ระบบจำลองการทำงานของระบบบิทคอยน์ที่สามารถต่อขยายได้
Exntensible Simulation Framework for Bitcoin

ณัฐพล ธนิตสุขการ และ ภารุจ รัตนวรพันธุ์
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Email: nuttapon.t@ku.th, paruj.r@ku.th

I. บทนำ

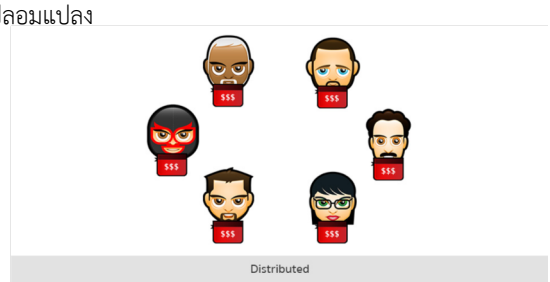
ในยุคปัจจุบันเรามีการแลกเปลี่ยนสินค้า ซื้อของออนไลน์กันมากขึ้น แต่การโอนเงินข้ามประเทศหรือทำธุรกรรมข้ามประเทศนั้น มีขั้นตอนต้องยืนยันเยอะมาก จนในสุดท้ายแล้วได้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนเงินออนไลน์แบบใหม่ขึ้นมา นั่นก็คือระบบสกุลเงินดิจิตัลที่พัฒนามาจากบล็อกเชนนั่นเอง ซึ่งบิทคอยน์หรือสกุลเงินดิจิตัลแรกของโลกนั้น ถูกสร้างขึ้นมาด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ ไม่มีใครเป็นเจ้าของบิทคอยน์ ไม่มีรูปร่างและไม่สามารถจับต้องได้ โดยระบบของบิทคอยน์ ถูกรันโดยคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งานทั่วโลก โดยใช้ระบบซอฟต์แวร์ในการถอดสมการคณิตศาสตร์ โดยคุณสมบัติสำคัญของ บิทคอยน์คือ โปร่งใส 100% กล่าวคือสามารถตรวจสอบรายการย้อนหลังได้ อีกทั้งยังมีความรวดเร็วและความปลอดภัยสูงมากอีกด้วย ระบบบิทคอยน์ประสบความสำเร็จอย่างมากในทางปฏิบัติ แต่ขาดทฤษฎีที่เข้มแข็งมารองรับทำให้การทำนายปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับระบบทำได้ยาก ดังนั้นโครงงานนี้จึงมีส่วนช่วยอย่างมากในการจำลองการทำงานภายในของระบบบิทคอยน์ สามารถเห็นถึงโครงสร้างและปรากฏการณ์ต่างๆ ทำให้ง่ายต่อการศึกษาและพยากรณ์พฤติกรรมของบิทคอยน์ในอนาคต

