



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอน

โดย ดร. เจริญชัย ไชมพัตราภรณ์ และคณะ

30 พฤษภาคม 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอน

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดร. เจริญชัย ไชยมพัตรภรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. นายวิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

และบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด
(มหาชน) ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจและอุตสาหกรรมมีการแข่งขันที่สูง ด้วยสภาพการเปลี่ยนแปลงของตลาดที่มีการปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็วตามภาวะเศรษฐกิจ ไม่ว่าจะเป็นการแข่งขันในเรื่องคุณภาพ ราคา ผลิตภัณฑ์ กำหนดการส่งมอบ และการบริการ นอกจากการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าแล้ว องค์กรต้องปรับตัวและมุ่งสู่เป้าหมายสูงสุด นั่นคือ การสร้างกำไรที่ยั่งยืน กลยุทธ์ในการสร้างผลกำไรมี 2 กลยุทธ์ได้แก่ การสร้างรายได้และการลดต้นทุน การสร้างรายได้เกิดจากการสร้างผลิตภัณฑ์หรือบริการใหม่ เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้มากขึ้น ส่วนการลดต้นทุนเกิดจากการลดต้นทุนของสินค้าหรือการลดกิจกรรมสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในองค์กร

ในธุรกิจประเภทเดียวกัน องค์กรต่างๆ มักใช้เทคโนโลยีในการผลิตสินค้าที่คล้ายกัน ดังนั้นต้นทุนการผลิตขององค์กรในธุรกิจประเภทเดียวกันมักไม่มีความแตกต่างกันมาก หลายองค์กรหันมาสนใจทำการลดต้นทุนในด้านการจัดส่งสินค้าซึ่งถือว่าเป็นต้นทุนที่สำคัญอีกตัวหนึ่งนอกเหนือจากการลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว ต้นทุนในการจัดส่งสินค้านั้นเป็นต้นทุนในเชิงการจัดการโดยแต่ละองค์กรอาจมีนโยบายที่แตกต่างกันไป บางองค์กรมีหน่วยงานขนส่งสินค้าเป็นของตนเอง แต่บางองค์กรทำการจ้างบริษัทขนส่งภายนอกให้ทำการขนส่งสินค้าให้ ส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งสินค้ามีความแตกต่างกันด้วย

เมื่อพิจารณาถึงระบบในการขนส่งสินค้าซึ่งรวมถึงตั้งแต่ โรงงาน โกดัง ศูนย์กระจายสินค้า จนถึงลูกค้า ตลอดจนเส้นทางต่างๆ ในการขนส่งสินค้า พบว่าระบบดังกล่าวมีลักษณะเชื่อมโยงกันเป็นระบบโครงข่าย (Network) เมื่อทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับระบบโครงข่ายแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเรื่องของการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่จะทำให้เกิดค่าใช้จ่าย หรือระยะทาง หรือเวลา ในการขนส่งสินค้าโดยรวมต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไข (Constraints) ต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เหมาะสมกับระบบโครงข่ายนั้นๆ เพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุด (ในเชิงต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด) ในการจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้

ในการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ระบบโครงข่ายให้มีลักษณะเป็น “Deterministic Model” ซึ่งหมายความว่าเส้นทางต่างๆ ในระบบโครงข่ายที่ทำการศึกษาจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงนั้นระบบโครงข่ายมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อยู่เสมอ เช่น เส้นทางบางเส้นทางไม่สามารถใช้การได้ชั่วคราวอันเนื่องจากปัจจัยบางอย่าง ซึ่งจะส่งผลให้เส้นทางที่เคยทำการเลือกไว้ไม่สามารถใช้ขนส่งสินค้าได้ หรืออาจส่งผลให้ทั้งระบบโครงข่ายนี้ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้เลย เนื่องจากไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้ ดังนั้นเมื่อระบบโครงข่ายเกิดความไม่แน่นอนขึ้น การค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด เพื่อนำมาใช้กำหนดต้นทุนโดยอาศัย Deterministic Model ในการขนส่งจึงไม่สามารถทำได้

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่าเมื่อระบบโครงข่ายมีความไม่แน่นอน จะใช้การประเมินค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเพื่อชี้วัดว่าระบบโครงข่ายมีประสิทธิผลเป็นอย่างไร ถ้าระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำแสดงว่ามีโอกาสที่ระบบจะไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการปรับปรุงระบบโครงข่ายให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น โดยในการปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนจะใช้วิธีใดในการปรับปรุงโครงข่ายนั้นอาจขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในปัจจุบันและผลจากการปรับปรุงโครงข่ายด้วยวิธีนั้นๆ

แต่การพิจารณาจากค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวอาจไม่ได้วิธีที่ดีที่สุดเสมอไป เนื่องจากวิธีที่ได้นี้น่าจะมีต้นทุนที่สูงกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นในการประเมินระบบโครงข่ายควรมีการนำเอาต้นทุนในการขนส่งมาร่วมพิจารณาด้วย เพื่อให้สามารถเลือกวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายที่ดีที่สุดและมีต้นทุนที่เหมาะสม

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการนำต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายมาร่วมพิจารณากับความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย เพื่อคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) ของระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอนนี้ โดยในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยของการใช้ระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนี้จะต้องรวมเอาต้นทุนซึ่งเกิดจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ตามที่ต้องการเข้าไปด้วย

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาวิธีการในการประเมินต้นทุนของการขนส่ง ในระบบ One Source-One Sink ที่มีความไม่แน่นอน
2. เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ทางเชิงทฤษฎีในด้านการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบที่มีความไม่แน่นอน
3. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีกับตัวอย่างของสถานการณ์จริง

1.1 ขอบเขตและข้อกำหนดในการทำวิจัย

1. ระบบโครงข่ายที่พิจารณาเป็นระบบ One Source-One Sink
2. ทางเชื่อม (Edges) ในระบบโครงข่ายมี 2 สถานะ คือ สามารถใช้งานได้ (Working) และ ไม่สามารถใช้งานได้ (Failure) โดยเมื่อทางเชื่อมใดสามารถใช้งานได้จะถือว่าทางเชื่อมนั้นมี ความจุ (Capacity) ไม่จำกัด
3. จุดโนด (Nodes) ในระบบโครงข่ายจะถือว่าสามารถใช้งานได้ตลอดเวลา (Perfect Node) และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของความจุของจุดโนด
4. ในการขนส่งผ่านระบบโครงข่ายจะไม่มีการหยุดพักที่จุดโนด หรือคิดถึงผลเรื่องเวลาที่เกิดขึ้น

1.1 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวิธีการประเมินความน่าเชื่อถือของการขนส่งในระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน
2. ทราบวิธีการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของการขนส่งในระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน
3. เป็นแนวทางในการประยุกต์วิธีการประเมินต้นทุนเฉลี่ยกับระบบการขนส่ง

2. การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

ในระบบโครงข่ายหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยระบบย่อยๆ ซึ่งระบบย่อยเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 1) จุดโนด (Nodes) คือระบบย่อยที่ใช้แสดงจุดเริ่มต้น จุดรวม หรือจุดสิ้นสุดในระบบโครงข่าย และ 2) ทางเชื่อม (Edges) คือระบบย่อยที่ใช้แสดงการเชื่อมต่อของจุดโนดต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงทิศทางเดียวหรือ 2 ทิศทางก็ได้

สำหรับระบบโครงข่ายการขนส่ง จุดโนดจะใช้แสดงจุดเริ่มต้น จุดหมายปลายทาง จุดพักหรือจุดเปลี่ยนถ่ายของสินค้าระหว่างทาง (Transshipment Nodes) ส่วนเส้นทางเชื่อมต่อไปจะหมายถึงเส้นทางที่ใช้ในการขนส่ง โดยอาจแบ่งตามรูปแบบในการขนส่ง (Modes) หรือผู้ให้บริการการขนส่งสินค้า (Transportation Service Provider) ที่แตกต่างกันก็ได้

จากการสำรวจงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้พบว่า วิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายจะแบ่งเป็น 3 วิธีคือ วิธีการคำนวณโดยตรง (Analytical Calculation) วิธีการประมาณค่าโดยใช้ค่าขอบเขต (Boundary) และการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการแบบการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์ โดยทั้ง 2 วิธีมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การประเมินโดยการคำนวณโดยตรง

วิธีนี้เป็นวิธีการประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโครงข่ายโดยการคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์โดยตรงซึ่งถือเป็นวิธีที่ให้ผลถูกต้องแม่นยำ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณความน่าเชื่อถือของโครงข่ายมีหลายวิธีเช่น วิธีมินิมัลคัท วิธีมินิมัลพาธ และวิธีการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ของข้อผิดพลาด (Fault Tree Analysis) ฯลฯ ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีมินิมัลพาธ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

ในการใช้วิธีมินิมัลพาธเพื่อทำการประเมินความน่าเชื่อถือเริ่มจากการค้นหามินิมัลพาธในระบบโครงข่ายก่อนซึ่งมีนิยามดังนี้

- พาธ (Path) คือ กลุ่มหรือเซตของทางเชื่อม (Edge) ใดๆ ในระบบโครงข่าย ซึ่งสามารถใช้เชื่อมโยงโครงข่ายจาก จุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายทางที่กำหนดได้
- มินิมัลพาธ (Minimal Path : MP) คือ พาธที่มีจำนวนสมาชิกน้อยที่สุด โดยที่หากมีทางเชื่อมใดทางเชื่อมหนึ่งในพาธนี้ไม่สามารถใช้งานได้แล้ว จะทำให้ไม่เป็นพาธอีกต่อไป ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถเชื่อมจุดเริ่มต้นและจุดปลายทางได้

ดังนั้นหากกำหนดให้ X_i แทนมินิมัลพาธเวกเตอร์ที่ i ของระบบโครงข่ายและ n เป็นจำนวนมินิมัลพาธทั้งหมดที่มีในระบบโครงข่าย จะสามารถเขียนแสดงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่จะสามารถเชื่อมโยงจุด S ไปยัง T ได้เป็น

$$R = \Pr(X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i \cup \dots \cup X_n) \quad (1)$$

โดยที่ R = ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

Pr = ความน่าจะเป็น

และเมื่อใช้การแตกพจน์ในรูปของ Sum of Disjoint Products คือการแตกพจน์ของเซตให้อยู่ในเทอมที่ไม่มีการซ้อนทับกัน จะได้เป็น ดังสมการที่ (2)

$$R = Pr(X_1) + Pr(X_1') \cap Pr(X_2) + Pr(X_1') \cap Pr(X_2') \cap Pr(X_3) + Pr(X_1') \cap Pr(X_2') \cap Pr(X_3') \cap Pr(X_4) . \quad (2)$$

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระบบโครงข่ายมีจำนวนมากขึ้นจำนวนพจน์ที่ได้จะมีมากขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากตามด้วย จึงมีผู้เสนอวิธีในการประมาณค่าความน่าจะเป็นของระบบโครงข่ายโดยการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ซึ่งจะช่วยลดเวลาและความยุ่งยากเมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น

