ระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง

Secure and Flexible Multiple-Agent Key Recovery System

กนกวรรณ กันยะมี[1] และ จันทร์บูรณ์ สถิตวิริยวงศ์[2]

[1]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
[2]คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ – วิทยาการเข้ารหัสลับช่วยเพิ่มความมั่นคงปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวให้กับผู้ใช้งานระบบเครือข่าย วิทยาการเข้ารหัสลับแบบสมมาตรใช้กุญแจลับเดียวกันทั้งการเข้ารหัสลับและการถอดรหัสลับข้อมูล ในกรณีที่ผู้รับไม่สามารถใช้กุญแจในการถอดรหัสลับข้อมูลได้หรือภาครัฐต้องการใช้สิทธิ์ในการเข้าถึงข้อมูล จะต้องขอใช้บริการกู้คืนกุญแจ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง เรียกว่า เอสเอฟเอ็ม-เคอาร์เอส โดยเน้นกระบวนการทำงานที่มีความมั่นคงและความยืดหยุ่นสูงในการบริหารจัดการจำนวนเอเจนต์ที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ ให้สอดคล้องกับโยบายและสภาพแวดล้อมของการใช้งาน และได้ออกแบบกระบวนการกู้คืนกุญแจอย่างเหมาะสม โดยใช้แนวคิดการแบ่งแยกความลับ สามารถรองรับเหตุการณ์ที่มีบางเอเจนต์ล่ม เพื่อป้องกันปัญหาการล้มเหลวเพราะจุดเดียว อีกทั้งระบบยังสนับสนุนการตรวจสอบข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายและทำงานบนโครงสร้างพื้นฐานกุญแจสาธารณะ

คำสำคัญ – การกู้คืนกุญแจ, เอเจนต์ในการกู้คืนกุญแจ, ฟิลด์ในการกู้คืนกุญแจ, กุญแจลับ, การแบ่งแยกความลับ

ABSTRACT – Cryptography helps strengthen security and privacy of data network activities. Symmetric cryptography uses the same session key for both message encryption and decryption. In case the session key is unavailable or legal investigation of transmitting messages is needed, an appropriate recovery mechanism is required. This paper presents a Secure and Flexible Multiple-Agent Key Recovery System called SFM-KRS. It provides high secrecy of session key and high flexibility to manage the minimum number of key recovery agents (KRAs) for successful key recovery according to security policies and requirements. The key recovery process is appropriately designed using the concept of secret splitting. Since the session key can be recovered despite the failure of some key recovery agents, the problem of single point of failure can be avoided. Finally, it supports law enforcement needs and is based on the Public Key Infrastructure (PKI).

KEYWORDS – Key Recovery, Key Recovery Agent, Key Recovery Field, Session Key, Secret Splitting

1. บทนำ

ในปัจจุบันการติดต่อสื่อสารข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางทั่วโลก สังเกตได้จากอัตราการเติบโตของผู้ใช้งานเครือข่ายที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การติดต่อสื่อสารเกิดความมั่นคงปลอดภัยและมีความเป็นส่วนตัว จึงมีการใช้วิทยาการเข้ารหัสลับ (Cryptography) โดยการใช้กุญแจ (Key) สำหรับการเข้ารหัสลับและการถอดรหัสลับข้อมูล อย่างไรก็ตาม อาจมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในทางที่มิชอบ คือใช้การเข้ารหัสลับเพื่อการปิดบังซ่อนเร้นการกระทำที่เป็นอันตรายต่อผู้อื่นและสังคม ดังนั้น จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการออกกฎหมายคุ้มครองผู้ใช้งานจากภัยคุกคามต่าง ๆ ด้วยการให้อำนาจสิทธิ์แก่ภาครัฐในการตรวจสอบข้อมูลที่ต้องสงสัยที่มีการส่งผ่านระบบเครือข่าย

เริ่มต้นจากรัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ประกาศใช้ระบบการเข้ารหัสลับแบบใหม่ เรียกว่า ระบบฝากกุญแจ (Key Escrow System (KES)) [1] และประกาศให้ใช้มาตรฐานการเข้ารหัสลับแบบสมมาตร (Symmetric Encryption) วิธีนี้เอื้อให้แก่ภาครัฐในการเข้าถึงข้อมูลที่ต้องการตรวจสอบ ด้วยการจัดเก็บกุญแจไว้กับซอฟต์แวร์ที่มีภาครัฐเป็นผู้รับผิดชอบ ซึ่งจะช่วยให้รัฐบาลสามารถตรวจสอบข้อมูลที่ต้องสงสัยและสกัดกั้นการกระทำอันเป็นการบ่อนทำลายความมั่นคงทางสังคมได้ แต่จะส่งผลให้ความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งานลดน้อยลง

