



แบบฟอร์มเสนอ

เค้าโครง ดุษฎีนิพนธ์

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) เทคโนโลยีดิจิทัลมีเดีย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการกู้คืนสถานี่ฐานในเครือข่ายโทรคมนาคม

ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ) A Simulation-Based Approach for Modeling Disaster Impact and BTS Recovery in Telecommunication Networks

ผู้เสนอ

ชานนทร์ คงศรี

รหัสประจำตัว 168490432002

สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัลมีเดีย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(หมายเหตุ..กรณีนำเสนอในสอว.วัดคุณสมบัติ..(OE) ยังไม่ต้องระบุอาจารย์ที่ปรึกษา)

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายโทรคมนาคมเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่สนับสนุนการสื่อสารของประชาชน ภาคธุรกิจ และหน่วยงานภาครัฐ โดยเฉพาะในสถานการณ์ฉุกเฉินที่ความต่อเนื่องของการให้บริการเครือข่ายมีผลโดยตรงต่อการประสานงาน การแจ้งเตือนภัย และการบริหารจัดการวิกฤต แนวคิดด้านความยืดหยุ่นและความสามารถในการอยู่รอดของเครือข่ายสื่อสารจึงได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเครือข่ายต้องสามารถคงอยู่ ปรับตัว และฟื้นฟูการให้บริการได้ภายใต้สถานการณ์ที่มีความเสียหายหรือความไม่แน่นอนสูง [1], [2]

ภัยพิบัติ เช่น แผ่นดินไหว อุทกภัย หรือเหตุการณ์รุนแรงขนาดใหญ่ อาจส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายโทรคมนาคม ทั้งสถานีฐาน เส้นทางสื่อสาร และโครงสร้างพื้นฐานที่เชื่อมโยงกัน ความเสียหายขององค์ประกอบหนึ่งอาจไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะจุด แต่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบโดยรวม โดยเฉพาะในโครงสร้างพื้นฐานที่มีลักษณะพึ่งพาอาศัยกันระหว่างระบบต่าง ๆ [3], [4] งานวิจัยด้านโครงข่ายและโครงสร้างพื้นฐานยังชี้ให้เห็นว่าความเสียหายบางรูปแบบสามารถก่อให้เกิดความล้มเหลวแบบลูกโซ่ ซึ่งทำให้ความสามารถในการให้บริการของระบบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [4], [6]

ในบริบทของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ สถานีฐานโทรคมนาคมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อผู้ใช้บริการเข้ากับเครือข่ายหลัก หากสถานีฐานบางส่วนเสียหายหรือไม่สามารถให้บริการได้ ย่อมส่งผลกระทบต่อพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ความต่อเนื่องของบริการ และความสามารถในการสื่อสารของผู้ใช้บริการในช่วงเวลาวิกฤต งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไร้สายได้ให้ความสำคัญกับความเสี่ยง ความทนทาน และการจัดการทรัพยากรของระบบสื่อสารเพื่อให้สามารถรองรับสถานการณ์ที่มีข้อจำกัดได้ดีขึ้น [7], [10], [16]

การจำลองระบบเครือข่ายเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้นักวิจัยสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของเครือข่ายภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องทดสอบกับระบบจริง การจำลองสามารถใช้เพื่อศึกษาความน่าเชื่อถือของเครือข่าย ความสามารถในการฟื้นตัว ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของระบบ และผลกระทบจากความเสียหายของโครงสร้างพื้นฐาน [1]–[3] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากยังมุ่งเน้นการวิเคราะห์ตัวชี้วัดเชิงเทคนิคของเครือข่าย เช่น ความพร้อมใช้งาน ความเชื่อมต่อ และความสามารถในการฟื้นฟู มากกว่าการเชื่อมโยงผลลัพธ์ของการฟื้นฟูเครือข่ายเข้ากับผลกระทบที่ผู้ใช้บริการรับรู้ในช่วงสถานการณ์วิกฤต

แนวคิดด้านการฟื้นฟูเครือข่ายภายหลังเกิดภัยพิบัติได้มีการศึกษาในหลายลักษณะ เช่น การออกแบบเส้นทางสำรอง การปรับโครงสร้างเครือข่าย การใช้ทรัพยากรเสริม และการสนับสนุนการสื่อสารฉุกเฉินด้วยเทคโนโลยีเคลื่อนที่หรืออากาศยานไร้คนขับ [9], [11]–[16] อย่างไรก็ตาม แนวทางเหล่านี้มักมุ่งเน้นการฟื้นฟูเชิงโครงสร้าง

หรือเชิงวิศวกรรมเป็นหลัก ขณะที่การประเมินความสำเร็จของการฟื้นฟูในมุมมองของผู้ใช้บริการยังไม่ได้ถูกบูรณาการอย่างชัดเจนในกรอบการวิเคราะห์เดียวกัน

ในช่วงหลัง ปัญญาประดิษฐ์ได้เข้ามามีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจในระบบเครือข่าย โดยเฉพาะ Reinforcement Learning ซึ่งเหมาะกับปัญหาที่ต้องเลือกการกระทำเป็นลำดับภายใต้เงื่อนไขที่เปลี่ยนแปลงและมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร [17] แนวคิดดังกล่าวถูกนำไปใช้ในงานด้านการปรับตัวของระบบสื่อสาร และการจัดสรรทรัพยากรในบริบทของการฟื้นฟูเครือข่าย [18], [19] อย่างไรก็ตาม ยังขาดกรอบการศึกษาที่เชื่อมโยงการจำลองผลกระทบจากภัยพิบัติ การเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถาน และการประเมินผลกระทบต่อผู้ใช้บริการไว้ในระบบเดียวกันอย่างเป็นระบบ