- วัตถุประสงค์ของการศึกษา
  - เพื่อให้นิสิตมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทดลองใช้ระบบการแลกเปลี่ยนแบบสกุลเงินดิจิตัล ที่กำลังเป็นที่นิยม ณ ปัจจุบัน
  - เป็นระบบสกุลเงินดิจิตัลที่เข้าใจง่ายและใช้งานง่าย
  - สามารถใช้โหนดหลายๆโหนดมาช่วยกัน mine ช่วยกันต่อบล็อกเชนได้อย่างถูกต้อง
  - มีการทำงานที่รวดเร็ว เนื่องจากเขียนด้วยภาษา Golang ซึ่งเหมาะอย่างมากในการทำงานในระบบแบบกระจาย (distributed system)
  - เป็นฐานโค้ด (codebase) ที่มีความกระชับและปรับแต่งได้ง่าย กล่าวคือสามารถนำโมดูล (module) อื่นๆ เข้ามาต่อเข้าเพื่อขยายขอบเขตการทำงานได้ง่าย
- ขอบเขตของการทำโครงงาน
  - สามารถทำรายการได้อย่างถูกต้อง เช่น การโอนเงิน
  - สามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์มาขุด (Mining) เพื่อช่วยระบบยืนยันการทำรายการได้อย่างถูกต้อง
  - สามารถใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน
  - ตัวระบบต้องมีความปอลดภัยสูง
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
  - ได้ระบบสกุลเงินดิจิตัลที่ทำงานรวดเร็ว มีความเรียบง่ายและคล้ายคลึงกับระบบบิทคอยน์ที่ผู้คนทั่วโลกใช้งานอยู่ในขณะนี้
  - สามารถใช้งานได้จริงในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เพื่อนิสิตจะได้สร้างความเคยชินกับระบบสกุลเงินเข้ารหัสที่จะเผชิญในอนาคต
  - สามารถเป็นแบบอย่างให้แก่ผู้ที่สนใจในด้านบล็อกเชนและสกุลเงินเข้ารหัสนำไปต่อยอดต่อไปได้
  - ได้นำความรู้หลากหลายสาขามาประยุกต์ใช้งานเข้าด้วยกัน ทั้งทางด้านวิทยาการเข้ารหัสลับ (Cryptography), ด้านเน็ตเวิร์กและด้านระบบการทำงานแบบกระจาย

II. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

A. *บล็อกเชน (Blockchain)*

บล็อกเชนคือรูปแบบการเก็บข้อมูลหรือเรียกว่าเป็นฐานข้อมูลแบบหนึ่งของระบบที่ไม่มีศูนย์กลางแต่เชื่อถือได้และโกงยาก กล่าวคือการให้ทุกคนถือเอกสารชุดเดียวกันคนละก๊อปปี้ด้วยวิธีแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-Peer) ก็คือไม่ต้องมีคนตรงกลาง ทุกคนที่อยู่บนระบบเน็ตเวิร์คช่วยกันรันระบบ ซึ่งทำให้ระบบไม่มีทางล่มตราบใดที่ยังมีคนอยู่ในระบบเน็ตเวิร์คอยู่ ข้อมูลก็ไม่มีทางหายสาบสูญเพราะทุกคนช่วยกันถือไว้คนละชุด หากข้อมูลมีการเพิ่มขึ้นหรือมีบล็อกใหม่ ทุกคนในระบบเน็ตเวิร์คก็จะได้ข้อมูลใหม่ไปเพิ่มฐานข้อมูลในมือตัวเองด้วยกันทุกคน เมื่อมีการอัปเดตก็จะอัปเดตด้วยกัน โดยมั่นใจได้ว่าเอกสารเหล่านั้นเชื่อถือได้แน่นอนไม่มีการปลอมแปลง

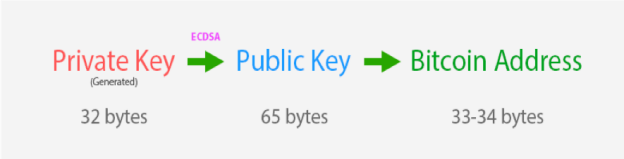


ภาพที่ 1: ทุกคนถือข้อมูลของทั้งระบบเอาไว้คนละก็อปปี้

B. ศาสตร์การเข้ารหัสลับ (Cryptography)

เป็นสกุลเงินดิจิตัลที่ถูกพัฒนามาโดยหลักการสำคัญทาง Cryptography 2 หลักการหลักๆ คือ วิทยาการเข้ารหัสลับแบบคีย์สาธารณะ (public-key cryptography) และ แฮชฟังก์ชัน (hash function) วิทยาการเข้ารหัสลับแบบคีย์สาธารณะ ถูกนำมาใช้ทำเป็นกระเป๋าเงินและกุญแจรับเงิน คือ คีย์สาธารณะ (public key) และ คีย์ส่วนตัว (private key) ตามลำดับ แฮชฟังก์ชันหรือฟังก์ชันที่รับอินพุตขนาดใดๆเข้ามาและให้เอาต์พุตออกไปเป็นข้อความที่มีความยาวคงที่ เช่น 256 บิต ซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญ 3 ประการที่จะถูกนำมาใช้ในเรื่องนี้ คือ