ต่อมาทีไอเอส (Trusted Information System: TIS) ได้นำเสนอระบบการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery System) [2] ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาเรื่องความเป็นส่วนตัว และแก้ปัญหากุญแจเข้ารหัสลับแบบใช้ครั้งเดียว (Session Key) ของผู้รับหาย (ต่อจากนี้จะเรียกย่อ ๆ ว่า กุญแจลับ) โดยระบบนี้ไม่ใช้วิธีการฝากกุญแจ แต่จะใช้วิธีการเก็บกุญแจลับไว้ในฟิลด์สำหรับการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Field: *KRF*) โดยจะเก็บ *KRF* ไว้ที่ผู้รับ เมื่อผู้รับต้องการกู้คืนกุญแจ หรือเมื่อรัฐบาลต้องการตรวจสอบข้อมูล จึงจะส่ง *KRF* ให้กับหน่วยงานที่ทำหน้าที่กู้คืนกุญแจ วิธีการนี้จะทำให้ผู้ใช้งานระบบมีความเป็นส่วนตัวมากขึ้น กุญแจมีความมั่นคง และลดปัญหาของการใช้ฐานข้อมูลขนาดใหญ่

จากนั้นก็ได้มีการปรับปรุงและพัฒนางานวิจัยทางด้านระบบการกู้คืนกุญแจอย่างต่อเนื่องโดยเน้นในหลาย ๆ ด้าน เช่น การพิสูจน์ตัวจริง [3] การบริหารจัดการกุญแจ [4] การเข้าถึงข้อมูลอย่างถูกต้องตามกฎหมายที่ให้ความสำคัญกับเรื่องความเป็นส่วนตัวของผู้ใช้งาน [5] และการพัฒนาระบบการกู้คืนกุญแจที่มีการปรับปรุงในเรื่องความมั่นคงให้สูงขึ้น [6, 7]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการกู้คืนกุญแจเป็นงานวิจัยที่มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายอย่างมั่นคงปลอดภัย โดยใช้การสื่อสารที่มีการเข้ารหัสลับและการถอดรหัสลับข้อมูล อาทิเช่น ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้งาน คือ กุญแจสูญหาย หรือกุญแจชำรุดไม่สามารถนำไปใช้ในการถอดรหัสลับได้ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับองค์กรภาคส่วนต่าง ๆ เช่น การขาดความเอาใจใส่ของพนักงาน พนักงานลาออกฉุกเฉิน พนักงานไม่ประสงค์ดีต่อองค์กร และปัญหาการตรวจสอบข้อมูลต้องสงสัยที่ส่งผ่านระบบเครือข่าย เป็นต้น

งานวิจัยในช่วงแรกจะเป็นการนำเสนอแนวทางการกู้คืนกุญแจแบบเอเจนต์เดี่ยว (Single Key Recovery Agent: S-KRA) [5, 8] โดยมีเอเจนต์ที่ให้บริการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Agent: KRA) ทำหน้าที่ในการกู้คืนกุญแจ และสนับสนุนการตรวจสอบข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมาย แต่ระบบการกู้คืนกุญแจแบบเอเจนต์เดี่ยวยังมีจุดอ่อนอยู่หลายประการ เช่น ความลับของกุญแจลับ ภัยคุกคามที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีผลต่อระบบและกุญแจลับ รวมทั้งปัญหาการผูกขาดในการรักษาความลับของกุญแจลับ เป็นต้น

งานวิจัยในช่วงหลังได้เพิ่มความมั่นคงของระบบการกู้คืนกุญแจ เพื่อแก้ปัญหาภัยคุกคาม ลดโอกาสการสมรู้ร่วมคิด (Collusion) และลดปัญหาการผูกขาดกุญแจ โดยการนำเสนอแนวทางการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ (Multiple Key Recovery Agent: M-KRS) [6, 7] เช่นงานวิจัย Multiple Agent Model [6] ที่ได้ออกแบบให้แต่ละ KRA ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืนกุญแจทำหน้าที่ในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ โดยให้ศูนย์กลางการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Center: KRC) ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการประสานงานระหว่าง KRA ต่าง ๆ กับผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจ (Requester) และได้ออกแบบให้ระบบมีการสนับสนุนการตรวจสอบข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามยังพบจุดอ่อนของระบบ M-KRS ไม่ว่าจะเป็นประเด็นทางด้าน (1) ความมั่นคงของกุญแจลับ (2) ระบบไม่มีความพร้อมใช้งาน หรือไม่สามารถให้บริการกู้คืนกุญแจได้เมื่อมีเอเจนต์ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืนล่มหรือขัดข้องในการ