2.2 การประเมินโดยการจำลองเหตุการณ์

การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ในการสุ่มสถานะของทางเชื่อมผ่านการสุ่มตัวเลขหนึ่งตัวในช่วง $[0,1]$ โดยอาศัยการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) แล้วนำตัวเลขที่ได้ไปเทียบกับความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมนั้นจะสามารถทำงานได้ ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ p แสดงว่าทางเชื่อมสามารถทำงานได้ แต่ในทางกลับกันถ้าค่าที่สุ่มได้มากกว่าค่า p แสดงว่าทางเชื่อมนั้นไม่สามารถทำงานได้

หลังจากนั้น ทำการประเมินระบบโดยรวมโดยพิจารณาจากผลของสถานะของทางเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการสุ่มทั้งหมด เพื่อตัดสินใจว่าระบบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขหรือไม่ หากระบบโครงข่ายสามารถเชื่อม S ไปยัง T ได้จะให้ค่าของเหตุการณ์เป็น 1 และ หากไม่สามารถเชื่อมโยงได้เป็น 0 ทำการบันทึกค่าเก็บไว้ ทำซ้ำหลายๆ ครั้งและบันทึกจำนวนเหตุการณ์ที่ระบบสามารถทำงานได้เปรียบเทียบกับจำนวนเหตุการณ์ทั้งหมดที่ทำการสุ่มเพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบ และเนื่องจากวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลไม่มีการกำหนดแน่ชัดว่าจำนวนการสุ่มเหตุการณ์ทั้งหมดควรเป็นเท่าไร แต่มีการถือปฏิบัติโดยทั่วไปว่าจำนวนของเหตุการณ์ที่สุ่มต้องเพียงพอที่จะสังเกตว่าผลที่ได้ใกล้เคียงค่าใดค่าหนึ่ง ดังนั้นในการจำลองเหตุการณ์ในงานวิจัยนี้จะทำการสุ่มซ้ำจนกระทั่งค่าความน่าเชื่อถือของระบบลู่เข้าสู่ค่าค่าหนึ่ง

3. การประเมินต้นทุนเฉลี่ย

ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของต้นทุน (C_i) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุนดังกล่าว ($Pr(C_i)$) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^m C_i Pr(C_i) \quad (3)$$

โดยที่ $E(Cost)$ = ต้นทุนเฉลี่ย

C_i	=	ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ i ใดๆ
$\Pr(C_i)$	=	ความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน C_i
m	=	จำนวนเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในระบบโครงข่าย

จากเงื่อนไขของการเลือกใช้เส้นทางว่าจะทำการเลือกใช้เส้นทาง (หรือมินิมัลพาท) ที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนเสมอ หากไม่สามารถเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดได้จะเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำเป็นลำดับถัดไปแทน

3.1 การประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยการคำนวณโดยตรง

เมื่อทำการพิจารณาต้นทุนที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ย สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ต้นทุนจากการใช้เส้นทางที่เลือก และต้นทุนอันเกิดจากการที่ไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่าย เช่น ค่าปรับอันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถส่งมอบสินค้าได้ตามเวลา หรือค่าเสียโอกาสในการขายสินค้า จึงกำหนดให้ $C(Y_i)$ แทนต้นทุนที่เกิดจากการใช้เส้นทางมินิมัลพาท Y_i โดยเรียงลำดับตามต้นทุนที่น้อยสุดไปถึงมากที่สุด ดังนั้นจะได้ว่าต้นทุนมินิมัลพาท Y_i จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าต้นทุนของมินิมัลพาท Y_{i-1} หรือ $C(Y_{i-1}) \leq C(Y_i)$ เสมอ และกำหนดให้ $\Pr(C(Y_i))$ แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จากการใช้มินิมัลพาท Y_i เมื่อไม่สามารถใช้มินิมัลพาท $Y_1, Y_2, \dots, Y_{i-1}$ ได้ แต่ถ้าหากไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายดังกล่าวในการขนส่ง จะเกิดต้นทุน C_u ขึ้น โดยมีความน่าจะเป็นในการเกิดเท่ากับความน่าจะเป็นที่ไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้ $(1-R)$

ดังนั้น จากสมการต้นทุนเฉลี่ย (3) ซึ่งมีเหตุการณ์ทั้งหมดจำนวน m เหตุการณ์ สามารถเขียนสมการต้นทุนเฉลี่ยใหม่จากต้นทุนทั้ง 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกเกิดจากการใช้มินิมัลพาทในระบบโครงข่ายซึ่งมีจำนวน n มินิมัลพาท และส่วนที่ 2 เกิดจากการไม่สามารถใช้มินิมัลพาทในระบบโครงข่ายได้ อีก 1 พจน์ได้เป็น

$$E(\text{Cost}) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \Pr(C(Y_i)) + C_u (1-R). \quad (4)$$

แต่จากแนวคิดในการคำนวณหาค่าต้นทุนเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (4) มีเงื่อนไขของการคำนวณคือ จะต้องใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนเสมอ ซึ่งความน่าจะเป็นในการที่จะใช้เส้นทางแต่ละเส้นทางนั้นจะตรงกับวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นด้วย Sum of Disjoint Products ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย ดังนั้น จึงนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณหาต้นทุนเฉลี่ยด้วย จะได้ว่า

$$E(\text{Cost}) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \left[\Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \left[\Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \right] \right] + C_u (1-R). \quad (5)$$

จากตัวอย่างข้างต้นพบว่าการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยด้วยสมการที่ (5) นี้จะง่ายและสะดวกกว่าการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4) แต่อย่างไรก็ตามการประเมินค่าต้นทุนเฉลี่ยโดยวิธีคำนวณโดยตรง ยังมีความยุ่งยากในการหาค่าความน่าจะเป็นของต้นทุน ($Pr(C(Y_i))$) ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการที่ใช้การจำลองเหตุการณ์ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อทำการประมาณค่าความน่าจะเป็นของต้นทุน

3.2 การประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยการจำลองเหตุการณ์

ในการประเมินความน่าเชื่อถือจะต่างจากการประเมินต้นทุนเฉลี่ยคือ ในการประเมินความน่าเชื่อถือนั้น เป็นการพิจารณาผลของการเชื่อมโยงระบบโครงข่ายที่เกิดขึ้น ในขณะที่การประเมินต้นทุนเฉลี่ยเป็นการพิจารณาผลของต้นทุนที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายนั้น จะมีอัลกอริทึมที่คล้ายกับการหาค่าความน่าเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันสถานะของระบบโครงข่าย $N(Z_t)$ โดย Z_t เป็นเวกเตอร์สถานะของทางเชื่อมในระบบโครงข่าย จากเดิมที่เป็นการตรวจสอบว่าระบบโครงข่ายสามารถใช้งานได้หรือไม่ มาเป็นการคำนวณต้นทุนในการใช้โครงข่าย ($C(Z_t)$) ในการสุ่มครั้งที่ t แทน โดยการใช้การเปรียบเทียบกับมินิมัลพาที่เรียงลำดับต้นทุนจากน้อยไปมาก เมื่อพบแล้วให้ทำการบันทึกต้นทุนในฟังก์ชัน $C(Z_t)$ แต่ถ้าหากไม่มีเส้นทางที่สามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้เลย แสดงว่าระบบจะเกิดต้นทุนอันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ (C_u) ดังนั้นจึงนำค่า C_u ดังกล่าวไปบันทึกไว้ใน $C(Z_t)$ และทำตามขั้นตอนเหล่านี้ไปเรื่อยๆ

จากวิธีการจำลองเหตุการณ์ดังกล่าวพบว่า การประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการจำลองเหตุการณ์นั้นจะไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับการคำนวณโดยตรง ค่าที่ได้แม้จะเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นแต่ให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรง แต่ผลจะใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรงเพียงใดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นเงื่อนไขในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ ถ้ากำหนดคลาดเคลื่อนให้มีค่าต่ำมากก็จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย

3.3 การเปรียบเทียบผลการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์

ในการศึกษาเปรียบเทียบผลเชิงประสิทธิภาพของการประเมินต้นทุนเฉลี่ย จะทำการศึกษาระบบโครงข่ายตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกันโดยทำการคัดเลือกโครงข่ายตัวอย่างที่มีจำนวนมินิมัลพาที่แตกต่างกันจำนวน 16 โครงข่าย ซึ่งมีทั้งโครงข่ายที่มีทางเชื่อมทิศทางเดียวและโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทาง และในการทดสอบประสิทธิภาพของการประเมินต้นทุนเฉลี่ยทั้ง 2 วิธี ทำการทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB 5.3 ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์รุ่น Pentium 4, 2.4 GHz 512 RAM

3.3.1 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยตรง

เมื่อพิจารณาระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทางและ 2 ทิศทางจะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเมื่อจำนวนทางเชื่อมในระบบโครงข่ายมีจำนวนมากขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของเวลาจะมีค่าแตกต่างกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้การประเมินของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทาง ใช้เวลามากกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทาง พบว่า ในระบบโครงข่ายที่มีจำนวนมินิมัลพาทใกล้เคียงกัน ระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทางจะมีจำนวนทางเชื่อมน้อยกว่าระบบโครงข่ายที่มีจำนวนทางเชื่อม 1 ทิศทาง ซึ่งจะส่งผลให้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทางนั้นมีทางเชื่อมที่ซ้ำกันมากกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง

เมื่อมินิมัลพาทมีทางเชื่อมที่ซ้ำกันมาก จะส่งผลให้พจน์ในการคำนวณความน่าจะเป็นมีจำนวนที่ลดลงในทางกลับกัน ถ้ามีการซ้ำกันของทางเชื่อมน้อยจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของการกระทำนั้นมีจำนวนพจน์มาก และเมื่อระบบมีมินิมัลพาทมากจะส่งผลให้การคำนวณ Sum of Disjoint Products ในพจน์หลังๆ ใช้เวลานานมากขึ้น

จากผลดังกล่าว สรุปได้ว่าวิธีประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงนั้น ใช้เวลามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับจำนวนพจน์ของการหา Sum of Disjoint Products ในแต่ละรอบ โดยสิ่งที่ส่งผลต่อจำนวนพจน์ในการหา Sum of Disjoint Products นั้น ได้แก่การซ้ำกันของทางเชื่อมในมินิมัลพาท ซึ่งมีผลมาจากจำนวนมินิมัลพาทและลักษณะของทางเชื่อม เมื่อจำนวนมินิมัลพาทมากจะส่งผลให้พจน์ในการหา Sum of Disjoint Products มากตามด้วย ส่วนทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทางจะส่งผลให้พจน์ในการหา Sum of Disjoint Products มีค่าน้อยกว่าทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง

3.3.2 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการในการจำลองเหตุการณ์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับผลของการจำลองเหตุการณ์ว่าจะเข้าสู่ค่าค่าหนึ่งได้เร็วเพียงใด ซึ่งการที่ผลการจำลองเหตุการณ์จะเข้าสู่ค่าค่าหนึ่งเร็วหรือช้าขึ้น ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบโครงข่ายว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงทำการคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance) ของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายและนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแปรปรวนกับเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ พบว่าเวลาในการจำลองเหตุการณ์นั้นจะแปรตามค่าความแปรปรวนของระบบโครงข่าย โดยในระบบโครงข่ายที่มีความแปรปรวนของต้นทุนมากกว่า จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานกว่าด้วย