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมข้างต้น พบช่องว่างของงานวิจัยที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ประการแรก งานวิจัยด้าน Network Resilience และ Network Simulation ส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับตัวชี้วัดทางเทคนิคของเครือข่าย เช่น ความพร้อมใช้งาน ความเชื่อมต่อ ระยะเวลาการฟื้นฟู และดัชนีความยืดหยุ่นของระบบ [1], [2], [20] ประการที่สอง งานวิจัยด้าน Disaster Recovery และ Emergency Communication Restoration มักเน้นการฟื้นฟูโครงสร้างพื้นฐานหรือการจัดสรรทรัพยากร แต่ยังไม่เชื่อมโยงผลการฟื้นฟูเข้ากับมุมมองของผู้ใช้บริการอย่างเพียงพอ [13]–[16] และประการที่สาม งานวิจัยด้าน AI-based Network Recovery ยังมุ่งเน้นประสิทธิภาพของการตัดสินใจหรือการจัดสรรทรัพยากรเป็นหลัก โดยยังไม่มีกรอบการประเมินที่ครอบคลุมทั้งผลกระทบจากภัยพิบัติ การฟื้นฟูสถานีสถาน ประสิทธิภาพของเครือข่าย และความพึงพอใจของผู้ใช้บริการในภาพรวม [17]–[19]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนากรอบแนวคิดเชิงการจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการฟื้นฟูสถานีสถานในโครงข่ายโทรคมนาคม โดยบูรณาการแนวคิดด้าน Disaster Impact Modeling, BTS Recovery Strategy, Network Resilience และ Artificial Intelligence เข้าด้วยกัน พร้อมเสนอกรอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ หรือ User Satisfaction Evaluation Framework: USEF เพื่อใช้เป็นเครื่องมือประเมินผลการฟื้นฟูเครือข่ายในมิติที่ครอบคลุมมากกว่าตัวชี้วัดทางเทคนิคเพียงอย่างเดียว

กรอบ USEF ที่เสนอในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 7 มิติ ได้แก่ Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience และ Sustainability โดยมีเป้าหมายเพื่อเชื่อมโยงผลลัพธ์จากการจำลองเครือข่ายและกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถานเข้ากับการรับรู้ของผู้ใช้บริการในสถานการณ์วิกฤต กรอบ

ดังกล่าวจะช่วยให้การประเมินความสำเร็จของการฟื้นฟูเครือข่ายไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะการกลับมาใช้งานได้ของระบบ แต่ครอบคลุมถึงคุณภาพ ประโยชน์ ความเชื่อมั่น และความยั่งยืนของบริการที่ผู้ใช้ได้รับหลังเกิดภัยพิบัติ

ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือ กรอบแนวคิดและระบบจำลองที่สามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติ การฟื้นฟูสถานีสถาน และผลต่อผู้ใช้บริการได้อย่างเป็นระบบ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบโครงข่ายโทรคมนาคมที่มีความยืดหยุ่น การวางแผนฟื้นฟูบริการในสถานการณ์ฉุกเฉิน และการพัฒนางานวิจัยด้านเครือข่ายโทรคมนาคมที่คำนึงถึงทั้งมิติทางวิศวกรรมและมิติของผู้ใช้บริการควบคู่กัน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาสังเคราะห์องค์ความรู้และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากภัยพิบัติ การฟื้นฟูสถานีสถาน โทรคมนาคม (Base Transceiver Station: BTS) ความยืดหยุ่นของเครือข่าย (Network Resilience) และความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ เพื่อนำไปสู่การพัฒนากรอบแนวคิดการวิจัย

2.2 เพื่อพัฒนารอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม (User Satisfaction Evaluation Framework: USEF) ซึ่งประกอบด้วยมิติด้าน Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience (QoE) และ Sustainability

2.3 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบจำลองเครือข่ายโทรคมนาคมสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและกระบวนการฟื้นฟูสถานีสถาน โดยสามารถจำลองสภาวะปกติ สภาวะวิกฤต และสถานการณ์การกู้คืนเครือข่ายภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากร

2.4 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ความเหมาะสมของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สำหรับสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถานภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติ

2.5 เพื่อประเมินความเหมาะสม ความสอดคล้อง และความเป็นไปได้ในการนำกรอบ USEF และระบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ ผ่านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเครือข่ายโทรคมนาคม เทคโนโลยีดิจิทัล และปัญญาประดิษฐ์

3. สมมติฐานของการวิจัย/คำถามการวิจัย

RQ1: ปัจจัยใดบ้างที่ควรนำมาพิจารณาในการประเมินผลกระทบจากภัยพิบัติและการฟื้นฟูสถานีสถานในโครงข่ายโทรคมนาคม เพื่อสะท้อนทั้งมุมมองด้านประสิทธิภาพเครือข่ายและมุมมองของผู้ใช้บริการ

RQ2: กรอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม (User Satisfaction Evaluation Framework: USEF) ควรประกอบด้วยองค์ประกอบและมิติใดบ้าง