ให้บริการ และ (3) ระบบยังขาดความสามารถในการตรวจสอบเอเจนต์แปลกปลอม

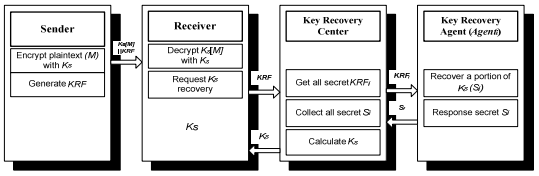
จากปัญหาดังกล่าว จึงเกิดงานวิจัย เอสเอชเอเอ็ม-เคอาร์เอส (SHAM-KRS: Simple High-Availability Multiple-agent Key Recovery System) ขึ้น [9] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ทั้งหมด โดย SHAM-KRS ได้นำเสนอกระบวนการกู้คืนกุญแจที่มีกระบวนการทำงานที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ให้ความสำคัญในเรื่องความลับของกุญแจ และมีการออกแบบ *KRF* ที่ใช้แนวคิดการแบ่งแยกความลับ (Secret Splitting) ของกุญแจลับให้กับหลายเอเจนต์ อย่างไรก็ตาม ด้วยกระบวนการทำงานและโครงสร้าง *KRF* ของ SHAM-KRS ที่มีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ระบบจึงยังขาดฟังก์ชั่นในการบริหารจัดการจำนวนเอเจนต์ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจลับ

ดังนั้นเพื่อให้ระบบมีความมั่นคงสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นในการบริหารจัดการจำนวนเอเจนต์ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจลับให้สอดคล้องกับนโยบายและสภาพแวดล้อมของการใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง คือ เอสเอฟเอ็ม-เคอาร์เอส (SFM-KRS : Secure and Flexible Multiple-Agent Key Recovery System) โดยที่ SFM-KRS มีคุณสมบัติและความสามารถของระบบดังนี้ (1) ผู้ดูแลระบบหรือผู้ใช้งานสามารถกำหนดเอเจนต์ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจลับได้ (2) มีความพร้อมใช้งานและมีความน่าเชื่อถือสูง เนื่องจากสามารถรองรับกรณีที่มีปัญหาเอเจนต์ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืนล่ม (Single point of failure) ดังนั้นเมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น ระบบก็ยังสามารถให้บริการกู้คืนกุญแจได้ (3) มีฟังก์ชั่นการตรวจสอบหรือการพิสูจน์ตัวจริงของเอเจนต์ในกลุ่มการกู้คืน และ (4) SFM-KRS มี *KRF* ที่เป็นมาตรฐาน สามารถรองรับการตรวจสอบข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายจากรัฐบาลหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบได้ โดยกำหนดให้ระบบทำงานบนโครงสร้างพื้นฐานกุญแจสาธารณะ (Public Key Infrastructure) หรือพีเคไอ (PKI) [10]

2. ระบบการกู้คืนกุญแจ SFM-KRS

SFM-KRS เป็นระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง โดยมีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องในระบบดังนี้ (1) ผู้ส่ง (Sender) (2) ผู้รับ (Receiver) (3) ศูนย์กลางการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Center: KRC) และ (4) เอเจนต์ในการกู้คืนกุญแจ (Key Recovery Agent: KRA) ในการเริ่มต้นกระบวนการทำงานทุกองค์ประกอบของระบบจะต้องมีกุญแจคู่ของตัวเอง คือ กุญแจส่วนตัว (*Kr*) และกุญแจสาธารณะ (*Ku*) ที่มีใบรับรองจากหน่วยงานออกใบรับรอง (Certificate Authority: CA) เพื่อใช้ในการสื่อสารระหว่างกันอย่างมั่นคงปลอดภัย โดยมีการเชื่อถือกัน (Trusted) บนโครงสร้างพื้นฐานของกุญแจสาธารณะ (Public Key Infrastructure: PKI)

ภาพรวมการทำงานของระบบ SFM-KRS ได้แสดงในรูปที่ 1 และมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 1. ภาพรวมการทำงานของระบบ SFM-KRS

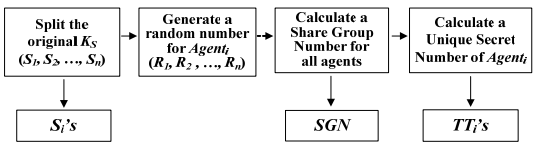
2.1 กระบวนการด้านผู้ส่ง

ในขั้นตอนเริ่มต้นของผู้ส่งนั้น จะมีการร้องขอกุญแจลับ (K_S) จากหน่วยงานให้บริการกุญแจ เช่น KDC [11] หรือเคอร์เบอรอส [12] เป็นต้น เพื่อใช้ในการเข้ารหัสลับข้อมูลที่ต้องการส่งไปให้ผู้รับ ในขั้นตอนนี้จะมีการใช้กุญแจลับร่วมกันระหว่างผู้รับกับผู้ส่ง