1) One-way function กล่าวคือ เราไม่สามารถทำย้อนกลับจากเอาต์พุตไปหาอินพุตได้
2) Hiding property กล่าวคือ เราไม่สามารถรู้ส่วนใดส่วนหนึ่งของอินพุตได้จากเอาต์พุต
3) Puzzle friendly กล่าคือ เราต้องใช้การออกแรง (brute force) เท่านั้น เพื่อที่จะได้มาซึ่งอินพุตที่เข้าคู่กับเอาต์พุตที่เราต้องการ

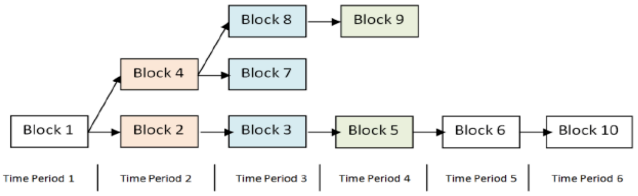


ภาพที่ 2: การใช้วิทยาการเข้ารหัสลับแบบคีย์สาธารณะในระบบสกุลเงินดิจิตัล

C. คอนเซนซัสแบบกระจาย (Distributed Consensus)

เป็นโปรโตคอลที่ใช้เพื่อการทำงานแบบกระจาย (decentralization) โดยการใช้เครือข่ายเพียร์ทูเพียร์ ให้แก่อาสาสมัครที่จะรับหน้าที่เก็บข้อมูลบัญชี (ledger) หรือบัญชีต่างๆบล็อกเชน โดยคอนเซ็นซัสแบบกระจาย (distributed consensus) มีวัตถุประสงค์หลักที่จะกระจายข้อมูลที่ถูกต้องไปยังโหนดต่างๆ และทำให้แน่ใจว่าทุกโหนดบนเน็ตเวิร์คบล็อกเชน มีรายการข้อมูลที่ถูกต้องและเหมือนกัน โดยมีหลักการทำงาน หลักๆดังนี้

1) คอยสอดส่องและสะสมรายการ ใหม่ๆที่ถูกปล่อยออกมา
2) ตรวจสอบความถูกต้องของรายการนั้นๆ
3) ส่งต่อรายการให้โหนด (node) ใกล้เคียง



ภาพที่ 3: ทุกคนจะยอมรับข้อมูลที่ถูกต้องและเหมือนกันในที่สุด

III. รายละเอียดการพัฒนา

A. การออกแบบระบบ

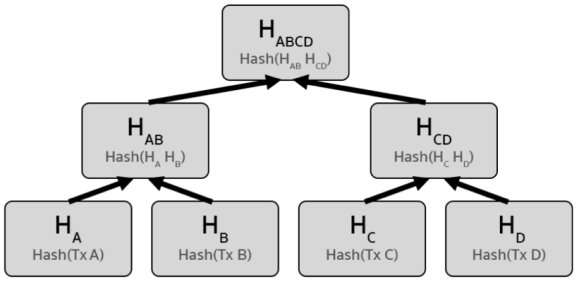
ออกแบบ header fields ของระบบ มีขนาด 80 bytes ประกอบด้วย

1) version 4 bytes: เป็นตัวบอกว่าบล็อกนี้ ต้องทำตามกฎการยืนยันบล็อกแบบไหน
2) previous block hash: ค่าแฮชของบล็อกก่อนหน้า
3) merkle root hash: เป็นการทำดับเบิ้ลแฮชของต้นไม้ merkle ที่เก็บแฮชของ transaction ทั้งหมดในบล็อกนั้นไว้
4) time: เป็นเวลาที่อยู่ในรูปของ unix timestamp ที่บล็อกนั้นๆ เกิดขึ้นมา
5) target bits: เป็นตัวกำหนดความยากของการ mine บล็อกนั้นว่าต้องการค่าแฮชที่ต่ำกว่า target เท่าไหร่
6) nonce: เป็นตัวเลขใดๆ ที่ถูกสุ่มขึ้นมาเพื่อให้แฮชรวมทั้งบล็อกต่ำกว่าค่า target ที่กำหนดไว้