3.3.3 เปรียบเทียบเวลาในการคำนวณโดยตรงกับการจำลองเหตุการณ์

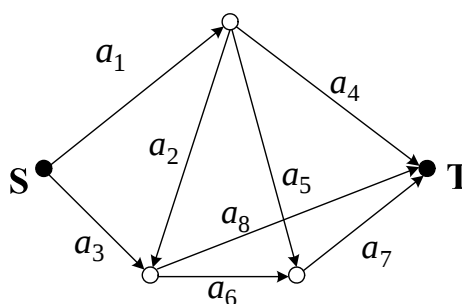
จากการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า เวลาที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของทั้ง 2 วิธีจะมาจากปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยในวิธีการคำนวณโดยตรงนั้น เวลาจะแปรตามจำนวนมินิมัลพาทและลักษณะของทางเชื่อมในระบบ (ซึ่งทั้งคู่ส่งผลต่อเวลาในการคำนวณหา Sum of Disjoint Products) แต่โดยรวมแล้วถ้าระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะนานขึ้นด้วย ส่วนเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์นั้นจะไม่ได้แปรตามขนาดของระบบโครงข่ายเพียงอย่างเดียว แต่จะแปรตามความแตกต่างของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดโดยวัดผ่านความแปรปรวน ถ้าระบบโครงข่ายมีค่าความแปรปรวนมาก จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ยังขึ้นอยู่กับ

เงื่อนไขที่ใช้ในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ด้วยว่าต้องการค่าที่มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ถ้าต้องการความถูกต้องมาก (ϵ มีค่าน้อย) จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย

3.4 การประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวประเมินการปรับปรุงระบบโครงข่าย

ในการนำค่าต้นทุนเฉลี่ยมาใช้เป็นตัวประเมินการปรับปรุงระบบโครงข่าย จะทำการอธิบายผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างระบบโครงข่ายตัวอย่าง (รูปที่ 1) ซึ่งจากผลการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย พบว่าความน่าเชื่อถือมีค่าต่ำ จึงต้องการจะปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายให้ดีขึ้น โดยวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าทางเชื่อมแทนระบบใด เช่น ในกรณีที่ทางเชื่อมแทนผู้ประกอบการขนส่ง อาจทำการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับทางเชื่อมบางทางเชื่อมโดยการปรับราคาค่าขนส่งให้สูงขึ้น หรืออาจหาผู้ขนส่งรายใหม่เข้ามาเป็นทางเชื่อมใหม่ในระบบโครงข่าย โดยในตัวอย่างนี้สมมติให้มีแนวทางเลือกในการปรับปรุงระบบโครงข่าย 5 แบบดังนี้คือ

1. ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของทางเชื่อม a_7 จากเดิมที่มีค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถใช้งานได้ 0.7 เป็นความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุนเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20
2. ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของทางเชื่อม a_1 จากเดิมที่มีค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถใช้งานได้ 0.8 เป็นความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุนเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15
3. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีค่าความน่าจะเป็น 0.8 และมีต้นทุน 28 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบโครงข่ายตัวอย่าง 1 ที่เพิ่มทางเชื่อม a_8

4. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีค่าความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุน 35 ดังแสดงในรูปที่ 1
5. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีค่าความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุน 28 ดังแสดงในรูปที่ 1

จากวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายทั้ง 5 แบบข้างต้นนี้ เมื่อทำการคำนวณความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

เมื่อพิจารณาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย จะเห็นว่าวิธีที่ดีที่สุดในการปรับปรุงโครงข่ายทั้ง 5 แบบคือการเพิ่มทางเชื่อม a_8 ตามแบบที่ 5 แต่ในการปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้น จะส่งผลให้ต้นทุนเฉลี่ยในการใช้ระบบโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาต้นทุนเฉลี่ย พบว่าการปรับปรุงแบบที่ 5 ให้ต้นทุนเฉลี่ยที่มีค่าต่ำสุดเช่นกัน

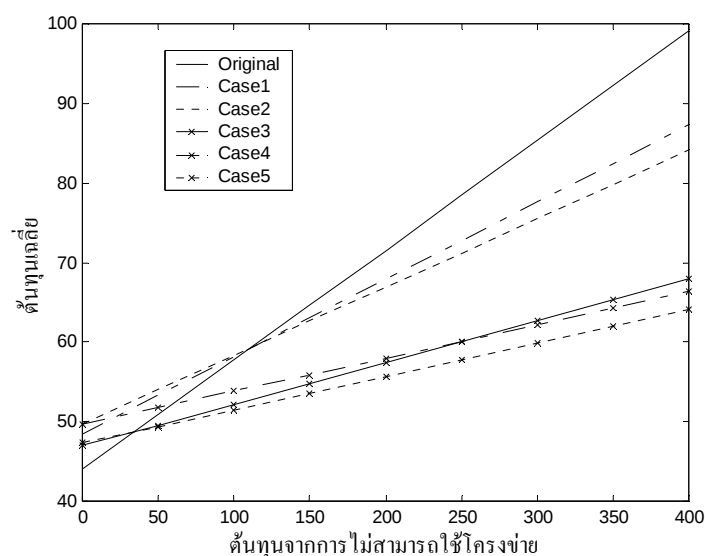
ตารางที่ 1 ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ในการปรับปรุงแบบต่างๆ

แบบที่	ความน่าเชื่อถือของระบบ
1. ปรับปรุง $a_7/0.9/20$	0.903
2. ปรับปรุง $a_1/0.9/15$	0.914
3. เพิ่ม $a_8/0.8/28$	0.948
4. เพิ่ม $a_8/0.9/35$	0.948
5. เพิ่ม $a_8/0.9/28$	0.958

แต่นอกจากการเปลี่ยนแปลงต้นทุนที่ใช้ในแต่ละทางเชื่อมจะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยแล้ว ต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้นั้นก็จะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าของต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่าย ตั้งแต่ 0 จนถึง 400 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้กับต้นทุนเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 พบว่าต้นทุนเฉลี่ยของการใช้ระบบโครงข่ายจะแปรไปตามต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้ ซึ่งทำให้การปรับปรุงระบบโครงข่ายแบบที่ 5 นั้น ไม่ได้มีต้นทุนเฉลี่ยต่ำที่สุดเสมอไป จากรูปถ้าต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้มีค่าต่ำกว่า 34.5 ก็ควรใช้ระบบโครงข่ายเดิมเนื่องจากต้นทุนเฉลี่ยในการขนส่งสินค้ามีค่าต่ำสุด แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 34.5 ควรทำการเพิ่มระบบโครงข่ายด้วยทางเชื่อม a_8 ตามเงื่อนไขแบบที่ 5

แต่ในกรณีที่หากไม่สามารถหาทางเชื่อมใหม่ได้(มีวิธีในการปรับปรุงเพียง 2 วิธีคือแบบที่ 1 และ 2) ควรเลือกการปรับปรุงระบบโครงข่ายแบบที่ 2 คือทำการปรับปรุงทางเชื่อม a_1 เมื่อต้นทุนจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้มีค่ามากกว่า 110.5 แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า ควรใช้ระบบโครงข่ายเดิม

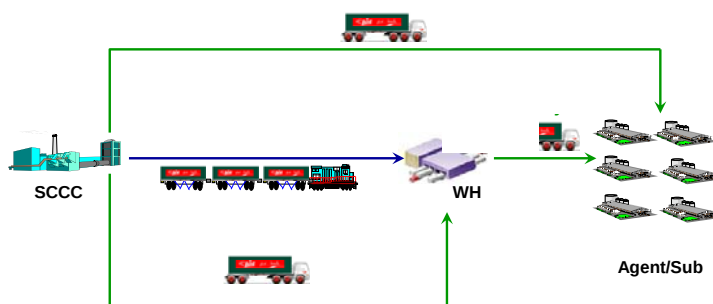


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของต้นทุนเฉลี่ยกับต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่าย

จากตัวอย่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การนำต้นทุนเฉลี่ยมาช่วยในการพิจารณาปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้น จะทำให้เราเลือกตัดสินใจแนวทางการปรับปรุงระบบโครงข่ายได้ดีขึ้น แต่การประเมินค่าต้นทุนเฉลี่ยจะมีความแม่นยำหรือขึ้นอยู่กับค่าประเมินของพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วย ซึ่งค่าบางค่า เช่น ต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้อาจยากในการประเมินให้แม่นยำ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการประเมินระบบจากค่าต้นทุนเฉลี่ยโดยสังเขปหากทราบว่าต้นทุนดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงใด แล้วควรเลือกปรับปรุงระบบโครงข่ายด้วยแนวทางใด โดยได้แสดงให้เห็นด้วยตัวอย่าง

4. การประเมินระบบการขนส่งสินค้าด้วยต้นทุนเฉลี่ย

ในการศึกษาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายการขนส่งนั้น จะใช้ตัวอย่างระบบการขนส่งสินค้าจากโรงงานผลิตที่สระบุรี ไปยังลูกค้าในจังหวัดอุบลราชธานี โดยในการขนส่งนั้นจะสามารถทำได้ 2 วิธีคือทำการขนส่งสินค้าโดยตรงจากโรงงานที่สระบุรีไปยังลูกค้าโดยตรง ส่วนอีกกรณีคือการส่งจากคลังสินค้าในจังหวัดอุบลราชธานีไปยังลูกค้า ซึ่งในการขนส่งสินค้าจากสระบุรีไปยังคลังสินค้าสามารถทำได้ 2 รูปแบบ (Mode) ได้แก่ การขนส่งโดยรถบรรทุกและการขนส่งโดยรถไฟ ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3 ระบบการขนส่งปูนซีเมนต์จากโรงงานสระบุรีไปยังลูกค้าที่อุบลราชธานี

ในการศึกษาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายนี้ ต้องทำการประเมินหาความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้ซึ่งในที่นี้คือความน่าจะเป็นที่ผู้ประกอบการขนส่งแต่ละรายสามารถขนส่งสินค้าได้ ข้อมูลของผู้ขนส่งแต่ละรายมีความแตกต่างกัน ดังนี้

4.1 การขนส่งด้วยรถบรรทุกจากสระบุรีไปยังคลังสินค้า

การประเมินความน่าจะเป็นของการขนส่งด้วยรถบรรทุก จะใช้วิธีการประเมินผู้ขนส่งด้วยแบบสอบถามเนื่องจากไม่มีข้อมูลการขนส่งในอดีตที่สามารถนำมาใช้ประเมินหาความน่าเชื่อถือได้ จากการสอบถามนักวิเคราะห์การขนส่งของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัดและการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งเบื้องต้นพบว่า การรับขนส่งสินค้าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยนอกเหนือจากราคาค่าขนส่งและราคาน้ำมัน แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญมากจะได้แก่ ราคาค่าขนส่ง ราคาน้ำมัน ลักษณะการว่าจ้างงานต่อเนื่องหรือรายครั้ง การมี