การรับส่งข้อมูลที่รองรับการกู้คืนกุญแจลับนั้น ผู้ส่งจะต้องสร้าง *KRF* เพื่อใช้สำหรับการกู้คืนกุญแจลับ ซึ่งฟิลด์นี้จะถูกแนบไปกับข้อมูลต้นฉบับที่ถูกเข้ารหัสด้วยกุญแจลับ ($K_S[M]||KRF$) เพื่อส่งให้ผู้รับ กระบวนการสร้าง *KRF* สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมการสร้าง KRF

กระบวนการเตรียมการสร้าง *KRF* เพื่อนำไปใช้ในการกู้คืนกุญแจลับ สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. การเตรียมค่าส่วนประกอบย่อยของ KRF

ภายใน *KRF* ประกอบด้วย (1) *KRF* ย่อย ๆ (KRF_i) และ (2) *Other Information* โดย KRF_i จะมีจำนวน *n* ชิ้น (เมื่อ *n* คือ จำนวนเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ)

ภายใน KRF_i จะประกอบด้วย (1) ส่วนประกอบของกุญแจ (S_i) (2) Share Group Number (*SGN*) และ (3) Unique Secret Number (TT_i)

แต่ละส่วนประกอบมีความสำคัญดังนี้คือ S_i คือ ส่วนประกอบของกุญแจลับ *SGN* เป็นค่าสำหรับการระบุตัวตนของแต่ละ KRA ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืน *(Agent)* TT_i เป็นค่าสำหรับการกู้คืน S_i ในกรณีที่เอเจนต์ล่ม *SGN* เป็นค่าสำหรับการตรวจสอบตัวตนของ KRA ที่อยู่ในกลุ่มการกู้คืน และ *Other Information* เก็บค่าอื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับการระบุตัวตนหรือค่าสำหรับการตรวจสอบเพื่อเพิ่มความมั่นคง

ขั้นตอนการเตรียมการสร้าง *KRF* สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) แบ่งกุญแจลับออกเป็น *n* ชิ้น (เมื่อ *n* คือ จำนวนเอเจนต์ทั้งหมดที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจ) โดยใช้แนวคิดการแบ่งแยกความลับ (Secret Splitting) [13] และกำหนดให้กุญแจลับสามารถกู้คืนได้จากการทำ Exclusive-OR (XOR) ส่วนประกอบของกุญแจทุกชิ้น ซึ่งกระบวนการแบ่งกุญแจลับสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

- สุ่มตัวเลข จำนวน *n*-1 ตัว สำหรับ *n*-1 เอเจนต์ (*Agent*) เช่น $S_1, S_2, \ldots, S_{n-1}$ สำหรับ $Agent_1, Agent_2, \ldots, Agent_{n-1}$ ตามลำดับ
- คำนวณ S_n สำหรับ $Agent_n$ ด้วย $S_1 \oplus S_2 \oplus \ldots \oplus S_{n-1} \oplus K_S$

2) สุ่มตัวเลข (*R*) สำหรับทุก ๆ เอเจนต์ (R_i)

3) คำนวณหาค่าความลับ สำหรับกลุ่มการกู้คืนกุญแจ (*SGN*) ด้วยการทำ XOR ค่า R_i

$$SGN = R_1 \oplus R_2 \oplus \ldots \oplus R_n$$

4) คำนวณหาค่าพิเศษ (*TT*) สำหรับทุก ๆ เอเจนต์ (TT_i) เพื่อใช้ในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ ในกรณีที่มีเอเจนต์ในกลุ่มการกู้คืนล่ม

$$TT_i = S_i \oplus SGN$$

2.1.2 ขั้นตอนการประกอบ KRF

ในขั้นตอนนี้ได้ออกแบบ *KRF* ให้มีความยืดหยุ่นในการกำหนดจำนวนเอเจนต์ขั้นต่ำสำหรับการกู้คืนกุญแจลับ และสามารถกู้คืนกุญแจลับได้อย่างสมบูรณ์ในกรณีที่มีเอเจนต์ในกลุ่มการกู้คืนล่ม ซึ่งได้นำหลักการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เรื่องพาวเวอร์เซต (Power Set) มาช่วยในกระบวนการสำรองค่า *TT* ไปไว้ใน *KRF*

การสำรองค่า TT_i ไปไว้ใน KRF_i สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1) เลือกจำนวน KRA ที่จะใช้ในการกู้คืนกุญแจ (*n*)

2) ระบุจำนวน KRA ขั้นต่ำสำหรับการกู้คืนกุญแจ (*mr*) โดยที่ $mr \leq 2$

3) คำนวณหาจำนวนของ KRA ไว้สำหรับการกระจายค่า TT_i (*t*) ว่าจะกระจายค่า TT_i ไปให้กับ KRA กี่ตัว

$$t = n - mr \text{ เมื่อ } t \leq mr$$

4) กระจายค่า TT_i ของ KRA_i (A_i) ไปยังเอเจนต์ที่อยู่ใกล้เคียง จำนวน *t* เอเจนต์ เมื่อ *i=1* ถึง *n* ตามฟังชั่นต่อไปนี้

$$A_i \rightarrow \begin{cases} A_{i+1}, A_{i+2}, \ldots, A_{i+t} & \text{where } i<mr \text{ and } i=mr \\ A_{i+1}, A_{i+2}, \ldots, A_n, A_1, A_2, \ldots, A_j & \text{where } i>mr \text{ and } j=i-mr \\ A_1, A_2, \ldots, A_t & \text{where } i=n \end{cases}$$