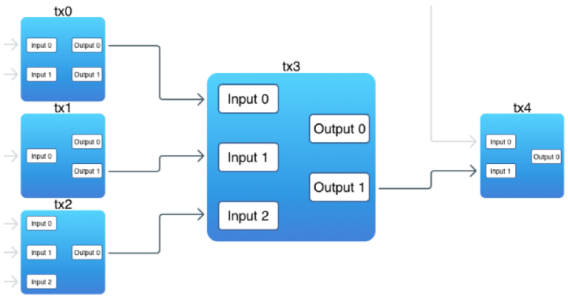
โดยแต่ละ block จะบรรจุ transaction หลายๆอันอยู่ภายใน ซึ่ง transaction แต่ละอันจะต้องระบุ input และ output เพื่อที่จะบอกว่าอ้างอิงเงินจาก transaction อะไร แล้วจะส่งเงินไปที่ transaction ไหนต่อไป

Block Header	**version**	4 bytes
	prev_block_hash	32 bytes
	merkle_root_hash	32 bytes
	time	4 bytes
	bits	4 bytes
	nonce	4 bytes
Transactions		Coinbase Transaction
		Transaction 1
		Transaction 2
		...
		...
block_hash		32 bytes

ภาพที่ 4: โครงสร้างของบล็อก

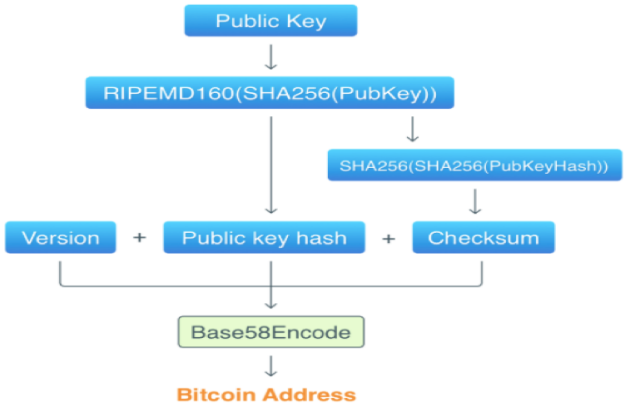


ภาพที่ 5: โครงสร้างของต้นไม้ merkle root



ภาพที่ 6: การอ้าง transaction input จาก transaction output ก่อนหน้า

โดยใช้หลักการของศาสตร์การเข้ารหัสลับที่ชื่อว่า Elliptic Curve Cryptography (ECDSA) ซึ่งเป็นหนึ่งในศาสตร์การเข้ารหัสโดยใช้คีย์สาธารณะ (Publick-key Cryptography) เป็นตัวรองรับความปลอดภัยของระบบ ECDSA จะสร้าง public key และ private key ที่เข้าคู่กันขนาด 512 bytes โดยมี public key เป็น Bitcoin address ซึ่งสามารถให้ผู้ใช้คนอื่น โอนเงินมาให้เราผ่านทางที่อยู่นี้ได้ และเก็บ private key ไว้เป็นตัวแทนความเป็นเจ้าของสมุดเล่มนี้ เพื่อใช้ในการถอนเงินหรือทำธุรกรรมต่างๆได้แต่เพียงผู้เดียว



ภาพที่ 7: ขั้นตอนการสร้าง Bitcoin address จาก public key

การที่ผู้ใช้งานสามารถส่งต่อข้อมูลไปให้ผู้ใช้คนอื่นในระบบได้ผ่านการทำงานแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-Peer) ได้มีการทำ cluster node membership, status dissemination และ failure detection เพื่อทำให้ระบบเพียร์ทูเพียร์เราเสถียรและป้องกันทนทานต่อความผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังทำ Atomic broadcast ด้วย TCP แทนที่จะใช้การ Broadcast/Multicast แบบปกติที่เป็น UDP ที่มีข้อเสียด้าน UDP Buffer Size ที่จะไม่รับรองการส่งข้อมูล เมื่อส่งข้อมูลขนาดใหญ่กว่า 512 bytes

