆ ทั่วทั้งระบบ ส่งผลให้สถานะรวม (Global State) สูญเสียความถูกต้องรวดเร็วกว่าการคาดการณ์เชิงเส้น

2. ศักยภาพของ Critical Depth ในฐานะตัวชี้วัด (Benchmarking Utility) ค่า Critical Depth ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเป็นตัวชี้วัด (Metric) ที่สะท้อนความเป็นจริง (Realistic Benchmark) ได้ดีกว่าการวัดเพียงค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Average Gate Fidelity) เนื่องจาก Critical Depth บอกถึง “ขีดจำกัดการใช้งานจริง” เราสามารถรับรู้ได้ว่าถึงขั้นตอนนี้ก่อนที่ผลลัพธ์จะเชื่อถือไม่ได้ ค่านี้จึงมีประโยชน์อย่างมากสำหรับนักพัฒนาอัลกอริทึมในการออกแบบวงจรให้มีความลึกไม่เกินขีดจำกัดของฮาร์ดแวร์นั้น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงผลลัพธ์ที่เป็นขยะ (Noise-Induced Output)

3. ข้อจำกัดและการขยายผล (Limitations and Scalability) อย่างไรก็ตาม การนำกฎการขยายขนาด (Scaling Law) ที่ได้จากการจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับระบบที่ใหญ่กว่า $N = 6$ หรือบนฮาร์ดแวร์จริง ควรทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ Depolarizing Noise ซึ่งเป็นโมเดลความผิดพลาดแบบทั่วไป ในขณะที่ฮาร์ดแวร์จริงอาจมีความผิดพลาดรูปแบบอื่นร่วมด้วย เช่น Crosstalk หรือ Coherent Error ซึ่งอาจทำให้ค่า Critical Depth ลดลงเร็วกว่าที่แบบจำลองคาดการณ์ไว้ ดังนั้น การทดสอบเพิ่มเติมบนเครื่องควอนตัมจริงและการใช้เทคนิค Error Mitigation จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการยืนยันผลในระดับสเกลที่ใหญ่ขึ้นนอกจากนี้ ควรตระหนักว่าผลลัพธ์จากการจำลองด้วย Depolarizing Noise อาจประเมินความทนทานสูงกว่าความเป็นจริงเมื่อเทียบกับฮาร์ดแวร์จริงของ IBM Quantum ที่มีระบบสัญญาณรบกวนที่ซับซ้อนกว่า

9. ข้อเสนอแนะงานวิจัย (Recommendation)

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิค Zero-Noise Extrapolation (ZNE) และเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลจากการรันบนเครื่องควอนตัมจริง (Real Hardware) รวมถึงควรมีการขยายผลในเชิงทฤษฎีเพื่อสร้างแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนาย Scaling Law ของ Critical Depth ในระบบที่มีขนาดคิวบิตสูงขึ้น ($N > 10$) ได้อย่างแม่นยำ

10. องค์กรความรู้จากงานวิจัย (Contributions)

งานวิจัยนี้เสนอแนวคิด “ค่าความลึกวิกฤต” (Critical Depth) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะวงจรควอนตัมที่มีความชัดเจนในเชิงปฏิบัติมากกว่าการวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Average Gate Fidelity) แบบดั้งเดิม ตัวชี้วัดนี้ช่วยให้สามารถระบุขอบเขตการคำนวณสูงสุดที่ฮาร์ดแวร์ยุค NISQ จะรองรับได้ก่อนที่ผลลัพธ์จะสูญเสียความน่าเชื่อถือ

11. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ขอขอบคุณแหล่งองค์ความรู้และเอกสารวิชาการแบบเปิด รวมถึงซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส Qiskit ซึ่งมีส่วนช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการจำลองและวิเคราะห์ระบบควอนตัมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

12. การเปิดเผยการใช้ปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Declaration of Generative AI)

งานวิจัยนี้มีการใช้เทคโนโลยี Generative AI เพื่อสนับสนุนการปรับปรุงโค้ดการจำลองด้วย Qiskit และการเรียบเรียงถ้อยคำทางเทคนิคในบางส่วนของต้นฉบับ ทั้งนี้ผู้วิจัยเป็นผู้ดำเนินการสืบค้นวรรณกรรม ออกแบบการทดลอง วิเคราะห์ผลลัพธ์ และตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาทั้งหมดด้วยตนเอง และยังคงรับผิดชอบต่อความถูกต้อง ความครบถ้วน ความน่าเชื่อถือของงานวิจัยฉบับนี้ทั้งหมด

13. การแสดงบทบาทผู้เขียน (CRediT Author Statement)

Sittinon Chotirotpon: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal Analysis, Investigation, Writing - Original Draft, Visualization.

The author has read and approved the final manuscript.

14. เอกสารอ้างอิง (References)

- Aleksandrowicz, G., Alexander, T., Barkoutsos, P., Bello, L., Ben-Haim, Y., Bucher, D., Cabrera-Hernández, F. J., Carballo-Franquis, J., Chen, A., Chen, C.-F., Chow, J. M., Córcoles-Gonzales, A. D., Cross, A. J., Cross, A., Cruz-Benito, J., Culver, C., De La Puente González, S., De La Torre, E., Ding, D., ... Zoufal, C. (2019). *Qiskit: An Open-source Framework for Quantum Computing* [Computer Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2562111>
- Anand, A., Srivastava, S., Gangopadhyay, S., & Ghose, S. (2024). Simulating Quantum Chaos on a Quantum Computer. *Scientific Reports*, 14, 26890. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76448-0>
- Goussev, A., Jalabert, R. A., Pastawski, H. M., & Wisniacki, D. A. (2012). Loschmidt Echo. *Scholarpedia*, 7(8), 11687. <https://doi.org/10.4249/scholarpedia.11687>
- Jurcevic, P., Javadi-Abhari, A., Bishop, L. S., Lauer, I., Bogorin, D. F., Brink, M., Capelluto, L., Günlük, O., Itoko, T., Kanazawa, N., Kandala, A., Keefe, G. A., Krsulich, K., Landers, W., Lewandowski, E. P., McClure, D. T., Nannicini, G., Narasgond, A., Nayfeh, H. M., ... Gambetta, J. M. (2021). Demonstration of Quantum Volume 64 on a Superconducting Quantum Computing System. *Quantum Science and Technology*, 6(2), 025020. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abe519>
- Kim, Y., Eddins, A., Anand, S., Wei, K. X., van den Berg, E., Rosenblatt, S., Nayfeh, H., Wu, Y., Zaletel, M., Temme, K., & Kandala, A. (2023). Evidence for the Utility of Quantum Computing Before Fault Tolerance. *Nature*, 618(7965), 500-505. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06096-3>
- Lesovik, G. B., Sadovskyy, I. A., Suslov, M. V., Lebedev, A. V., & Vinokur, V. M. (2019). Arrow of Time and Its Reversal on the IBM Quantum Computer. *Scientific Reports*, 9(1), 4396. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40765-6>
- Peres, A. (1984). Stability of Quantum Motion in Chaotic and Regular Systems. *Physical Review A*, 30(4), 1610-1615. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.30.1610>
- Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>