KRF ประกอบด้วย KRF_i*'s* และ *Other Information* ที่นำมาเข้ารหัสลับด้วยกุญแจสาธารณะของ KRC (Ku_{KRC}) ดังนี้

$$KRF = Ku_{KRC}[KRF_i\text{'s} \,||\, Other\ Information]$$

และ KRF_i ประกอบด้วย S_i *SGN* และ TT_i*'s* ที่นำมาเข้ารหัสลับด้วยกุญแจสาธารณะของแต่ละเอเจนต์ (Ku_{agi}) ดังนี้

$$KRF_i = Ku_{agi}[S_i \,||\, SGN \,||\, TT_i\text{'s}]$$

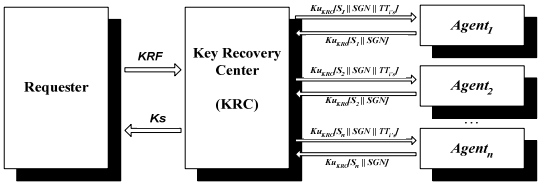
2.2 กระบวนการด้านผู้รับ

ผู้รับจะได้รับ $K_S[M]$ และ *KRF* จากนั้นผู้รับจะทำการถอดรหัสข้อมูลด้วยกุญแจลับ หากไม่สามารถถอดรหัสลับข้อมูลได้

จะต้องทำการร้องขอการกู้คืนกุญแจลับ ด้วยการส่ง *KRF* ไปยัง KRC เพื่อร้องขอการกู้คืนกุญแจลับ

2.3 กระบวนการด้าน KRC และ KRA

ขั้นตอนนี้เป็นการกู้คืนกุญแจลับโดยการทำงานร่วมกันระหว่าง KRC กับ KRA โดยที่ KRC เป็นศูนย์กลางในการรวบรวมส่วนประกอบของกุญแจลับที่ได้รับมาจาก KRA และทำหน้าที่กู้คืนกุญแจลับ ส่วน KRA ทำหน้าที่ในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับ โดยมีกระบวนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3. ภาพรวมของกระบวนการกู้คืนกุญแจลับ

2.3.1 การกู้คืนกุญแจลับ

กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ KRC ได้รับ *KRF* จากผู้ร้องขอการกู้คืนกุญแจลับ (ผู้รับหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบในการตรวจสอบข้อมูล) เท่านั้น โดยสามารถแสดงกระบวนการได้ดังรูปที่ 4 ถึง 6 ตามลำดับ และมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1) KRC ถอดรหัส *KRF* ด้วยกุญแจส่วนตัวของตนเอง (Kr_{KRC}) จะได้ส่วนประกอบของ *KRF* (KRF_i) คือ $Ku_{agi}[KRF_i]$ จำนวน n ชิ้น

2) KRC ส่ง KRF_i ให้ $Agent_i$

3) $Agent_i$ ถอดรหัสด้วยกุญแจส่วนตัวของตนเอง (Kr_{agi}) จะได้ S_i, *SGN* และ TT_i

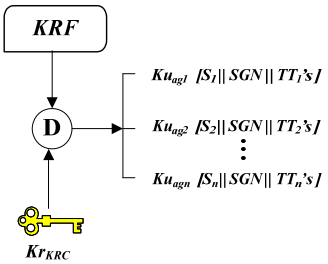
4) $Agent_i$ เข้ารหัส S_i และ *SGN* ด้วย Ku_{KRC} จะได้ $Ku_{KRC}[S_i \,||\, SGN]$

5) $Agent_i$ ส่ง $Ku_{KRC}[S_i \,||\, SGN]$ ให้ KRC

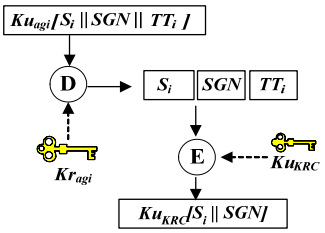
6) KRC ถอดรหัสด้วย Kr_{KRC} จะได้ S_i และ *SGN*