เมื่อผู้ใช้เยอะขึ้นมากๆ การส่งต่อ transaction, การส่งต่อบล็อกย่อมก่อให้เกิดความไม่สอดคล้องกันได้ง่ายขึ้น เช่นบางกรณีนั้น ได้เกิดการแยกกันของบล็อกเชนเป็นสองสาย ซึ่งสุดท้ายจะถูกมองเป็นสายเดียวโดยยึดนโยบาย longest chain ตามบิทคอยน์โดย consensus Proof-of-Work ที่เราเลือกจะเป็นตัวการหลักในการจัดการปัญหานี้

B. รายละเอียดของระบบ

1) Core: ตัวส่วนหลักของระบบซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนระบบเดียวกันกับ Bitcoin ซึ่งภายในจะมี public ledger เป็น blocks ต่อการเป็นสาย และในแต่ละ block จะบรรจุไปด้วย transaction ที่เก็บธุรกรรมของทุกคนในระบบที่ผ่านการยืนยันมาแล้วเอาไว้
2) Proof-of-Work: ระบบมีการประยุกต์โปรโตคอลคอนเซนซัสหลากหลายรูปแบบ เพื่อทดสอบหาระบบที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในระบบจริงของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ เช่น Proof-of-Stake แต่เนื่องด้วยยังไม่มีการจัดการปัญหา Nothing-at-Stake และ LongRange-Attack ได้ จึงยังไม่ควรนำมาใช้จริงในระบบ สุดท้ายจึงได้เลือกใช้ตัว Proof-of-Work แบบเดียวกันกับ Bitcoin ซึ่งอาจจะมีปัญหาการกินทรัพยากรบ้าง แต่ก็เป็น consensus ที่เสถียรและนิยมกันมากที่สุดในขณะนี้
3) Peer-to-Peer: มีการใช้งานระบบเพียร์ทูเพียร์ในรูปแบบของโปรโตคอลข่าวลือ (Gossip Protocol) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีนึงที่มักจะถูกนำมาใช้ในระบบแบบกระจาย โดยในระบบได้มีการนำมาใช้เพื่อเป็นการสื่อสารกันระหว่างโหนด ให้โหนดได้คุยกัน เช่น ทำการกระจายหรือแลกเปลี่ยน transaction และ block กับโหนดที่อยู่ติดต่อ นอกจากโหนดต่างๆ จะต้องมีการทำส่งข่าวลือต่อๆกันแล้ว โหนดจำเป็นต้องมีการแพร่กระจายของสถานะโหนดข้างเคียงและแจ้งให้โหนดอื่นๆรู้ด้วย เราเรียกเหตุการณ์เช่นนี้ว่า status dissemination และโหนดต่างๆเหล่านี้มีโอกาสที่จะดับไปหรือมีโอกาสที่จะเป็นโหนดชั่วร้ายได้อีกตัว เราจึงจำเป็นต้องมีวิธีการจัดการในด้านนี้หรือที่เรียกว่า failure detection ในโปรโตคอลอีกด้วย