RQ3: ระบบจำลองเครือข่ายโทรคมนาคมสามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและกระบวนการฟื้นฟูสถานี่ฐานได้อย่างไร

RQ4: เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์แขนงใดมีความเหมาะสมสำหรับสนับสนุนการตัดสินใจในการเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานี่ฐานภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติ

RQ5: กรอบ USEF และระบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม ความสอดคล้อง และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของโครงข่ายโทรคมนาคมหรือไม่

H1: กรอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม (USEF) มีความเหมาะสมและครอบคลุมปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลการฟื้นฟูเครือข่าย

H2: ระบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองผลกระทบจากภัยพิบัติและกระบวนการฟื้นฟูสถานี่ฐานในโครงข่ายโทรคมนาคมได้อย่างสมเหตุสมผลตามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

H3: กรอบ USEF สามารถใช้เชื่อมโยงผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพเครือข่ายกับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. ขอบเขตของงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาการพัฒนากรอบแนวคิดเชิงการจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการฟื้นฟูสถานี่ฐานในโครงข่ายโทรคมนาคม โดยเชื่อมโยงผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพเครือข่ายเข้ากับการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้กรอบ User Satisfaction Evaluation Framework: USEF ทั้งนี้ผู้วิจัยกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

4.1 ขอบเขตด้านประชากร

ประชากรของการวิจัย ได้แก่ ผู้ที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ หรือประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายโทรคมนาคม การบริหารจัดการเครือข่าย การวิเคราะห์ความทนทานของระบบสื่อสาร การฟื้นฟูระบบภายหลังเกิดเหตุขัดข้องหรือภัยพิบัติ เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ การจำลองระบบเครือข่าย และการประเมินประสบการณ์หรือความพึงพอใจของผู้ใช้บริการดิจิทัล

ประชากรดังกล่าวประกอบด้วยกลุ่มบุคคลสำคัญ ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านเครือข่ายโทรคมนาคม วิศวกรเครือข่าย ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ผู้เชี่ยวชาญด้านปัญญาประดิษฐ์ นักวิชาการด้านระบบสื่อสารหรือเทคโนโลยีดิจิทัล และผู้ที่มีประสบการณ์เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการบริการโทรคมนาคมหรือบริการดิจิทัลในสถานการณ์ปกติและสถานการณ์วิกฤต

4.2 ขอบเขตกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยใช้วิธีการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยคัดเลือกจากผู้ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย และสามารถให้ข้อคิดเห็นเชิงวิชาการหรือเชิงปฏิบัติต่อกรอบแนวคิด ระบบจำลอง และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการได้อย่างเหมาะสม

กลุ่มตัวอย่างแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- 4.2.1 ผู้เชี่ยวชาญด้านเครือข่ายโทรคมนาคมและระบบสื่อสาร จำนวน 3-5 คน ซึ่งมีประสบการณ์เกี่ยวกับการออกแบบ บริหารจัดการ วิเคราะห์ หรือแก้ไขปัญหาเครือข่ายโทรคมนาคม
- 4.2.2 ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ปัญญาประดิษฐ์ หรือการจำลองระบบ จำนวน 3-5 คน ซึ่งมีความรู้หรือประสบการณ์เกี่ยวกับการพัฒนาระบบจำลอง การใช้ AI เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ หรือการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงระบบ
- 4.2.3 ผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินประสบการณ์ผู้ใช้ ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ หรือเทคโนโลยีดิจิทัล มีเดีย จำนวน 3-5 คน ซึ่งสามารถประเมินความเหมาะสมของมิติในกรอบ USEF และความเชื่อมโยงระหว่างตัวชี้วัดด้านเครือข่ายกับมุมมองของผู้ใช้บริการได้

จำนวนผู้เชี่ยวชาญรวมประมาณ 9-15 คน โดยจำนวนดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการประเมินความสอดคล้อง ความเหมาะสม และความเป็นไปได้ของกรอบแนวคิดและระบบจำลองในขั้นตอนการวิจัยระดับเค้าโครงคุษณินิพนธ์

4.3 ขอบเขตเนื้อหา

ขอบเขตด้านเนื้อหาของงานวิจัยครอบคลุมประเด็นสำคัญ 5 ด้าน ดังนี้

- 4.3.1 ด้านผลกระทบจากภัยพิบัติต่อโครงข่ายโทรคมนาคม
ศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับภัยพิบัติที่ส่งผลต่อโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย เช่น ความเสียหายของสถานีสถาน ความเสียหายของเส้นทางสื่อสาร การลดลงของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ และผลกระทบต่อความต่อเนื่องของบริการ โดยมุ่งเน้นการจำลองสถานการณ์ภัยพิบัติในลักษณะเชิงโครงสร้างและเชิงแนวคิด ไม่ใช่การทดสอบกับโครงข่ายจริงของผู้ให้บริการรายใดรายหนึ่ง
- 4.3.2 ด้านการฟื้นฟูสถานีสถานโทรคมนาคม
ศึกษาแนวคิดและกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถานหลังเกิดความเสียหาย เช่น การจัดลำดับความสำคัญของสถานีสถาน การจัดสรรทรัพยากรการกู้คืน การใช้สถานีสถานเคลื่อนที่ และการเลือกแนวทางฟื้นฟูที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา ทรัพยากร และพื้นที่ให้บริการ
- 4.3.3 ด้านการจำลองเครือข่ายโทรคมนาคม
ศึกษาและออกแบบระบบจำลองที่สามารถจำลองโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย เช่น สถานีสถาน