7) KRC ตรวจสอบ *SGN* ว่าเป็นเอเจนต์ในกลุ่มการกู้คืนจริง

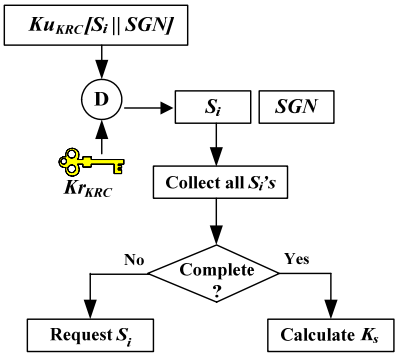
8) KRC คำนวณหา K_S ด้วย $S_1 \oplus S_2 \oplus \ldots \oplus S_n$ และเข้ารหัส K_S ด้วย กุญแจสาธารณะของผู้ร้องขอ (Ku_{req}) ส่งให้กับผู้ร้องขอต่อไป



รูปที่ 4. การถอดรหัส KRF โดย KRC



รูปที่ 5. การกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับโดย KRA



รูปที่ 6. การกู้คืนกุญแจลับโดย KRC

2.3.2 การกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับ (กรณีเอเจนต์ล่ม)

ในกรณีที่มีเอเจนต์ในกลุ่มการกู้คืนล่ม ส่งผลให้ KRC รวบรวม S_i ได้ไม่ครบ ดังนั้นจะเป็นหน้าที่ของ KRC ที่จะต้องทำการร้องขอการกู้คืนส่วนประกอบกุญแจที่หายไปหรือที่ยังไม่ได้รับ โดยทำการร้องขอกับเอเจนต์ที่สามารถให้บริการได้ในกลุ่มการกู้คืนเดียวกัน ซึ่งจะต้องเป็นเอเจนต์ที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียง (ถัดไป) กับเอเจนต์ที่ล่ม โดยมีขั้นตอนการร้องขอดังต่อไปนี้

1) KRC ตรวจสอบ S_i ว่ายังไม่ได้รับมาจากเอเจนต์ ($Agent_i$) ใด

2) KRC เข้ารหัสคำร้องขอการกู้คืน ($req\text{-}S_i$) และ SGN ด้วยกุญแจสาธารณะของเอเจนต์ถัดไป ($Agent_{nxt}$) ที่จะให้ทำการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจ (Ku_{nxt} of $Agent_{nxt}$) จะได้ $Ku_{nxt}[req\text{-}S_i \,||\, SGN \,||\, Other\ Information]$

3) $Agent_{nxt}$ ถอดรหัส $Ku_{nxt}[req\text{-}S_i \,||\, SGN]$ ด้วยกุญแจส่วนตัวของตัวเอง (Kr_{nxt})

4) $Agent_{nxt}$ ตรวจสอบ SGN และคำนวณ S_i ด้วย $S_i = TT_i \oplus SGN$

5) $Agent_{nxt}$ เข้ารหัส S_i และ SGN ด้วย Ku_{KRC} จะได้ $Ku_{KRC}[S_i \,||\, SGN]$

6) $Agent_{nxt}$ ส่ง $Ku_{KRC}[S_i \,||\, SGN]$ ให้ KRC เพื่อทำการรวบรวม S_i และกู้คืน K_S

3. การเปรียบเทียบความสามารถของระบบ

งานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของระบบกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ทั้งหมด 3 ระบบดังนี้ (1) ระบบที่มีผู้วิจัยไว้ดั้งเดิมคือ Multiple-Agent Model [6] (2) ระบบที่ผู้วิจัยได้ทำไว้ก่อนหน้าคือ SHAM-KRS [7] และ (3) ระบบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอ คือ SFM-KRS ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. การเปรียบเทียบความสามารถของระบบ

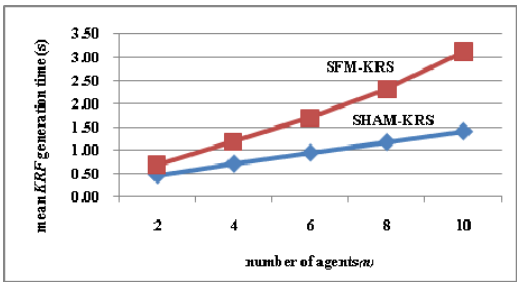
ความสามารถของระบบ	Multiple Agent Model	SHAM-KRS	SFM-KRS
ใช้หลักการ Secret Splitting	-	✓	✓
กู้คืนกุญแจลับได้ แม้ในกรณีเกิดเหตุการณ์มีเอเจนต์ล่ม	-	✓	✓
มีความยืดหยุ่นในการกำหนดจำนวนเอเจนต์ขั้นต่ำ	-	-	✓
มีความสามารถตรวจสอบเอเจนต์แปลกปลอม	-	✓	✓
มีรูปแบบมาตรฐาน *KRF*	✓	✓	✓

จากตารางที่ 1 จะสังเกตเห็นได้ว่า SFM-KRS เป็นระบบที่มีความสามารถมากที่สุด โดยมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความสามารถในการบริหารจัดการจำนวนเอเจนต์ กล่าวคือ ผู้บริหารหรือผู้ดูแลระบบสามารถกำหนดจำนวนเอเจนต์ขั้นต่ำที่ใช้สำหรับการกู้คืนกุญแจ เพื่อให้เข้ากับสภาพแวดล้อมการใช้งานได้ ส่งผลให้ระบบมีความยืดหยุ่นและมั่นคงเพิ่มขึ้น