สินค้าที่ขากลับ และ ฤดูกาลในการขนส่งสินค้า โดยจากข้อมูลที่ทำให้การสอบถามนำมาสร้างแบบสอบถาม โดยใช้ การออกแบบแบบ Full Factorial เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามตอบคำถาม ว่ารับขนส่งหรือไม่รับนั้น จะได้จำนวนแบบสอบถามที่มาก ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ตอบแบบสอบถามเบื่อหน่ายและไม่ต้องการจะตอบแบบสอบถาม ดังนั้นจึงทำการออกแบบสอบถามใหม่โดยใช้ปัจจัยเพียง 4 ตัวโดยไม่ใช้ราคาค่าขนส่งแล้วทำการออกแบบสอบถามแบบ Full factorial ซึ่งจะได้จำนวนแบบสอบถามทั้งหมด 16 ชุด โดยให้ผู้ตอบแบบสอบถามประมาณช่วงราคาค่าขนส่งที่จะรับขนส่งสินค้าตามตัวอย่างแบบสอบถามดังแสดงในรูปที่ 4 หลังจากนั้นนำไปสอบถามกับผู้ประกอบการขนส่ง

ราคาค่าขนส่งสินค้า	0.6 / 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1.0 / 1.1 / 1.2 / 1.3	บาท/ตัน/กม.
ราคาน้ำมัน	22	(บาท/ลิตร)
การว่าจ้าง	ต่อเนื่อง	
การมีสินค้าที่ขากลับ	มี	
ฤดูกาล	มีการขนส่ง มาก	

รูปที่ 4 ตัวอย่างแบบสอบถาม

แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากแบบการสอบถามดังกล่าวนี้ไม่มีการแจกแจงแบบปกติตรงตามข้อสมมติพื้นฐานทั่วไปของสมการถดถอยเชิงเส้น และความคลาดเคลื่อนที่ได้ก็ไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติด้วย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์อื่นแทน โดยวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis) โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงโลจิสติก มีรูปแบบดังนี้

$$\pi(\underline{x}) = E(Y | \underline{x}) = \frac{1}{1 + \exp(-h(\underline{x}))} = \frac{\exp(h(\underline{x}))}{1 + \exp(h(\underline{x}))} \quad (6)$$

โดยที่

$$h(\underline{x}) = \underline{x}'\underline{\beta} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m$$

$$\underline{x}' \quad \text{แทนเวกเตอร์ของตัวแปรอิสระ } (x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$\underline{\beta} \quad \text{แทนเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ } (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)'$$

เมื่อนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก จะได้แบบจำลองการของผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1 ในการรับขนส่งสินค้าได้ตามความสัมพันธ์ที่ 7 และผู้ประกอบการกลุ่มที่ 2 เป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ 8

$$\hat{\pi}_1(\underline{x}) = \frac{\exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)}{1 + \exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)} \quad (7)$$

$$\hat{\pi}_2(\underline{x}) = \frac{\exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)}{1 + \exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)} \quad (8)$$

โดยที่

$\hat{\pi}_1(\underline{x}), \hat{\pi}_2(\underline{x}) =$	ความน่าจะเป็นในการรับขนส่งสินค้าจากเงื่อนไข
	$\underline{x} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ของผู้ประกอบการกลุ่มที่ 1 และ 2
$x_1 =$	ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)
$x_2 =$	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)
$x_3 =$	ลักษณะการว่าจ้าง (ต่อเนื่อง = 1, รายครั้ง = 0)
$x_4 =$	การมีสินค้าเที่ยวกลับ (มี = 1, ไม่มี = 0)
$x_5 =$	ฤดูกาล (มีปริมาณการขนส่งมาก = 1, มีปริมาณการขนส่งน้อย = 0)

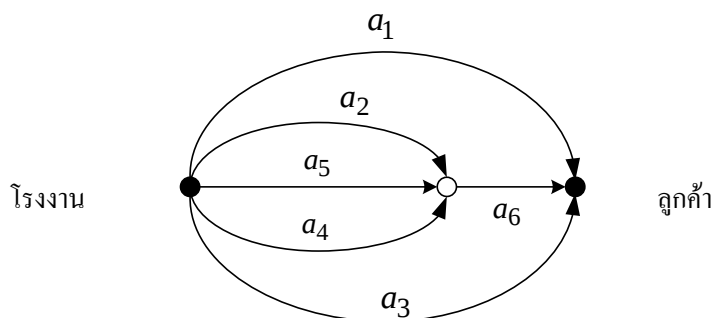
4.2 แบบจำลองการขนส่งด้วยรถไฟ

ในการขนส่งด้วยรถไฟ ทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ได้กำหนดปริมาณการขนส่งไว้ที่ 4,000 ตันต่อเดือน ซึ่งเมื่อตรวจสอบข้อมูลการขนส่งจริงในอดีตพบว่า ปริมาณการขนส่งนั้นจะต่ำกว่า ปริมาณที่กำหนดไว้ อันเนื่องมาจาก ในบางครั้งทางการรถไฟไม่สามารถหาหัวลากมาทำการลากตู้สินค้าไป ยังจุดหมายปลายทางได้ ดังนั้น จึงทำการประมาณหาความน่าจะเป็นที่รถไฟจะสามารถทำการขนส่งสินค้า ตามที่กำหนดไว้โดยการคำนวณหาสัดส่วนของการส่งสินค้าในแต่ละเดือนเทียบกับปริมาณที่กำหนดไว้

4.3 แบบจำลองของคลังสินค้าและการขนส่งต่อไปยังลูกค้า

ในส่วนของคลังสินค้าและการขนส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า นั้น ทางบริษัทได้ทำการว่าจ้างผู้ขนส่งเพียงรายเดียวในการขนส่งสินค้าด้วยอัตราค่าขนส่งที่คงที่ ดังนั้นในการประเมินหาความน่าจะเป็น จะใช้ข้อมูลการขนส่งจากคลังไปยังลูกค้าที่มีในอดีต ว่าคลังสินค้าสามารถจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้ตามเวลาหรือไม่ ซึ่งผลดังกล่าวจะรวมทั้งถึงการมีสินค้าในคลังสินค้าและผู้ขนส่งสามารถขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้ตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากการที่ลูกค้าได้รับสินค้าตรงเวลาแสดงว่า มีสินค้าที่คลังและมีรถพร้อมขนส่ง แต่ถ้าลูกค้าไม่ได้รับสินค้าตามเวลาที่ต้องการแสดงว่าไม่มีสินค้าหรือไม่มีรถในการขนส่ง ดังนั้นสัดส่วนของจำนวนครั้งที่สามารถส่งสินค้าได้ตรงตามเวลาเทียบกับจำนวนครั้งที่จัดส่งสินค้าให้ลูกค้า จะมีค่าเป็นความน่าเชื่อถือของทางเชื่อมนี้

จากลักษณะโครงข่ายการขนส่งในรูปที่ 3 รวมกับแบบจำลองการขนส่งทางรถบรรทุก รถไฟ คลังสินค้าและขนส่งต่อเนื่อง ข้างต้นทั้งหมด สามารถนำมาเขียนเป็นระบบโครงข่ายที่จะใช้ในการศึกษาได้ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์สูง

โดยที่

- a_1 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกกลุ่มที่ 1 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีตรงไปยังลูกค้ามีระยะทางโดยมีระยะทาง 520 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 7
- a_2 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกกลุ่มที่ 1 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีไปยังคลังสินค้าโดยมีระยะทาง 500 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 7
- a_3 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกกลุ่มที่ 2 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีตรงไปยังลูกค้ามีระยะทางโดยมีระยะทาง 520 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 8
- a_4 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกกลุ่มที่ 2 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีไปยังคลังสินค้าโดยมีระยะทาง 500 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 8
- a_5 แทน การขนส่งด้วยรถไฟจากโรงงานไปยังคลังสินค้า
- a_6 แทน คลังสินค้าและการส่งสินค้าไปจากคลังไปยังลูกค้า

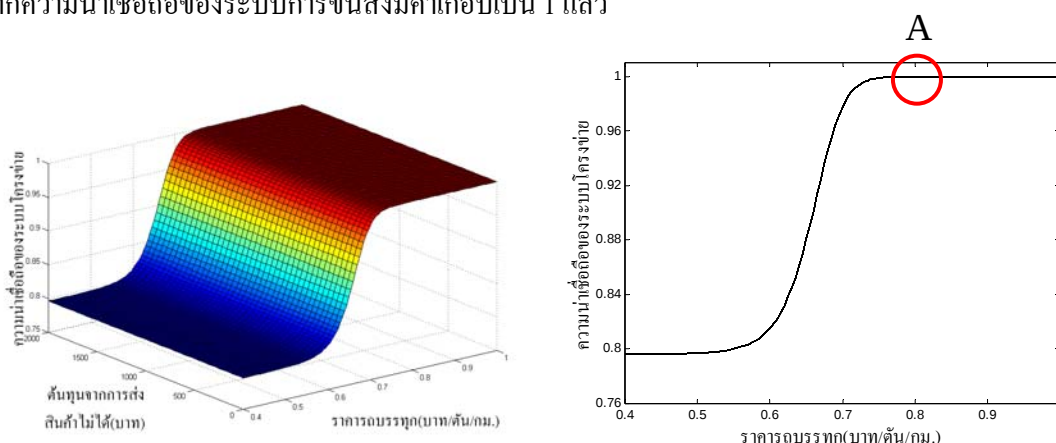
4.4 ผลของค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย

ในการศึกษาผลของค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย จะทำการกำหนดเหตุการณ์หรือเงื่อนไขต่างๆ เพื่อทำการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดของการกำหนดเหตุการณ์ต่างๆ คือ

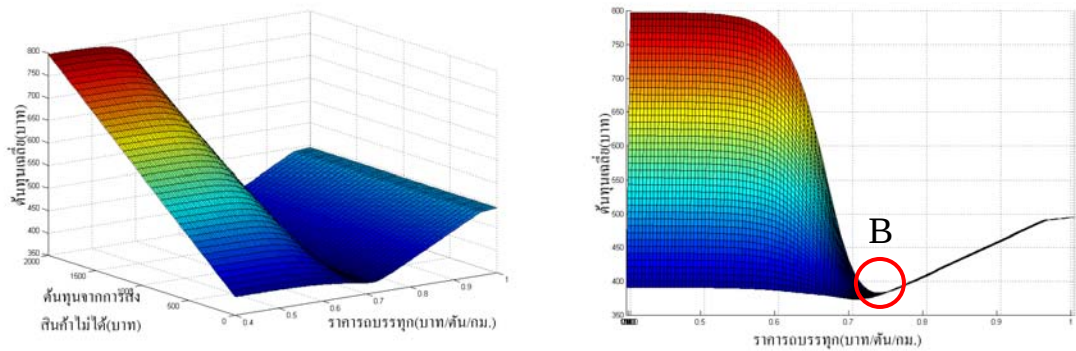
ราคาน้ำมัน 22.00 บาท/ลิตร โดยเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องในช่วงที่มีการขนส่งน้ำมันและมีสินค้า
เที่ยวกลับ มีต้นทุนการขนส่งด้วยรถไฟ 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864 และมีต้นทุนการผ่านคลัง
และจัดส่งให้ลูกค้า 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการประเมินหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย ได้ผลดังแสดงในรูป 6
ซึ่งจะพบว่า ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามราคาค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและไม่
เปลี่ยนแปลงตามต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ แต่เมื่อทำการประเมินต้นทุนเฉลี่ยดังแสดงผลในรูปที่ 7
พบว่า ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย จะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามราคาค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจาก
การขนส่งสินค้าไม่ได้ โดยในช่วงที่ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าต่ำ ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายจะแปร
ผันตามต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ นั่นคือเมื่อต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ต้นทุนเฉลี่ยจะ
มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด B ในรูป 7 ขวาล่าง ซึ่งมีค่าประมาณ
0.75 บาท/ตัน/ก.ม.) จะพบว่าต้นทุนเฉลี่ยเกือบจะไม่แปรผันตามต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก
ระบบโครงข่ายมีค่าความน่าเชื่อถือเกือบจะเป็น 1 แล้ว (พิจารณาจากรูปที่ 6) ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยของระบบเป็น
ผลมาจากส่วนที่เป็นต้นทุนการขนส่งเพียงอย่างเดียวและจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่ามาก
ขึ้น