โหนดเครือข่าย เส้นทางสื่อสาร ปริมาณการใช้งาน และสถานะของระบบในสภาวะปกติ สภาวะวิกฤต และสภาวะหลังการฟื้นฟู โดยใช้ข้อมูลสมมติ (Synthetic Data) และข้อมูลอ้างอิงเชิงวิชาการ ไม่ใช่ ข้อมูลลับหรือข้อมูลเชิงพาณิชย์ของผู้ให้บริการจริง

4.3.4 ด้านปัญญาประดิษฐ์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ

ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ได้แก่ Machine Learning, Deep Learning และ Reinforcement Learning เพื่อสนับสนุนการเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถาน โดยเน้นการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแต่ละแนวทางต่อบริบทของการฟื้นฟูเครือข่ายภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติ

4.3.5 ด้านการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ

พัฒนารอบการประเมิน User Satisfaction Evaluation Framework: USEF เพื่อเชื่อมโยงผลลัพธ์จากการจำลองเครือข่ายและการฟื้นฟูสถานีสถานเข้ากับมุมมองของผู้ใช้บริการ โดยกำหนดมิติการประเมิน 7 ด้าน ได้แก่ Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience และ Sustainability

4.4 ขอบเขตตัวแปร

การวิจัยครั้งนี้กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ดังนี้

4.4.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ กรอบแนวคิดและระบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการฟื้นฟูสถานีสถานในโครงข่ายโทรคมนาคม ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังนี้

- ประเภทและระดับความรุนแรงของภัยพิบัติ
- โครงสร้างของโครงข่ายโทรคมนาคมและตำแหน่งของสถานีสถาน
- จำนวนหรือสัดส่วนของสถานีสถานที่ได้รับผลกระทบ
- ปริมาณการใช้งานเครือข่ายหรือความหนาแน่นของผู้ใช้บริการ
- ทรัพยากรที่ใช้ในการฟื้นฟู เช่น ทีมซ่อมบำรุง อุปกรณ์สำรอง หรือสถานีสถานเคลื่อนที่
- กลยุทธ์หรือแนวทางการฟื้นฟูสถานีสถาน
- เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้สนับสนุนการเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟู

4.4.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ผลลัพธ์ที่เกิดจากการจำลองและการประเมินกรอบ USEF ประกอบด้วย

- ระยะเวลาในการฟื้นฟูเครือข่าย
- อัตราการกลับคืนของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ

- ความพร้อมใช้งานของบริการเครือข่าย
- ความต่อเนื่องของการให้บริการ
- ประสิทธิภาพของกลยุทธ์การฟื้นฟูสถานีสถาน
- คะแนนหรือระดับความเหมาะสมของกรอบ USEF จากผู้เชี่ยวชาญ
- ระดับการสะท้อนความพึงพอใจของผู้ใช้บริการตามมิติ Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience และ Sustainability

4.4.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ เงื่อนไขพื้นฐานที่กำหนดให้คงที่หรือควบคุมในระหว่างการจำลอง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละสถานการณ์ได้อย่างเหมาะสม เช่น รูปแบบโครงข่ายพื้นฐาน จำนวนสถานีสถานเริ่มต้น ขนาดพื้นที่จำลอง ช่วงเวลาการจำลอง ลักษณะทราฟฟิกเริ่มต้น และเกณฑ์การประเมินผลของระบบ

4.5 ขอบเขตระยะเวลา

ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัยคาดว่าจะใช้เวลาประมาณ 18 เดือน โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 4 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 การศึกษาเอกสารและสังเคราะห์กรอบแนวคิด

ดำเนินการศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Network Resilience, Disaster Impact Modeling, BTS Recovery, Artificial Intelligence, Network Simulation และ User Satisfaction Evaluation เพื่อกำหนดกรอบแนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย

ระยะที่ 2 การพัฒนา USEF และออกแบบระบบจำลอง

ดำเนินการพัฒนารอบ User Satisfaction Evaluation Framework: USEF และออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบจำลองเครือข่ายโทรคมนาคมที่รองรับการวิเคราะห์สภาวะปกติ สภาวะวิกฤต และกระบวนการฟื้นฟูสถานีสถาน

ระยะที่ 3 การพัฒนาต้นแบบและการจำลองสถานการณ์

ดำเนินการพัฒนาต้นแบบระบบจำลอง กำหนดข้อมูลนำเข้า สร้างสถานการณ์ภัยพิบัติ จำลองผลกระทบต่อสถานีสถาน และวิเคราะห์แนวทางการฟื้นฟูเครือข่ายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ระยะที่ 4 การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญและปรับปรุงกรอบแนวคิด

ดำเนินการประเมินความเหมาะสม ความสอดคล้อง และความเป็นไปได้ของกรอบ USEF และระบบจำลองโดยผู้เชี่ยวชาญ วิเคราะห์ผลการประเมิน และปรับปรุงกรอบแนวคิดให้มีความสมบูรณ์ก่อนนำไปใช้ในการวิจัยขั้นต่อไป

5. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา (Development Research) โดยมุ่งพัฒนารอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม (User Satisfaction Evaluation Framework: USEF) ร่วมกับการพัฒนาระบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการฟื้นฟูสถานีสถานในโครงข่ายโทรคมนาคม โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

5.1 ระยะที่ 1 การศึกษาเอกสารและสังเคราะห์องค์ความรู้

ผู้วิจัยดำเนินการศึกษาทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลวิชาการที่ได้รับการยอมรับ เช่น IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus และ Google Scholar โดยครอบคลุมประเด็นสำคัญ ได้แก่

- Disaster Impact Modeling
- Telecommunication Network Resilience
- BTS Failure and Recovery
- Network Simulation
- Artificial Intelligence for Network Recovery
- Quality of Experience (QoE)
- User Satisfaction Evaluation

จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์ สังเคราะห์ และจัดหมวดหมู่องค์ความรู้เพื่อระบุปัจจัยสำคัญ ตัวแปร และช่องว่างทางการวิจัย (Research Gap) สำหรับใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนารอบแนวคิดการวิจัย

คาดการณ์ผลลัพธ์ที่ได้

- องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้อง
- ปัจจัยและตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย
- Research Gap
- Conceptual Framework เบื้องต้น

5.2 ระยะที่ 2 การพัฒนารอบการประเมิน USEF

ผู้วิจัยนำผลการสังเคราะห์องค์ความรู้จากระยะที่ 1 มาพัฒนารอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม หรือ User Satisfaction Evaluation Framework (USEF)

กรอบ USEF ประกอบด้วย 7 มิติ ได้แก่

1. Reliability
2. Latency
3. Usefulness
4. Trust
5. Contextual Resilience
6. Quality of Experience (QoE)
7. Sustainability

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยจะกำหนดนิยามเชิงปฏิบัติการ (Operational Definition) ของแต่ละมิติ พร้อมกำหนดตัวชี้วัดที่สามารถใช้ประเมินผลกระทบต่องานบริการภายหลังการฟื้นฟูเครือข่าย

คาดการณ์ผลลัพธ์ที่ได้

- USEF Framework
- นิยามเชิงปฏิบัติการ
- ตัวชี้วัดในแต่ละมิติ

5.3 ระยะที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบจำลอง

ผู้วิจัยดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองเครือข่ายโทรคมนาคมเพื่อใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและกระบวนการฟื้นฟูสถานการณ์

ระบบจำลองประกอบด้วยโมดูลหลัก ดังนี้

1. Network Topology Module
2. Disaster Impact Module
3. BTS Failure Module
4. Recovery Strategy Module
5. AI Decision Support Module
6. Performance Evaluation Module

7. USEF Evaluation Module

ระบบจำลองสามารถจำลองสถานการณ์ปกติ สถานการณ์ภัยพิบัติ และสถานการณ์ภายหลังการฟื้นฟู
เครือข่าย เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครือข่ายและผลกระทบต่อผู้ให้บริการ

คาดการณ์ผลลัพธ์ที่ได้

- High-Level Architecture
- Simulation Framework

5.4 ระยะที่ 4 การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยดำเนินการประเมินความเหมาะสมของ USEF Framework และระบบจำลองโดยผู้เชี่ยวชาญ
ใช้วิธีการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากผู้เชี่ยวชาญด้าน

1. เครือข่ายโทรคมนาคม
2. ปัญญาประดิษฐ์
3. เทคโนโลยีดิจิทัล
4. ประสบการณ์ผู้ใช้และการประเมินระบบ

เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย

- แบบประเมิน IOC
- แบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ
- แบบบันทึกข้อเสนอแนะเชิงคุณภาพ

การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย

- ค่าเฉลี่ย (Mean)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
- ดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence: IOC)

คาดการณ์ผลลัพธ์ที่ได้

- ระดับความเหมาะสมของระบบจำลอง
- ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ

5.5 ระยะที่ 5 การปรับปรุงและสรุปกรอบการวิจัย

ผู้วิจัยนำผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุง USEF Framework และระบบจำลองให้มีความ
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จากนั้นจัดทำกรอบแนวคิดฉบับสมบูรณ์ พร้อมสรุปองค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากการวิจัย

ผลลัพธ์สุดท้ายของงานวิจัยประกอบด้วย

1. User Satisfaction Evaluation Framework (USEF)
2. Simulation-Based Framework for Disaster Impact and BTS Recovery
3. แนวทางการประเมินผลกระทบของภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายในมุมมองของผู้ใช้บริการ
4. ข้อเสนอเชิงวิชาการสำหรับการพัฒนาโครงข่ายโทรคมนาคมที่มีความยืดหยุ่นต่อภัยพิบัติใน