C. ขั้นตอนการพัฒนา

1) ศึกษาการทำงานของระบบเหรียญดิจิตัล โดยศึกษาพื้นฐานต่างๆจาก e-book ของ Prince-ton University คือ Bitcoin and cryptocurrency technology ซึ่งมีหัวข้อสำคัญต่างๆ ดังนี้
   a) เหตุผลที่เกิดเหรียญดิจิตัลขึ้นมาเพราะต้องการแก้ปัญหาการโอนเงินข้ามประเทศที่มีความล่าช้าเพราะขั้นตอนที่ยุ่งยากหรือมีการเก็บค่าธุรกรรมที่มากเกินจำเป็น
   b) การทำให้ทั่วโลกใช้เงินในสกุลเดียวกันเพื่อที่ในอนาคตจะเป็นโลกที่ไร้พรมแดนที่แท้จริง
   c) หลักการเข้าข้อมูลและการนำมาใช้ในการสร้างเหรียญดิจิตัล เพื่อให้มั่นใจว่าเราสามารถเชื่อถือในตัวเหรียญได้ว่ามีความปลอดภัยและมีความมั่นคงสูง
   d) เหรียญดิจิตัลตัวแรกของโลกซึ่งก็คือบิทคอยน์ ว่ามีโครงสร้างอย่างไรและทำอย่างไรถึงสามารถโอนเงินไปมาข้ามโลกได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีศูนย์กลางของระบบ
   e) แมคคานิคซึ่มหลักของบิทคอยน์ว่ามีการทำงานอย่างไร ทั้งการทำ transaction และการต่อบล็อก
2) ศึกษาโปรโตคอลคอนเซนซัสที่ใช้ในการทำงานด้านระบบแบบกระจายหลายๆตัว เพื่อที่จะสามารถนำมาพิจารณาเลือกใช้ เช่น Proof of Work, Proof of Stake, Proof of Im-portance, Proof of Authority, Proof of Elapsed Time, Proof of Burn, Proof of Ca-pacity, Practical Byzantine Fault Tolerance, Tendermint Core, Loop Fault Tol-erance, Delegated Byzantine Fault Tolerance, Federated Byzantine Agree-ment, Paxos Consensus และ Raft Consensus
3) ศึกษาจุดประสงค์และจุดเด่นของเหรียญดิจิตัลหลายๆสกุล เพื่อที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงงาน โดยมุ่งเน้นไปที่ความเร็วในการโอน, ความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้, จำนวนบล็อกที่สามารถต่อได้ นอกจากนี้แต่ละเหรียญยังมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น Rip-

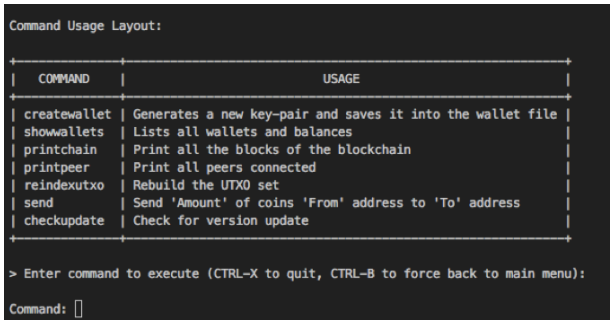
ple ร่วมมือกับธนาคารหลายแห่งทั่วโลก เพื่อที่จะต้องการเป็น Financial coin หรือ ZCash coin ที่เน้นที่ความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้ หรือ ไม่สามารถตรวจสอบได้ และยังมีเหรียญที่เป็น Assets ที่ไป Contact กับเหรียญอื่น เช่น Ethereum , Waves, NEO เป็นต้น