ดังนั้นหากเราพิจารณาสมรรถนะของระบบโครงข่ายด้วยค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว จะได้ว่า
ค่าขนส่งทางรถบรรทุกควรจะมีค่ามากกว่า 0.8 บาท/ตัน/ก.ม. (จุด A ในรูปที่ 6) จึงจะทำให้ระบบมี
สมรรถนะที่ดีที่สุด เนื่องจากเราไม่ได้นำผลของการขนส่งสินค้าไม่ได้มาคิด จึงจำเป็นต้องให้ระบบการ
ขนส่งมีความน่าเชื่อถือที่มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายประกอบพบว่า ค่าขนส่ง
ทางรถบรรทุกควรมีค่าไม่เกิน 0.75 บาท/ตัน/ก.ม. (จุด B ในรูปที่ 7) ซึ่งขึ้นอยู่กับต้นทุนอันเนื่องมาจากการ
ขนส่งสินค้าไม่ได้ว่ามีค่าน้อยเพียงใด นั่นแปลว่าหากเพิ่มราคาค่าขนส่งรถบรรทุกไปอีกจะส่งผลให้ต้นทุน
โดยรวมของการขนส่งมีค่าสูงเกินไปและไม่ได้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบการขนส่งแต่อย่างใด
เนื่องจากความน่าเชื่อถือของระบบการขนส่งมีค่าเกือบเป็น 1 แล้ว



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ต่อความน่าเชื่อถือของ
ระบบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า การนำต้นทุนเฉลี่ยมาใช้ในการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนั้น จะช่วยในการประเมินสถานะได้ดีกว่าการใช้ค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตามการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนตามที่ได้นำเสนอนี้สามารถทำให้สมบูรณ์ขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้จริง ดังนี้

1. พิจารณานาความจุของทางเชื่อมเข้าในระบบโครงข่าย (Edge Capacity) เพิ่มเติมในระบบการขนส่งอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณการขนส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละทางเชื่อม ซึ่งจะส่งผลต่อการเลือกใช้ทางเชื่อมที่มีอยู่ในระบบ และอาจทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเปลี่ยนแปลงไป
2. เพิ่มความไม่แน่นอนของจุดโหนด (Node Uncertainty) และความจุของจุดโหนด (Node Capacity) จุดโหนดในระบบการขนส่งอาจหมายถึง คลังสินค้าหรือจุดพักสินค้า ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณที่จะรองรับได้ในแต่ละช่วงเวลา อีกทั้งยังมีความไม่แน่นอนในการที่จุดโหนดจะสามารถใช้งานได้หรือไม่ในตัวจุดโหนดเองด้วย

บทคัดย่อ

ระบบการขนส่งสินค้าจัดเป็นระบบโครงข่ายชนิดหนึ่ง ซึ่งหากเกิดปัญหาขึ้นในระบบการขนส่ง เช่น เส้นทางบางเส้นทางไม่สามารถใช้การได้ชั่วคราวอันเนื่องจากปัจจัยบางอย่าง จะส่งผลให้เส้นทางที่เคยทำการเลือกไว้ไม่สามารถใช้ขนส่งสินค้าได้ หรืออาจส่งผลให้ทั้งระบบโครงข่ายนี้ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้เลย ดังนั้นเมื่อระบบโครงข่ายเกิดความไม่แน่นอนขึ้น ทั้งผู้ประกอบการและผู้บริโภคก็จะได้รับความเดือดร้อน

ในปัจจุบันการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน นิยมประเมินผ่านค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) (ระบบโครงข่ายที่มีค่าความน่าเชื่อถือสูง ย่อมเป็นระบบโครงข่ายที่ดี เนื่องจากมีโอกาสในการขนส่งสินค้าได้สูง) โดยมีผู้ทำการศึกษาการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในรูปแบบและเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไปมากมาย แต่การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนด้วยความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวนี้ อาจไม่เพียงพอในการตัดสินใจได้ว่า ระบบโครงข่ายดังกล่าวมีสมรรถนะดีเพียงใด เนื่องจากยังขาดการพิจารณาในส่วนของต้นทุนที่เกิดจากการใช้ระบบโครงข่ายที่ไม่แน่นอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน โดยการใช้ต้นทุนในการใช้เส้นทางร่วมกับความน่าเชื่อถือของเส้นทางมาประเมินเป็นต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย ผ่านการคำนวณหาค่าคาดหวัง (Expected Value) ซึ่งได้นำเสนอวิธีการในการประเมินไว้ 2 วิธี ได้แก่ การประเมินโดยการคำนวณโดยตรง และการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน จากการทดลองผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่าง พบว่าวิธีการคำนวณโดยตรงนั้น เป็นวิธีที่ซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณ แต่ให้ผลที่ถูกต้อง นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแปรตามความซับซ้อนและขนาดของระบบโครงข่าย โดยระบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นก็จะใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นด้วย ในขณะที่การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและค่าที่ได้เป็นค่าประมาณ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ไม่ได้แปรตามขนาดระบบโครงข่าย แต่จะแปรตามความแปรปรวนของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่าย

ในการประยุกต์ใช้ค่าต้นทุนเฉลี่ยกับระบบขนส่งจริงนั้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวอย่างผ่านระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์ชนิดถุงในเขตภาคอีสาน ซึ่งการขนส่งปูนซีเมนต์ถุงในปัจจุบันได้ทำการว่าจ้างผู้ประกอบการขนส่งปูนซีเมนต์ถุงจากโรงงานที่สระบุรี ซึ่งในระบบการขนส่งนี้จะมีการขนส่งใน 2 รูปแบบคือการขนส่งด้วยรถบรรทุกซึ่งเป็นการว่าจ้างผู้รับขนส่งสินค้า และการขนส่งโดยรถไฟ ซึ่งในบางครั้งจะมีปัญหาในการว่าจ้างผู้ขนส่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ทำให้ไม่สามารถขนส่งในบางเส้นทางได้ ดังนั้นระบบโครงข่ายการขนส่งนี้จึงมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น

โดยในการวิเคราะห์ระบบการขนส่งโดยใช้ค่าต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งนี้ จะต้องทำการประเมินความน่าจะเป็นของทางเชื่อมในระบบการขนส่งก่อน โดยทางเชื่อมในระบบการขนส่งในที่นี้จะใช้

แทนผู้ประกอบการขนส่งแต่ละราย ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้จะประเมินจาก การความน่าจะเป็นที่ผู้ขนส่งเหล่านั้นสามารถขนส่งสินค้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยทางเชื่อมในระบบ โครงข่ายการขนส่งนี้แบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ทางเชื่อมที่เป็นรถไฟ ทางเชื่อมที่เป็นการขนส่งจากคลังไป ยังลูกค้า และผู้ประกอบการขนส่งด้วยรถบรรทุกจากสระบุรี โดยความน่าจะเป็นของทางเชื่อม 2 ประเภท แรกคือ รถไฟและการขนส่งจากคลังสินค้านั้น จะทำการประเมินความน่าจะเป็นผ่านข้อมูลในอดีต แต่ใน ส่วนของผู้ประกอบการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกนั้นไม่สามารถหาข้อมูลในอดีตได้ จึงทำการวิเคราะห์หา ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจรับส่งสินค้าของผู้ประกอบการขนส่งสินค้าจากการสัมภาษณ์ด้วย

แบบสอบถาม

จากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งเบื้องต้น พบว่าปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจรับ ขนส่งสินค้าได้แก่ ราคาค่าขนส่งที่ได้รับ ค่าน้ำมัน ลักษณะการวิ่งขนส่ง การมีสินค้าที่ยากลำบาก และ ฤดูกาลที่ทำการขนส่ง ดังนั้นจึงทำการออกแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลโดยการจำลองเหตุการณ์บนปัจจัย ต่างๆ เพื่อสอบถามผู้ประกอบการขนส่งว่า ด้วยสถานะของปัจจัยดังกล่าวจะรับขนส่งสินค้าหรือไม่ หลังจาก นั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการรับส่งสินค้าต่อไป

แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เป็นลักษณะของการตอบว่าจะ รับส่งสินค้าหรือไม่รับส่ง สินค้า ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ จึงต้องใช้การ วิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก หลังจากได้ความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว จะนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการ ประเมินค่าความน่าจะเป็นที่ผู้ประกอบการขนส่งสินค้าจะรับขนส่งสินค้าต่อไป

จากข้อมูลความน่าจะเป็นและต้นทุนของระบบการขนส่ง นำมาสร้างแบบจำลองของระบบการ ขนส่ง และศึกษาถึงผลของราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่มีต่อระบบโครงข่ายผ่านค่าความน่าเชื่อถือและค่า ต้นทุนเฉลี่ย พบว่าการกำหนดราคาค่าขนส่งรถบรรทุกจากการพิจารณาค่าความน่าเชื่อถือที่มีค่าสูงเพียง อย่างเดียวนั้น จะทำให้ราคาค่าขนส่งที่ได้อาจมีค่าสูงเกินไป อีกทั้งยังไม่สะท้อนถึงผลของต้นทุนจากการส่ง สินค้าไม่ได้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากขึ้นไปอีกก็ไม่ทำให้ความน่าเชื่อถือของ ระบบโครงข่ายเพิ่มขึ้นมากนัก แต่กลับจะทำให้ต้นทุนในการขนส่งสินค้าสูงขึ้น ในขณะที่หากราคา รถบรรทุกต่ำลง ความน่าเชื่อถือของระบบก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว

แต่เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของต้นทุนการขนส่งและค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย โดยใช้ค่าต้นทุนเฉลี่ยพบว่า ต้นทุนเฉลี่ยนั้นมีค่าแตกต่างกันไปตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ และจะมีค่า ขนส่งรถบรรทุกค่าหนึ่งที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งนี้มีค่าต่ำสุด หากราคาค่าขนส่งด้วย รถบรรทุกน้อยกว่านี้ ระบบโครงข่ายอาจมีปัญหาด้านความน่าเชื่อถือ ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยแปรผันตามต้นทุน จากการส่งสินค้าไม่ได้ แต่หากราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่านี้ การเพิ่มขึ้นของต้นทุนเฉลี่ยจะมีอิทธิพล จากการเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าระบบโครงข่ายมีความน่าเชื่อถือมากพอแล้ว

Abstract

A transportation system can be modeled as a network. For a route in the network, there could be problems that cause that particular route to be temporally unoperational. The effect of this unoperation could effect a local decision to select another route to transport, or global causes the entire network to be malfunction all together. Therefore, unreliability of the network affects the suppliers and the customers both.