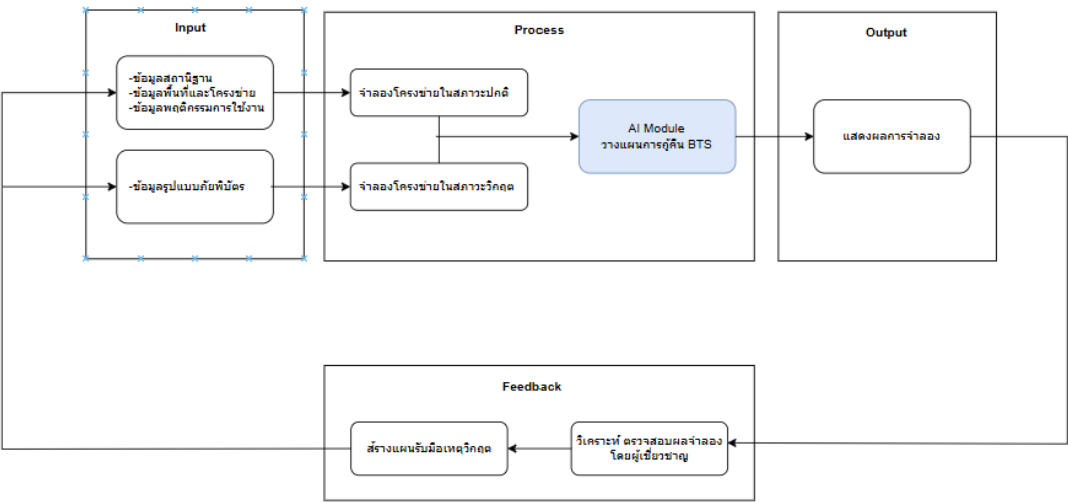
อนาคต

6. กรอบแนวคิดการวิจัย

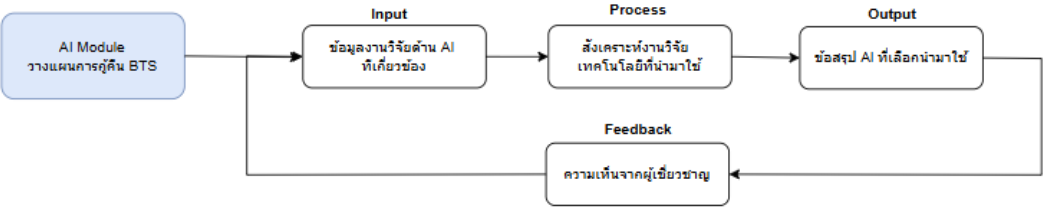
กรอบแนวคิดการวิจัยสามารถอธิบายได้เป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ปัจจัยนำเข้า กระบวนการจำลองและฟื้นฟู กรอบการประเมิน USEF และผลลัพธ์ของการวิจัย ดังนี้

- ปัจจัยนำเข้า ประกอบด้วย ประเภทและระดับความรุนแรงของภัยพิบัติ โครงสร้างของโครงข่ายโทรคมนาคม จำนวนและตำแหน่งของสถานีฐาน ปริมาณการใช้งานเครือข่าย ทรัพยากรที่ใช้ในการฟื้นฟู และเงื่อนไขของสถานการณ์จำลอง
- กระบวนการจำลองและฟื้นฟู ประกอบด้วย การจำลองสถานการณ์ภัยพิบัติ การวิเคราะห์ความเสียหายของสถานีฐาน การเลือกกลยุทธ์การฟื้นฟู การใช้ AI สนับสนุนการตัดสินใจ และการประเมินผลด้านประสิทธิภาพของเครือข่าย
- กรอบการประเมิน USEF ประกอบด้วย 7 มิติ ได้แก่ Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience และ Sustainability เพื่อประเมินผลกระทบของการฟื้นฟูเครือข่ายต่อผู้ใช้บริการ
- ผลลัพธ์ของการวิจัย ประกอบด้วย ระยะเวลาการฟื้นฟู ความพร้อมใช้งานของบริการ อัตราการกลับคืนของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ระดับความยืดหยุ่นของเครือข่าย และระดับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการตามกรอบ USEF

โปรแกรมจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการกู้คืนสถานีสถานในเครือข่ายโทรคมนาคม



ภาพที่ 1 โครงสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและการกู้คืนสถานีสถานในเครือข่ายโทรคมนาคม



ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย การศึกษาเทคโนโลยี AI และการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

7. นิยามศัพท์

7.1 โครงข่ายโทรคมนาคม (Telecommunication Network)

หมายถึง ระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านการสื่อสารที่ประกอบด้วยสถานีฐาน อุปกรณ์เครือข่าย และระบบส่งผ่านข้อมูล ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงผู้ใช้บริการเข้ากับบริการสื่อสารและบริการดิจิทัลต่าง ๆ

7.2 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Base Transceiver Station: BTS)

หมายถึง อุปกรณ์หรือสถานที่ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์สื่อสารของผู้ใช้บริการกับโครงข่ายโทรคมนาคม โดยเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารเคลื่อนที่

7.3 ภัยพิบัติ (Disaster)

หมายถึง เหตุการณ์ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายโทรคมนาคม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการให้บริการของเครือข่ายลดลงหรือหยุดชะงัก เช่น แผ่นดินไหว อุทกภัย หรือเหตุการณ์ฉุกเฉินขนาดใหญ่

7.4 ผลกระทบจากภัยพิบัติ (Disaster Impact)

หมายถึง ระดับความเสียหายหรือผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสถานีฐาน อุปกรณ์เครือข่าย พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ หรือความสามารถในการให้บริการของโครงข่ายโทรคมนาคมภายหลังเกิดภัยพิบัติ

7.5 การฟื้นฟูสถานีฐาน (BTS Recovery)

หมายถึง กระบวนการหรือกลยุทธ์ในการกู้คืนความสามารถในการให้บริการของสถานีฐานและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เครือข่ายสามารถกลับมาให้บริการได้ตามระดับที่กำหนด