4) ศึกษาข้อดี-ข้อเสียของภาษาต่างๆ และดูความเหมาะสมของภาษาที่จะเอามาใช้ในงานจริง สุดท้ายจึงได้เลือกใช้ภาษา Go เพราะมีข้อดีที่เหมาะกับการทำ blockchain programming ในหลายๆ ด้าน เช่น
   a) โค้ดที่เขียนในภาษา Go สามารถเข้าใจได้ง่ายและมีความสะอาด
   b) เร็วและมีสิทธิภาพสูง ไม่เหมือน Python ที่เป็น interpreted language แต่ Go เป็น compiled language เหมือนกับ C ซึ่งมีจุดเด่นเรื่องความเร็วเพราะมี over-head ตอนจัดการข้อผิดพลาดประเภท on-the-fly ได้ดี
   c) ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานด้านระบบแบบกระจายได้ดี โดยสามารถเห็นได้จากซอร์ฟแวร์ดังๆหลายตัว เช่น Docker และ MongoDB ซึ่งถูกเขียนขึ้นมาจากภาษา Go แม้กระทั่ง Codebase ของ Ethereum และ Hyperledger ก็ถูกเขียนด้วยภาษา Go เช่นกัน
   d) Goroutines ที่สามารถทำงานด้านการเห็นพ้อง (concurrency) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการทำเทรด (thread) ด้วยภาษาโปรแกรมมิ่งอื่นๆ 1 เทรด อาจใช้แรมมากสุดถึง 1024 กิโลไบต์ แต่การใช้ Goroutines จะใช้แรมมากสุดไม่เกิน 4 กิโลไบต์
5) ทำความเข้าใจเรื่องการโปรแกรมมิ่งบิทคอยน์จาก 3 assignments ที่มาจาก Bitcoin and Cryptocurrency Technology ของ Princeton University คือ
   a) Scrooge Coin assignment จะให้สร้างการจัดการธุรกรรม (transaction han-dler) เพื่อให้สามารถยืนยันความถูกต้องของการทำธุรกรรม, หรือตรวจจับการทำธุรกรรมที่ไม่ถูกต้อง เช่น double spending attack
   b) Consensus from Trust assignment โดยงานนี้เราจะได้รับกราฟความน่าเชื่อถือของโหนดแต่ละโหนดในระบบเน็ตเวิร์กมา โดยเรามีหน้าที่ต้องตรวจจับโหลดชั่วร้ายที่มีอยู่ในระบบ
   c) Block Chain assignment เราจะต้องจัดการกับธุรกรรม โดยการนำไปเข้าบล็อก แล้วต่อไปอยู่บนบล็อกเชนจำลองได้
6) ศึกษาตัวโค้ดหลักจาก https://github.com/bitcoin/bitcoin ซึ่งเป็นโค้ดจากระบบ บิทคอยน์หลัก เขียนด้วยภาษา C++ และบล็อกโพสของ Jeiwen เป็นแนวทางในการเขียนและออกแบบในรูปของภาษา Go
7) ทำการทดสอบระบบทั้งหมด
8) จัดทำเอกสารโครงงาน

IV. ผลการพัฒนาโครงงาน

A. *ผลการออกแบบและทดสอบระบบ*

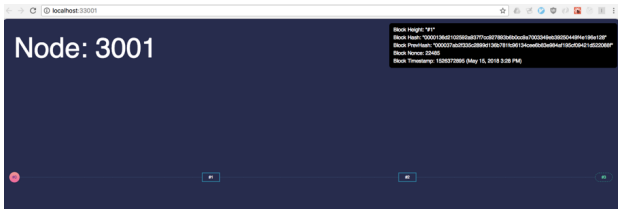
1) ในส่วนของ Core จะได้หน้าต่างผู้ใช้งานที่สามารถทำหน้าที่ได้ครบถ้วนและเพียงพอต่อการใช้งาน
   - createwallet ใช้สร้าง address ของกระเป๋าเงินใหม่
   - showwallets ใช้สำหรับแสดงกระเป๋าเงินทั้งหมด
   - printchain แสดงสถานะบล็อกเชนตั้งแต่ต้นจนถึงปัจจุบัน
   - printpeer แสดง neighbor nodes
   - reindexutxo จัดอินเด็กซ์การเก็บ unspent transaction ouput ใหม่
   - send ทำการโอนเงินไปให้ address อื่นๆ
   - checkupdate เป็นการ manual update สถานะของบล็อก



ภาพที่ 8: หน้า User Interface

ภาพที่ 9: ทดสอบการโอนเงิน

2) ในส่วนของ Web Visualization สามารถแสดงผลสถานะบล็อกปัจจุบันและรายละเอียดของแต่ละบล็อกได้เป็น tree ที่สวยงาม