The performance of an unreliable network is usually measured through the reliability value of the network. Naturally, a network with a higher reliability value is considered a better network. Many studies have evaluated the reliability of the unreliable network in many aspects and under various constraints. The network reliability alone, however, may not be a good measure to determine if that is a good network due to the lack of the transportation cost consideration. Hence, this research proposes a network evaluation methodology that considers both the reliability of the network and its transportation cost simultaneously. The methodology calculates the expected value of the reliability and its associated costs, and yields a Reliability Cost Index (RCI). The RCI value is obtained in two different ways in this research: 1) exact calculation, and 2) Monte Carlo simulation. The exact calculation gives the exact value of RCI, but the calculation is rather tedious. Monte Carlo simulation yields an approximated value of RCI, but the method can be easily coded and performed on a computer. Our test results show that the time required for the exact calculation method to obtain the value of the RCI depends upon the size of the network, whereas the time needed for Monte Carlo simulation to calculate RCI depends on the variance of the costs in the network.

This research applies the RCI methodology in a bagged cement transportation network in the north-east region of Thailand. This particular transportation network comprises of 2 modes of transportation: truck and train. Both modes are outsourced. The unreliability of this network is introduced by the uncertain decision of the truck service providers on whether to transport the bagged cement for the company or not, based on the current transportation conditions.

To calculate RCI, we first need to estimate the probability of being able to use each of the edges in the network. In the transportation network example above, an edge represents a transportation service provider. Thus, the probability that any of the edges is usable depends on the probability that the corresponding transpiration service provider will accept to transport or not. The edges in the network can be divided into 3 groups. The first group represents the train connecting the plant in Saraburi province to

the company's warehouse in Ubonrajchathani province. The second group represents the truck service providers transporting between the same plant and warehouse. The last group represents the truck service providers who transport the cement from the plant directly to the customers. The probability of the edge representing the train is determined from the past transportation records. The probabilities of the edges representing the truck service providers are evaluated from a questionnaire.

From the first round of interview, we found that factors that influence the decision of the truck service providers. These factors are transportation service price, oil price, contractual agreement, back hauling, and transportation season. Using these factors, the truck service providers were asked to answer the questionnaire simulating various transportation conditions. The truck service providers might answer "accept or not accept" in each of the set of the conditions.

The probabilities of the edges are then modeled from the data obtained from the answers above. Since the data are dichotomous, they are not suitable for a linear regression model. A logistic regression offers better probability estimates of these edges.

With the probabilities and transportation cost data ready, the reliability and the RCI can now be calculated. Considering the reliability of the network alone may lead the company to offer a high transportation price to the service provider and yet not reflecting the cost of not being able to transport in the network at all. The consequences of the mismatch between the increases in the transportation price and the network reliability are likely to lead to unnecessary high transportation cost to the company.

When analyzing the same network with RCI, the results showed that there was a certain transportation price that considers tradeoffs between the increase in the reliability and the expected cost of the entire network. Any transportation prices that are higher than this particular price will unnecessary increase the network reliability, whereas if the transportation prices are lower than this price the expected cost of the network will be greatly influenced by the unreliability of the network.

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อ	ณ
Abstract	ด
สารบัญ	ท
รายการรูป	บ
รายการตาราง	ฝ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	6
1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
1.6 เนื้อหาของงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย	9
2.1.1 การประเมินโดยการคำนวณโดยตรง	11
2.1.2 การประเมินโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์	21
2.2 การวิเคราะห์ถดถอยโลจิสติก	26
2.3 การหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุด	30
2.4 สรุป	32
บทที่ 3 การวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ย	33
3.1 การวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ย	33
3.1.1 การวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ยโดยวิธีคำนวณโดยตรง	37
3.1.2 การวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ยโดยการจำลองเหตุการณ์	41

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การเปรียบเทียบผลการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงและ การจำลองเหตุการณ์	49
3.2.1 ความสัมพันธ์ของเวลาในการคำนวณโดยตรงกับจำนวนทางเชื่อม	58
3.2.2 ความสัมพันธ์ของเวลาในการจำลองเหตุการณ์	62
3.2.3 เปรียบเทียบเวลาในการคำนวณโดยตรงกับการจำลองเหตุการณ์	67
3.3 การประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวประเมินการปรับปรุงระบบโครงข่าย	67
3.4 สรุป	71
บทที่ 4 การศึกษาระบบการขนส่ง	73
4.1 ความเป็นมา	73
4.2 การเก็บข้อมูล	76
4.3 แบบจำลองระบบการขนส่ง	79
4.3.1 แบบจำลองของการขนส่งทางรถบรรทุก	79
4.3.2 แบบจำลองการขนส่งด้วยรถไฟ	82
4.3.3 แบบจำลองของคลังสินค้าและการขนส่งต่อไปยังลูกค้า	83
4.4 ผลของค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย	85
4.5 ผลของปัจจัยต่างๆของการขนส่งด้วยรถบรรทุกที่มีต่อต้นทุนเฉลี่ย	87
4.6 เปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยของการขนส่งโดยการเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อน กับการใช้เส้นทางที่ผ่านคลังก่อน	90
4.7 สรุป	91
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผล	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	99

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	100
ภาคผนวก	
ก โปรแกรมในการคำนวณต่างๆ	105
ข ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง	109
ค ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่ง	132
ง ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณีต่างๆ	142
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	145

รายการรูป

รูป	หน้า
1.1 ระบบโครงข่ายแบบ One Source-One Sink	2
1.2 ระบบโครงข่ายแบบ Multi Source-Multi Sink	2
1.3 ระบบโครงข่ายแบบ One Source-Multi Sink	2
1.4 แผนภาพแสดงหัวข้องานวิจัยของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน	4
1.5 ระบบ One Source-One Sink ที่ต่อแบบ อนุกรม-ขนาน	3
2.1 ตัวอย่างระบบโครงข่ายที่มีทิศทาง	9
2.2 ตัวอย่างโครงข่ายที่มีการขนส่งสินค้าจาก A ไป B ใน 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน	10
2.3 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	12
2.4 ตัวอย่างของพาหนะในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	13
2.5 ตัวอย่างของกลุ่มทางเชื่อมที่ไม่ใช่พาหนะในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	13
2.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ในรูปแบบของมินิมัลพาหนะ	14
2.7 Disjoint Product	18
2.8 วิธีการสุ่มสถานการณ์ทำงานของแต่ละทางเชื่อม	21
2.9 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์เพื่อประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบมอนติคาร์โล	23
2.10 สถานะของโครงข่ายตัวอย่างจากการสุ่มครั้งที่ 1	24
2.11 สถานะของโครงข่ายตัวอย่างจากการสุ่มครั้งที่ 2	24
2.12 ผลของค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 จากการประมาณค่าด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล	25
2.13 การประมาณค่าข้อมูล Dichotomous Dependent Variable ด้วยการถดถอยเชิงเส้น	28
2.14 การประมาณค่าข้อมูล Dichotomous Dependent Variable ด้วยเส้นโค้ง S	28
2.15 ระบบโครงข่ายตัวอย่างในการค้นหาต้นทุนต่ำสุดโดยใช้ Dijkstra's Algorithm	31
3.1 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลและ Dijkstra's Algorithm (M&D)	44
3.2 ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 จากการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล	45
3.3 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลและมินิมัลพาหนะ (M&M)	48
3.4 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2	50
3.5 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 3	51

รายการรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 4	51
3.7 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 5	51
3.8 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 6	52
3.9 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 7	52
3.10 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 8	52
3.11 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 9	53
3.12 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 10	53
3.13 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 11	53
3.14 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 12	54
3.15 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13	54
3.16 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14	54
3.17 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 15	55
3.18 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 16	55
3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาท ของระบบโครงข่ายตัวอย่าง	58
3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาท ของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่มีทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง	59
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาท ของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทาง	59
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองเหตุการณ์ในการหาต้นทุนเฉลี่ย กับจำนวนมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่าง	62
3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองเหตุการณ์ในการหาต้นทุนเฉลี่ย กับค่าความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่ายตัวอย่าง	64
3.24 ความสัมพันธ์ของความน่าเชื่อถือกับเวลาในการจำลองเหตุการณ์ของระบบโครงข่าย	66
3.25 ความสัมพันธ์ของความน่าเชื่อถือกับความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่าย	66
3.27 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ที่เพิ่มทางเชื่อม a_8	68

รายการรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.28 ความสัมพันธ์ของต้นทุนเฉลี่ยกับต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่าย	71
4.1 รถขนส่งปูนซีเมนต์ผง	74
4.2 ปูนซีเมนต์บรรจุถุง 50 กิโลกรัม	74
4.3 ปูนซีเมนต์บรรจุถุง 1500 กิโลกรัม	74
4.4 รถบรรทุกพ่วง	74
4.5 แนวโน้มราคาน้ำมันและราคาค่าขนส่งในแถบภาคอีสาน	75
4.6 ระบบการขนส่งปูนซีเมนต์ถุงจากโรงงานสระบุรีไปยังลูกค้าที่อุบลราชธานี	76
4.7 ตัวอย่างแบบสอบถาม	78
4.8 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกของผู้ขนส่งกลุ่มที่ 1 ด้วย Minitab	80
4.9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกของผู้ขนส่งกลุ่มที่ 2 ด้วย Minitab	81
4.10 ระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์ถุง	84
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อความน่าเชื่อถือของระบบ	86
4.12 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย	87
4.13 เปรียบเทียบผลของราคาค่าขนส่งต่อต้นทุนเฉลี่ยในกรณีที่ส่งผ่านคลังกับกรณีที่เลือกทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อน	92
5.1 ความสัมพันธ์ของต้นทุนเฉลี่ยกับต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่าย	95
5.2 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อความน่าเชื่อถือของระบบ	96
5.3 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย	97

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความน่าจะเป็นของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายของตัวอย่างที่ 1	16
2.2 สัญลักษณ์ของ Boolean	19
2.3 ตัวอย่างผลการจำลองเหตุการณ์ของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 แบบมอนติคาร์โล	25
3.1 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายของตัวอย่างที่ 1	34
3.2 การคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นและต้นทุนของของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	35
3.3 ความน่าจะเป็นและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1	37
3.4 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก	39
3.5 ผลของการจำลองเหตุการณ์ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 แบบมอนติคาร์โล	45
3.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างในการศึกษาเปรียบเทียบผล	49
3.7 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 2	50
3.8 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก	50
3.9 ต้นทุนและสมรรถนะของระบบโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ	56
3.10 เวลาในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยวิธีต่างๆ	57
3.11 จำนวนทางเชื่อมที่ปรากฏในมินินัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13	60
3.12 จำนวนทางเชื่อมที่ปรากฏในมินินัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14	61
3.13 ต้นทุนเฉลี่ยและความแปรปรวนของต้นทุนระบบโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ	63
3.14 ผลการจำลองเหตุการณ์ของระบบตัวอย่างเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นของทางเชื่อม	65
3.15 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทก่อนและหลังปรับปรุงระบบแบบที่ 1	68
3.16 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทก่อนและหลังปรับปรุงระบบแบบที่ 2	68
3.17 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทเมื่อปรับปรุงระบบแบบที่ 3	69
3.18 ต้นทุนในการใช้มีนินัลพาทเมื่อปรับปรุงระบบแบบที่ 4	69
3.19 ความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยของโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ในการปรับปรุงแบบต่างๆ	70
4.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการตัดสินใจรับขนส่งสินค้าของผู้ขนส่ง	78
4.2 ราคาและความน่าจะเป็นในการขนส่งด้วยรถไฟ	83