7.6 ความยืดหยุ่นของเครือข่าย (Network Resilience)

หมายถึง ความสามารถของโครงข่ายโทรคมนาคมในการป้องกัน รับมือ ปรับตัว และฟื้นตัวจากเหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งาน โดยยังคงรักษาระดับการให้บริการที่ยอมรับได้

7.7 ระบบจำลองเครือข่าย (Network Simulation)

หมายถึง ระบบหรือแบบจำลองที่ใช้จำลองโครงสร้าง พฤติกรรม และสถานการณ์ต่าง ๆ ของโครงข่ายโทรคมนาคม เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและประเมินผลของกลยุทธ์การฟื้นฟู

7.8 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI)

หมายถึง เทคโนโลยีที่ทำให้ระบบคอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้ วิเคราะห์ และสนับสนุนการตัดสินใจจากข้อมูลหรือสถานการณ์ที่กำหนดได้โดยอัตโนมัติ

7.9 กลยุทธ์การฟื้นฟู (Recovery Strategy)

หมายถึง แนวทางหรือวิธีการที่ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญและดำเนินการกู้คืนสถานีฐานหรือองค์ประกอบของเครือข่ายภายหลังเกิดภัยพิบัติ

7.10 User Satisfaction Evaluation Framework (USEF)

หมายถึง กรอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่าย
โทรคมนาคม ซึ่งผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เชื่อมโยงผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพของเครือข่ายเข้ากับมุมมองของ
ผู้ให้บริการ

7.11 ความน่าเชื่อถือ (Reliability)

หมายถึง ระดับความสามารถของเครือข่ายในการให้บริการได้อย่างต่อเนื่อง ถูกต้อง และสม่ำเสมอภายใต้
สถานการณ์ปกติและภายหลังการฟื้นฟู

7.12 ความหน่วง (Latency)

หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ซึ่งส่งผลต่อความรวดเร็วในการเข้าถึงบริการของ
ผู้ให้บริการ

7.13 ประโยชน์ใช้สอย (Usefulness)

หมายถึง ระดับการรับรู้ของผู้ใช้บริการว่าระบบหรือเครือข่ายที่ได้รับการฟื้นฟูสามารถตอบสนองต่อความ
ต้องการในการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

7.14 ความเชื่อมั่น (Trust)

หมายถึง ระดับความเชื่อมั่นของผู้ใช้บริการต่อความสามารถของเครือข่ายในการให้บริการได้อย่างมั่นคง
ปลอดภัย และเชื่อถือได้ภายหลังการฟื้นฟู

7.15 ความยืดหยุ่นเชิงบริบท (Contextual Resilience)

หมายถึง ความสามารถของเครือข่ายในการตอบสนองและปรับตัวให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ข้อจำกัด
และความต้องการที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละสถานการณ์ภัยพิบัติ

7.16 คุณภาพประสบการณ์ของผู้ใช้ (Quality of Experience: QoE)

หมายถึง การรับรู้และประเมินคุณภาพการให้บริการของผู้ใช้บริการที่เกิดขึ้นจากประสบการณ์ใช้งานจริง
ภายหลังการฟื้นฟูเครือข่าย

7.17 ความยั่งยืน (Sustainability)

หมายถึง ความสามารถของแนวทางการฟื้นฟูเครือข่ายในการรักษาระดับการให้บริการและการใช้
ทรัพยากรอย่างเหมาะสมในระยะยาว

7.18 ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ (User Satisfaction)

หมายถึง ระดับการประเมินของผู้ใช้บริการที่มีต่อผลลัพธ์ของการฟื้นฟูเครือข่าย โดยพิจารณาจากการรับรู้
ด้าน Reliability, Latency, Usefulness, Trust, Contextual Resilience, Quality of Experience และ
Sustainability ภายใต้กรอบ USEF

8. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การวิจัยเรื่อง A Simulation-Based Approach for Modeling Disaster Impact and BTS Recovery in Telecommunication Networks คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงวิชาการ เชิงปฏิบัติ และเชิงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานโทรคมนาคม ดังต่อไปนี้

8.1 ประโยชน์เชิงวิชาการ

- ได้กรอบการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์ภัยพิบัติและการฟื้นฟูเครือข่ายโทรคมนาคม (User Satisfaction Evaluation Framework: USEF) ซึ่งเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่เชื่อมโยงการประเมินผลด้านประสิทธิภาพของเครือข่ายเข้ากับมุมมองของผู้ใช้บริการ
- ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบจากภัยพิบัติ กระบวนการฟื้นฟูสถานียานประสิทธิภาพของเครือข่าย และความพึงพอใจของผู้ใช้บริการภายใต้สถานการณ์วิกฤต
- ได้กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงองค์ความรู้ด้าน Disaster Impact Modeling, Network Resilience, BTS Recovery, Artificial Intelligence และ User Satisfaction Evaluation ไว้ในระบบเดียวกัน
- ได้แนวทางการประยุกต์ใช้การจำลองเครือข่ายและปัญญาประดิษฐ์เพื่อศึกษาผลกระทบและการฟื้นฟูโครงข่ายโทรคมนาคม ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในการวิจัยด้านโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลและระบบสื่อสารในอนาคต