ภาพที่ 10: หน้า Web Visualization

B. *วิธีวัดผลและประเมินผล*

การวัดและประเมินผล จะทดลองโดยการทำธุรกรรมจำนวนมหาศาลและมีโหนดที่ทำการยืนยัน transaction อยู่เยอะมากๆ เพื่อทดสอบดูว่าระบบจะเข้าสู่ consensus ได้ในที่สุด

V. ผลการดำเนินโครงงานและวิจารณ์

A. สรุปผลการพัฒนาโครงงาน

ทั้งในส่วน Core และ Web Visualization สามารถทำงานและแสดงผลออกมาได้อย่างถูกต้อง

สามารถทำรายการได้อย่างถูกต้อง เช่น การโอนเงิน	**[ผ่าน]**
ระบบจะเข้าสู่คอนเซนซัสในที่สุด	**[ผ่าน]**
สามารถมีคนยืนยัน transaction ได้หลายคน	**[ผ่าน]**
ระบบมีความปลอดภัยจากการเกิด double spending	**[ผ่าน]**
ผู้ใช้ใหม่สามารถเข้าร่วมได้ตลอดเวลา	**[ผ่าน]**
มีเว็บวิชวลไลซ์สถานะบล็อกเชนของแต่ละผู้ใช้งาน	**[ผ่าน]**
โค้ดมีความกระชับ, สามารถเข้าใจและต่อยอดได้ง่าย	**[ผ่าน]**
โครงงานสามารถนำไปใช้ได้จริง	**[ผ่าน]**

B. ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1) ไม่สามารถทำงานให้เสร็จได้ตามแผนที่วางไว้ เนื่องจากงานในบางส่วนกินเวลามากกว่าที่คาดไว้
2) มีไลบรารี่ให้เลือกใช้งานน้อยมาก เนื่องจากเป็นฟิลด์ที่ยังใหม่และเลือกใช้ภาษาที่มีเครื่องมือสำเร็จรูปยังไม่มากพอ
3) ในส่วนของโค้ดหลัก ยังขาดการทำคู่มือการใช้งานเพื่อเพิ่มความง่ายให้นำไปใช้ต่อได้

C. ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1) สามารถนำไปต่อยอดเป็นระบบจำลองการทำงานเพื่อตรวจจับอัตราการเกิดบล็อกกำพร้าในระบบบิทคอยน์ ซึ่งจะมีส่วนช่วยอย่างมากในการทำนายพฤติกรรมบางอย่างของระบบ
2) ใช้ระบบการจำลองนี้เป็นโค้ดพื้นฐาน ในการใช้ต่อยอดบนระบบสกุลเงินดิจิตัลอื่นๆ เช่น Ethereum เพื่อทำการจำลองและทำนายพฤติกรรมได้เช่นเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Bitcoin and Cryptocurrency technologies, https://d28rh4a8wq0iu5.cloudfront.net/bitcointech/readings/princeton_bitcoin_book.pdf, [สืบค้นเมื่อ มกราคม 2561]

[2] Understanding Blockchain Consensus Models, https://www.persistent.com/wp-content/uploads/2017/04/WP-Understanding-Blockchain-Consensus-Models.pdf?pdf=Understanding-Blockchain-Consensus-Models, [สืบค้นเมื่อ มกราคม 2561]

[3] Blockchain DIY with Python, https://clumdee.github.io/blockchain-DIY-with-python, [สืบค้นเมื่อ มกราคม 2561]

[4] Blockchain for Geek, https://nuuneoi.com/blog/blog.php?read_id=900, [สืบค้นเมื่อ กุมภาพันธ์ 2561]

[5] Go by Example, https://gobyexample.com, [สืบค้นเมื่อ กุมภาพันธ์ 2561]

[6] Blockchain programming with Go, https://jeiwan.cc, [สืบค้นเมื่อ กุมภาพันธ์ 2561]

[7] Consensus protocol for Blockchain, https://nuuneoi.com/blog/blog.php?read_id=933, [สืบค้นเมื่อ มีนาคม 2561]