4. การประเมินสมรรถนะของ SFM-KRS

การประเมินสมรรถนะได้พิจารณาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเวลา (หน่วยเป็นวินาที) ที่ใช้ในการสร้าง *KRF* และเวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจระหว่าง SFM-KRS กับ SHAM-KRS [9] รวมทั้งได้ทำการทดลองเพื่อหาเวลาที่ใช้ในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับในกรณีที่มีเอเจนต์ล่ม โดยทดลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง Genuine Intel® CPU, 794 MHz หน่วยความจำขนาด 1 GB

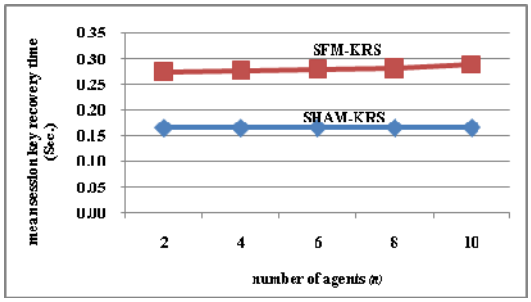
4.1 เวลาเฉลี่ยของการสร้าง *KRF*



รูปที่ 7. เวลาเฉลี่ยของการสร้าง KRF

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า SFM-KRS ใช้เวลาเฉลี่ยในการสร้าง *KRF* สูงกว่า SHAM-KRS เพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ เหตุที่มีค่าเฉลี่ยเวลามากกว่านั้น เนื่องจาก SFM-KRS จะต้องใช้เวลาเฉลี่ยสำหรับกระบวนการสำรองค่า *TT* เพื่อใช้ในการกู้คืนกุญแจในกรณีที่มีเอเจนต์ล่ม และใช้สำหรับการบริหารจัดการเอเจนต์ขั้นต่ำในการกู้คืนกุญแจ เพิ่มความมั่นคงให้กับระบบ ส่งผลให้ระบบมีความยืดหยุ่นมากขึ้น และกราฟจะสูงขึ้นตามลำดับเล็กน้อย เมื่อใช้จำนวนเอเจนต์เพิ่มขึ้น

4.2 เวลาที่ใช้ในการกู้คืนกุญแจลับ



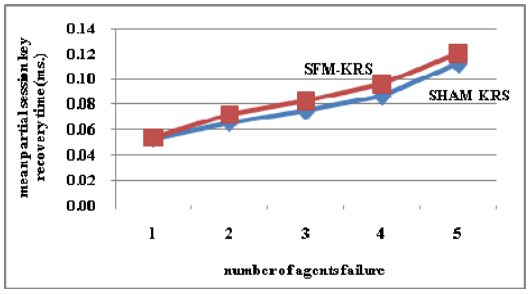
รูปที่ 8. เวลาเฉลี่ยของการกู้คืนกุญแจลับ

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นว่า SFM-KRS ใช้เวลาเฉลี่ยในการกู้คืนกุญแจลับมากกว่า SHAM-KRS เล็กน้อย เนื่องจาก SFM-KRS มีโครงสร้างของ *KRF* ที่เพิ่มการสำรองค่า *TT* ที่ใช้สำหรับการบริหารจัดการเอเจนต์ เพิ่มความมั่นคงให้กับระบบ จึงส่งผลให้ SFM-KRS มีความยืดหยุ่นมากกว่า SHAM-KRS แต่ใช้เวลาในการกู้คืนกุญแจลับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ และกราฟค่อนข้างคงที่ เมื่อใช้จำนวนเอเจนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากได้ออกแบบกระบวนการในการกู้คืนกุญแจลับให้มีความเหมาะสมและไม่ซับซ้อน

4.3 เวลาที่ใช้ในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจในกรณีที่มีเอเจนต์ล่ม

ในหัวข้อนี้ได้ทำการทดลองสองแบบ เพื่อจะได้ผลลัพธ์ของเวลาที่ใช้ในกระบวนการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจเมื่อเกิดกรณีที่มีเอเจนต์ล่มอย่างถูกต้องชัดเจน (หน่วยเป็นมิลลิวินาที (millisecond: ms))