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.3 ราคาและความน่าจะเป็นในการขนส่งสินค้าจากคลังไปยังลูกค้า	84
4.4 ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด	88
4.5 ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดในแต่ละเดือน เมื่อเป็นการว่าจ้างแบบรายครั้งและไม่มีสินค้าเที่ยวกลับ	89
4.6 ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดในแต่ละเดือน เมื่อเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องและมีสินค้าเที่ยวกลับ	90
5.1 แผนการและผลลัพธ์ของการดำเนินงานวิจัย	98

บทที่ 1

บทนำ

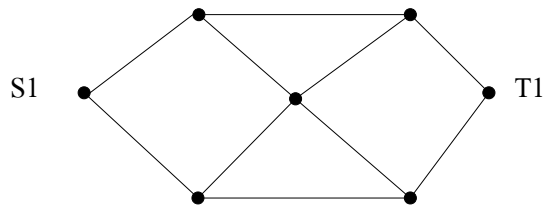
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจและอุตสาหกรรมมีการแข่งขันที่สูง ด้วยสภาพการเปลี่ยนแปลงของตลาดที่มีการปรับเปลี่ยนอย่างรวดเร็วตามภาวะเศรษฐกิจ ไม่ว่าจะเป็นการแข่งขันในเรื่องคุณภาพ ราคา ผลิตภัณฑ์ กำหนดการส่งมอบ และการบริการ นอกจากการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าแล้ว องค์กรต้องปรับตัวและมุ่งสู่เป้าหมายสูงสุด นั่นคือ การสร้างกำไรที่ยั่งยืน กลยุทธ์ในการสร้างผลกำไรมี 2 กลยุทธ์ (Gryna, et al., 2007) ได้แก่ การสร้างรายได้และการลดต้นทุน การสร้างรายได้เกิดจากการสร้างผลิตภัณฑ์หรือบริการใหม่เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้มากขึ้น ส่วนการลดต้นทุนเกิดจากการลดต้นทุนของสินค้าหรือการลดกิจกรรมสูญเสียที่เกิดขึ้นในองค์กร

ในธุรกิจประเภทเดียวกันองค์กรต่างๆ มักใช้เทคโนโลยีในการผลิตสินค้าที่คล้ายกัน ดังนั้นเมื่อทำการลดต้นทุนการผลิตจนถึงจุดหนึ่ง ต้นทุนการผลิตขององค์กรในธุรกิจประเภทเดียวกันย่อมไม่มีความแตกต่างกันมาก หลายองค์กรจึงหันมาสนใจทำการลดต้นทุนในด้านการจัดส่งสินค้าซึ่งถือว่าเป็นต้นทุนที่สำคัญอีกตัวหนึ่งนอกเหนือจากการลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากต้นทุนในการจัดส่งสินค้านั้นเป็นต้นทุนในเชิงการจัดการโดยแต่ละองค์กรอาจมีนโยบายที่แตกต่างกันไป บางองค์กรมีหน่วยงานขนส่งสินค้าเป็นของตนเอง แต่บางองค์กรทำการจ้างบริษัทขนส่งภายนอกให้ทำการขนส่งสินค้าให้ ส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งสินค้ามีความแตกต่างกันด้วย

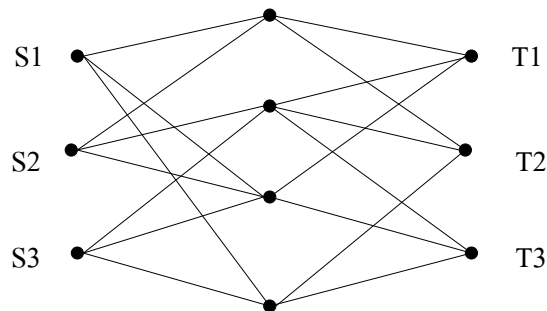
เมื่อพิจารณาถึงระบบในการขนส่งสินค้า ซึ่งรวมถึงตั้งแต่ โรงงาน โกดัง ศูนย์กระจายสินค้า จนถึงลูกค้า ตลอดจนเส้นทางต่างๆ ในการขนส่งสินค้า พบว่าระบบดังกล่าวมีลักษณะเชื่อมโยงกันเป็นระบบโครงข่าย (Network) ซึ่งเมื่อแบ่งตามจำนวนของจุดเริ่มต้นและจุดปลาย จะสามารถแบ่งระบบโครงข่ายได้เป็น

- One Source-One Sink (Two-Terminal System) คือระบบที่มีจุดเริ่มต้น (S1) 1 จุด และมีจุดปลาย (T1) 1 จุด เปรียบเสมือนการขนส่งสินค้าจากโรงงานหรือคลังสินค้า เพื่อนำไปส่งให้กับลูกค้า โดยมีเส้นทางในการขนส่งได้หลากหลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 1.1



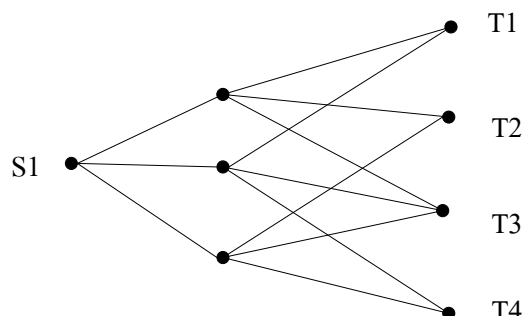
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างระบบโครงข่ายแบบ One Source-One Sink

- Multi Source-Multi Sink คือระบบที่มีจะเริ่มต้นหลายจุด (S1-S3) และมีจุดปลายทางหลายจุด (T1-T3) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 เช่นหากที่มีโรงงานผลิตหรือคลังสินค้าหลายแห่ง และต้องการจัดสรรสินค้าไปส่งให้กับลูกค้าในหลายๆ ที่ โดยในการจัดสรรนั้นจะต้องคำนึงถึงต้นทุนรวมในการขนส่งสินค้าให้ต่ำที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดหรือเงื่อนไขการขนส่งต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างระบบโครงข่ายแบบ Multi Source-Multi Sink

- One Source-Multi Sink คือระบบโครงข่ายที่มีจุดเริ่มต้นเพียง 1 จุด (S1) แต่มีจุดปลายทางหลายจุด (T1-T4) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 เช่นกรณีที่มีโรงงาน หรือคลังสินค้า 1 แห่ง แต่ต้องทำการกระจายสินค้าไปยังลูกค้าตามสถานที่ต่างๆ



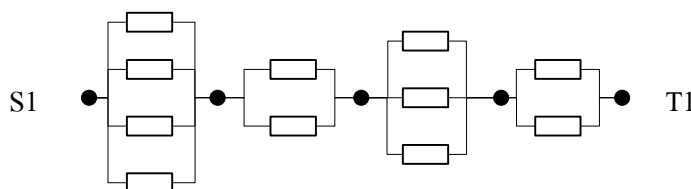
รูปที่ 1.3 ตัวอย่างระบบโครงข่ายแบบ One Source-Multi Sink

เมื่อทำการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับระบบโครงข่ายแบบต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นเรื่องของการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่จะทำให้เกิดค่าใช้จ่าย หรือระยะทาง หรือเวลา ในการขนส่งสินค้าโดยรวมต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไข (Constraints) ต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เหมาะสมกับระบบ โครงข่ายนั้นๆ เช่น Dijkstra's Algorithm (Misra, 2001) Linear Programming (Avella, et al. 2006) และ Neural Network (Horiguchi, et al. 2004) เพื่อหาเส้นทางที่ดีที่สุด (ในเชิงต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด) ในการจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้

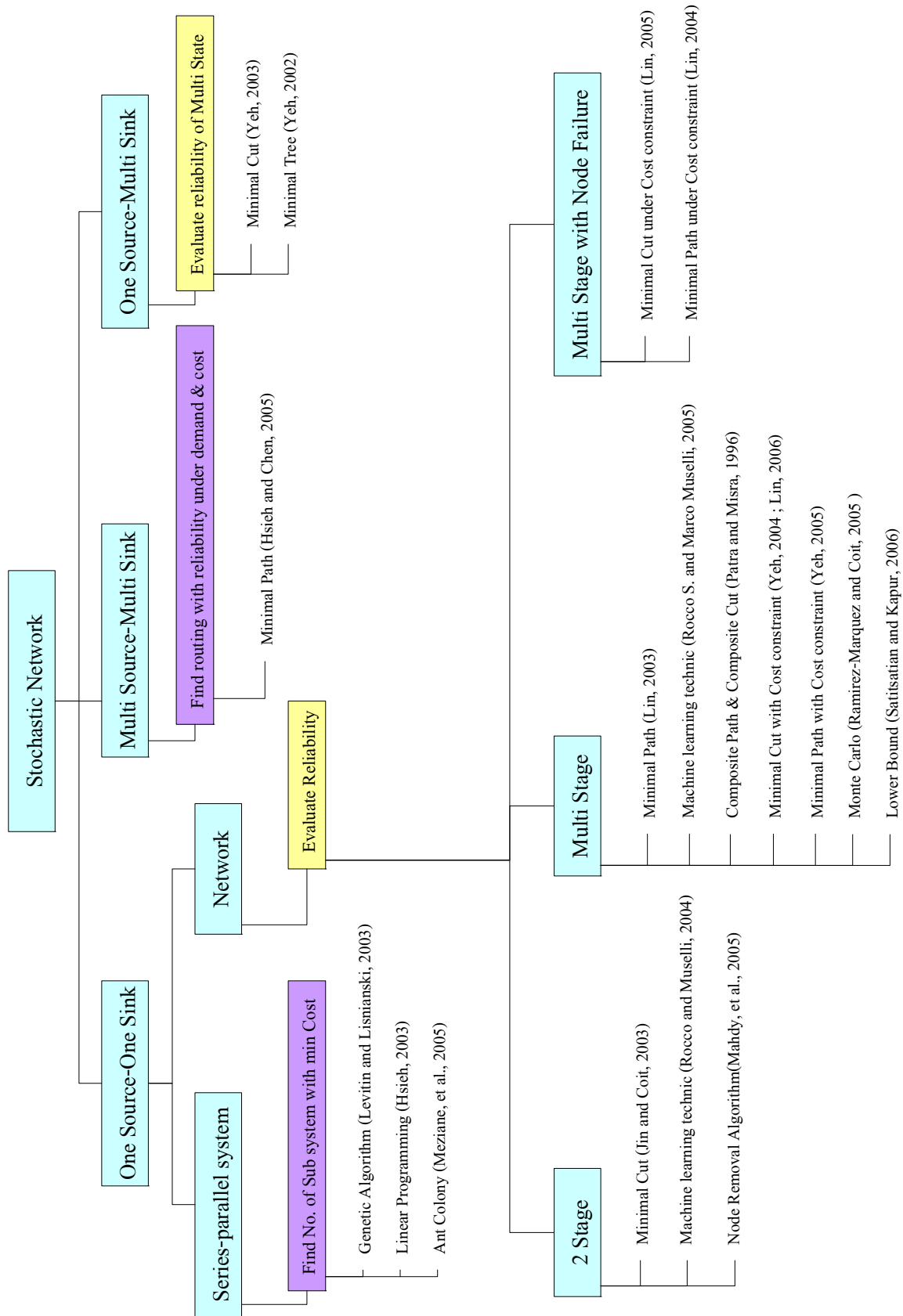
ในการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุดส่วนใหญ่ จะกำหนดให้ระบบโครงข่ายมีลักษณะเป็น “Deterministic Model” ซึ่งหมายความว่าเส้นทางต่างๆ ในระบบโครงข่ายที่ทำการศึกษาคงไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในความเป็นจริงนั้นระบบโครงข่ายมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้อยู่เสมอ เช่น เส้นทางบางเส้นทางไม่สามารถใช้การได้ชั่วคราวอันเนื่องมาจากปัจจัยบางอย่าง ซึ่งจะส่งผลให้เส้นทางที่เคยทำการเลือกไว้ไม่สามารถใช้ขนส่งสินค้าได้ หรืออาจส่งผลให้ทั้งระบบโครงข่ายนี้ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้เลย เนื่องจากไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้ ดังนั้นเมื่อระบบโครงข่ายเกิดความไม่แน่นอนขึ้น การค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด เพื่อนำมาใช้กำหนดต้นทุนโดยอาศัย Deterministic Model ในการขนส่งจึงไม่สามารถทำได้