8.2 ประโยชน์เชิงปฏิบัติ

- ได้ระบบจำลองที่สามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบจากภัยพิบัติและประเมินทางเลือกในการฟื้นฟูสถานียานภายใต้สถานการณ์จำลองต่าง ๆ ได้โดยไม่กระทบต่อโครงข่ายจริง
- ผู้ให้บริการโทรคมนาคมสามารถใช้ผลการวิจัยเป็นข้อมูลประกอบการวางแผนการฟื้นฟูเครือข่ายการจัดลำดับความสำคัญของสถานียาน และการจัดสรรทรัพยากรในสถานการณ์ฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- สามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินผลลัพธ์ของการฟื้นฟูเครือข่ายได้ทั้งในมิติด้านวิศวกรรมเครือข่ายและมิติด้านผู้ใช้บริการ ทำให้การประเมินผลมีความครอบคลุมมากกว่าการพิจารณาตัวชี้วัดทางเทคนิคเพียงอย่างเดียว
- สามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System) สำหรับการบริหารจัดการเครือข่ายโทรคมนาคมในสถานการณ์วิกฤตหรือภัยพิบัติ

8.3 ประโยชน์เชิงนโยบายและการพัฒนาในอนาคต

- หน่วยงานภาครัฐ ผู้กำกับดูแล และผู้ให้บริการโทรคมนาคมสามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการกำหนดแนวทางด้านความพร้อมรับมือภัยพิบัติและการเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงสร้างพื้นฐานด้านการสื่อสารของประเทศ
- ผลการวิจัยสามารถสนับสนุนการพัฒนาแนวคิดด้าน Resilient Telecommunication Network ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเมืองอัจฉริยะ (Smart City) และโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลในอนาคต
- กรอบ USEF และระบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาผลกระทบและการฟื้นฟูโครงสร้างพื้นฐานประเภทอื่น เช่น โครงข่ายพลังงาน ระบบขนส่งอัจฉริยะ หรือโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลที่มีลักษณะพึ่งพาอาศัยกัน
- ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยต่อยอดด้าน Digital Twin, Multi-Agent Systems, Autonomous Network Management และ AI-Driven Network Recovery ในอนาคต

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. P. G. Sterbenz, D. Hutchison, E. K. Çetinkaya, A. Jabbar, J. P. Rohrer, M. Schöller, and P. Smith, “Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 8, pp. 1245–1265, 2010.
- [2] P. Cholda, J. Tapolcai, T. Cinkler, K. Wajda, and A. Jajszczyk, “Quality of resilience as a network reliability characterization tool,” *IEEE Network*, vol. 23, no. 2, pp. 11–19, 2009.
- [3] M. Ouyang, “Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 121, pp. 43–60, 2014.
- [4] S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley, and S. Havlin, “Catastrophic cascade of failures in interdependent networks,” *Nature*, vol. 464, no. 7291, pp. 1025–1028, 2010.
- [5] S. Iyer, T. Killingback, B. Sundaram, and Z. Wang, “Attack robustness and centrality of complex networks,” *PLOS ONE*, vol. 8, no. 4, Article e59613, 2013.
- [6] J. Johansson and H. Hassel, “An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 95, no. 12, pp. 1335–1344, 2010.
- [7] C. Cavdar and F. Alagoz, “Risk-based planning and deployment of heterogeneous wireless networks,” *Computer Networks*, vol. 72, pp. 215–229, 2014.

- [8] L. Di Puglia Pugliese, C. Castellano, and R. Pastor-Satorras, "Traffic-driven epidemic spreading in finite-size scale-free networks," *Physical Review E*, vol. 93, no. 6, Article 062316, 2016.
- [9] D. Medhi and K. Ramasamy, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, 2nd ed. Morgan Kaufmann, 2017.
- [10] D. L. Alderson, G. G. Brown, W. M. Carlyle, and R. K. Wood, "Assessing and improving operational resilience of critical infrastructures and other systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 208, no. 1, pp. 1–11, 2011.
- [11] T. Gomes, J. Tapolcai, C. Esposito, D. Hutchison, F. Kuipers, J. Rak, A. de Sousa, A. Iossifides, R. Travanca, and J. André, "A survey of strategies for communication networks to protect against large-scale natural disasters," in *Proc. 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, 2016, pp. 11–22.
- [12] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [13] S. Waharte and N. Trigoni, "Supporting search and rescue operations with UAVs," in *Proc. International Conference on Emerging Security Technologies*, 2010, pp. 142–147.
- [14] M. Erdelj and E. Natalizio, "UAV-assisted disaster management: Applications and open issues," in *Proc. IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2016, pp. 1–5.
- [15] K. Gomez, L. Goratti, T. Rasheed, and L. Reynaud, "Enabling disaster-resilient 4G mobile communication networks," *arXiv preprint arXiv:1406.0928*, 2014.
- [16] S. Tabbane, "Disaster recovery planning in mobile communication networks," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 9, pp. 30–41, 2015.
- [17] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2018.
- [18] H. Mao, R. Netravali, and M. Alizadeh, "Neural adaptive video streaming with reinforcement learning," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 47, no. 4, pp. 197–210, 2017.
- [19] N. C. Luong, D. T. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y.-C. Liang, and D. I. Kim, "Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3133–3174, 2019.

[20] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace, and D. von Winterfeldt, "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities," *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 4, pp. 733–752, 2003.