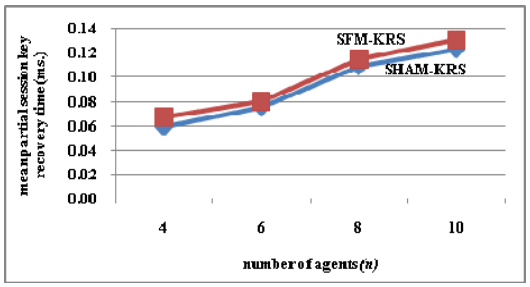
การทดลองแบบแรก กำหนดการทดลองโดยใช้เอเจนต์ในการกู้คืนกุญแจลับ (n) จำนวน 7 เอเจนต์ และสมมติให้มีเอเจนต์ล่มตั้งแต่ 1 ถึง 5 เอเจนต์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9. เวลาเฉลี่ยของการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับ เมื่อกำหนดให้มีเอเจนต์ล่มเท่ากับ 1 ถึง 5 เอเจนต์

การทดลองแบบที่สอง กำหนดเอเจนต์ในการทดลอง จำนวน 4, 6, 8 และ 10 ตามลำดับ และกำหนดให้มีจำนวนเอเจนต์ล่มเท่ากับ n-2 ซึ่งเป็นจำนวนที่เอเจนต์ล่มได้สูงสุด ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 10

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SFM-KRS และ SHAM-KRS ใช้เวลาเฉลี่ยในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับเพียงเล็กน้อย ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อมีจำนวนเอเจนต์ล่มเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับเพิ่มขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 10. เวลาเฉลี่ยของการกู้คืนส่วนประกอบของกุญแจลับ เมื่อกำหนดให้มีเอเจนต์ล่ม เท่ากับ n-2

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง คือ SFM-KRS ซึ่งเป็นระบบการกู้คืนกุญแจแบบหลายเอเจนต์ที่มีกระบวนการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ใช้เวลาเฉลี่ยในการทำงานน้อย โดยได้ออกแบบให้อยู่บนพื้นฐานของเรื่องการรักษาความลับ (Confidentiality) การรักษาความสมบูรณ์ (Integrity) และมีความพร้อมใช้งาน (Availability) สูง ระบบสามารถบริหารจัดการจำนวนเอเจนต์

ขั้นต่ำที่ใช้สำหรับการกู้คืนกุญแจลับได้ และสามารถรองรับปัญหาการล่มของเอเจนต์อย่างได้ผล ส่งผลให้ระบบมีความมั่นคงและยืดหยุ่นสูง รวมทั้งมีฟิลด์สำหรับการกู้คืนกุญแจที่เป็นมาตรฐาน และสามารถรองรับการตรวจสอบข้อมูลโดยชอบด้วยกฎหมายอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] D.E. Denning, "The US Key Escrow Encryption Technology," *Computer Communications*. Vol. 17, No. 7, pp. 453-457, July 1994.

[2] S.T. Walker, S.B. Lipner, C.M. Ellison and D.M. Balenson, "Commercial Key Recovery", *Communications of the ACM*, Vo1. 39, No. 3, pp. 41-47, March 1996.

[3] Y.Y. Al-Salqan, "Cryptographic Key Recovery", *the 6th IEEE Computer Society Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems*. October 1997, pp. 34-37.

[4] B.W. McConnell, E.J: Appel, Enabling Privacy, Commerce, Security and Public Safety in the Global Information Infrastructure. http://epic.org/crypto/key_escrow/white_paper.html (1996). Accessed 30 September 2009.

[5] Yung-Cheng Lee and Chi-Sung Laih, "On the Key Recovery of the Key Escrow System", *the 13th Annual Computer Security Applications Conference*. December 1997, pp. 216-220.

[6] S. Lim, S. Kang, and J. Sohn, "Modeling of Multiple Agent Based Cryptographic Key Recovery Protocol", *the 19th Annual Computer Security Applications Conference*, Las Vegas, December 2003, pp. 119-128.

[7] Shin-Young Lim, Ho-Sang Hani, Myoung-Jun Kim and Tai-Yun Kim, "Design of Key Recovery System Using Multiple Agent Technology for Electronic Commerce", *Proc. International Symposium On Industrial Electronics 2001*, pp. 1351-1356.

[8] D.E. Denning and D.K. Branstad, A Taxonomy for Key Recovery Encryption Systems. Internet Besieged: Countering Cyberspace Scofflaws, 1998.

[9] K. Kanyamee and C. Sathitwiriyawong, "A Simple High-Availability Multiple-Agent Key Recovery System", *the 4th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions*. London, 2010, pp. 734-739.

[10] R. Perlman, "An Overview of PKI Trust Models," *IEEE Network*. Vol. 13, Issue 6, pp. 38-43, November 1999.

[11] Paolo D'Arco, "On the Distribution of a Key Distribution Center", *the 7th Italian Conference on Theoretical Computer Science*. 2001, pp. 357-369.

[12] Neuman, B.C. and Ts'o, T, "Kerberos: an Authentication Service for Computer Networks", *Communications Magazine of the IEEE*, Vol. 32, pp. 32-38, September 1994.

[13] Bruce Schneier, Applied Cryptography, New York. NY, John Wiley & Sons, 1996.