เมื่อระบบโครงข่ายมีความไม่แน่นอน ต้องอาศัยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองหรือวิธีอื่นๆ งานวิจัยที่วิเคราะห์ระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนที่ผ่านมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. การค้นหาเส้นทางหรือจำนวนระบบย่อยเพื่อให้มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด (Optimum Redundant System) ภายใต้ความน่าเชื่อถือที่กำหนดไว้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะของระบบโครงข่ายที่มีจุดเริ่มต้น 1 จุด (S1) และจุดปลาย 1 จุด (T1) ที่มีการต่อแบบ อนุกรม-ขนาน (Series-Parallels) ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งระบบเหล่านี้มีการคำนวณหาความน่าเชื่อถือได้ไม่ยากเนื่องจากระบบย่อยต่อกันอย่างมีระเบียบ



รูปที่ 1.5 ตัวอย่างระบบ One Source-One Sink ที่ต่อแบบ อนุกรม-ขนาน



รูปที่ 1.4 หัวข้องานวิจัยของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน

2. ประเมินหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย (Network Reliability) ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาระบบโครงข่ายที่มี 1 จุดเริ่ม และ 1 จุดปลาย ซึ่งการประเมินหาความน่าเชื่อถือของโครงข่ายแบบนี้จะมีความยุ่งยากเนื่องจากโครงข่ายต่อกันอย่างไม่เป็นระบบ จึงมีผู้เสนอวิธีการในการหาความน่าเชื่อถือของระบบไว้หลากหลาย สามารถสรุปได้เป็น 3 แบบคือ

2.1 การคำนวณโดยตรง (Analytical Calculation) (Billinton, 1992) สามารถทำได้หลายวิธีการเช่น การคำนวณค่าความน่าเชื่อถือผ่าน Minimal Cut (MC) หรือ Minimal Path (MP) การใช้วิธีลดทอนโครงข่าย (Network Reduction) หรือ การใช้เมตริกซ์เชื่อมโยง (Connection Matrix Techniques) โดยค่าความเชื่อถือได้ที่คำนวณด้วยวิธีนี้จะเป็นค่าที่ถูกต้อง แต่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณหาความเชื่อถือได้ของระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบโครงข่ายมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น มีจำนวนโนด (Node) หรือ ทางเชื่อม (Edge) มากขึ้น

2.2 การจำลองเหตุการณ์ (Simulation) (Billinton, 1992) เช่น การใช้วิธี Monte Carlo ซึ่งเป็นการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของระบบ โดยการสุ่มจำลองเหตุการณ์ของแต่ละระบบย่อยว่าเป็นสถานการณ์ใด แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดมาประเมินหาว่าระบบโดยรวมจะเป็นเช่นไร Monte Carlo เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการประมาณค่าผ่านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ค่าความน่าเชื่อถือของระบบที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีการคำนวณโดยตรง อีกทั้งอาจใช้เวลานานในการประมวลผลถ้าระบบที่คำนวณมีขนาดใหญ่หรือผู้เขียนเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เขียนได้ไม่ดี

2.3 การหาค่าขอบเขต (Boundary) เป็นการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของระบบโดยผ่านการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาขอบเขตของคำตอบที่มากที่สุด (Upper Bound) หรือน้อยที่สุด (Lower Bound) ที่เป็นไปได้ ข้อดีของการหาค่าขอบเขตคือจะใช้เวลาในการคำนวณสั้นลงกว่าการคำนวณโดยตรงหรือการจำลองเหตุการณ์ แต่ข้อเสียคือค่าที่ได้อาจแตกต่างจากค่าจริงมากเนื่องจากเป็นเพียงค่าขอบเขตเท่านั้น

จากการศึกษาพบว่า ค่าความน่าเชื่อถือที่ได้จากการประเมินระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอนนั้นจะถูกนำไปใช้ประเมินว่าระบบโครงข่ายการขนส่งที่มีอยู่มีประสิทธิผลเป็นอย่างไร ถ้าระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำแสดงว่ามีโอกาสที่ระบบจะไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการปรับปรุงระบบโครงข่ายให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น โดยในการปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนจะใช้วิธีใดในการปรับปรุงโครงข่ายนั้นอาจขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในปัจจุบันและผลจากการปรับปรุงโครงข่ายด้วยวิธีนั้นๆ แต่การพิจารณาจากค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวอาจไม่ได้วิธีที่ดีที่สุดเสมอไป เนื่องจากวิธีที่ได้นั้นอาจมีต้นทุนที่สูงกว่าวิธีอื่นๆ ดังนั้นในการประเมินระบบโครงข่ายควรมีการนำเอาต้นทุนในการขนส่งมาร่วมพิจารณาด้วย เพื่อให้สามารถเลือกวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายที่ดีที่สุดและมีต้นทุนที่เหมาะสม

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้น เช่น Lin (2006) หรือ Yeh (2004) ได้นำต้นทุนในการใช้เส้นทางขนส่งมาเป็นข้อจำกัดในการประเมินความน่าเชื่อถือ กล่าวคือเป็นการประเมินหาความน่าเชื่อถือของระบบ โดยมีเงื่อนไขว่าเส้นทางที่จะใช้ในการขนส่งจะต้องมีต้นทุนไม่เกินต้นทุนที่กำหนดไว้ด้วย แต่ยังไม่มีการวิจัยที่นำต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายมาร่วมพิจารณากับความน่าเชื่อถือแต่อย่างใด

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการศึกษาถึงการนำต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายมาร่วมพิจารณา ร่วมกับความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย เพื่อคำนวณต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) ของระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอนนี้ โดยในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยของการใช้ระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนี้จะต้องรวมเอาต้นทุนซึ่งเกิดจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ตามที่ต้องการเข้าไปด้วย ซึ่งรายละเอียดต่างๆ จะได้นำเสนอในบทต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

4. เพื่อพัฒนาวิธีการในการประเมินต้นทุนของการขนส่ง ในระบบ One Source-One Sink ที่มีความไม่แน่นอน
5. เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ทางเชิงทฤษฎีในด้านการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบที่มีความไม่แน่นอน
6. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีกับสถานการณ์จริง

1.3 ขั้นตอนและการดำเนินงาน

1. ทำการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณหาค่าต้นทุนเฉลี่ย
2. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการประเมินความน่าจะเป็นของระบบโครงข่าย
3. ออกแบบวิธีการที่จะใช้ในการคำนวณหาต้นทุนเฉลี่ยพร้อมทั้งทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. เลือกระบบการขนส่งตัวอย่าง และทำการสำรวจภาคสนาม (Field Survey)
5. ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของระบบตัวอย่าง พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น
6. วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาไว้ข้างต้น
7. สรุปผลและวิจารณ์วิธีการในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยที่ได้พัฒนาขึ้น

1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย

5. ระบบโครงข่ายที่พิจารณาเป็นแบบ One Source-One Sink
6. ทางเชื่อม (Edges) ในระบบโครงข่ายมี 2 สถานะ คือ สามารถใช้งานได้ (Working) และไม่สามารถใช้งานได้ (Failure) โดยถือว่าทางเชื่อมมีความจุ (Capacity) ไม่จำกัดเมื่อสามารถใช้งานได้
7. จุดโนด (Nodes) มีสถานะเดียวคือ สามารถใช้งานได้ตลอดเวลา (Perfect Node) และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของความจุของจุดโนด
8. ในการขนส่งผ่านระบบโครงข่ายจะไม่มีการหยุดพักที่จุดโนด หรือคิดถึงผลเรื่องเวลาที่เกิดขึ้น
9. ใช้ระบบโครงข่ายการขนส่งที่จำลองมาจากระบบการขนส่งจริงที่มีความไม่แน่นอน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4. ทราบวิธีการประเมินความน่าเชื่อถือของการขนส่งในระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน
5. ทราบวิธีการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของการขนส่งในระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน
6. เป็นแนวทางในการประยุกต์วิธีการประเมินต้นทุนเฉลี่ยกับระบบการขนส่งรูปแบบอื่นๆ

1.6 เนื้อหาของงานวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง ความรู้พื้นฐานต่างๆ ในการนำไปสู่การประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย ซึ่งได้แก่ การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน การค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด และการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก

บทที่ 3 กล่าวถึง การประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายซึ่งได้นำเสนอไว้ 2 วิธีคือ การคำนวณโดยตรงกับการจำลองเหตุการณ์ พร้อมทั้งตัวอย่างเปรียบเทียบวิธีการทั้ง 2 วิธี นอกจากนั้นยังได้นำเสนอตัวอย่างในการประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยเพื่อทำการตัดสินใจปรับปรุงระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน

บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์ระบบการขนส่งของกรณีศึกษาโดยใช้ต้นทุนเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัด

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุป ประโยชน์ที่ได้รับและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

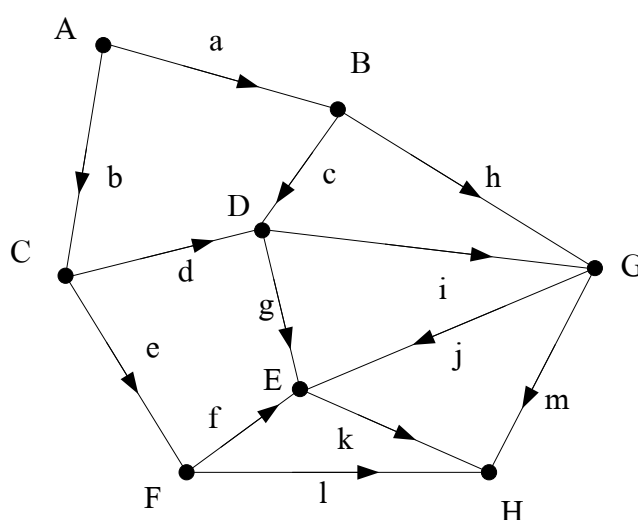
ในระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนั้น จะมีการประเมินความสามารถของโครงข่ายผ่านดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งที่เรียกว่า *ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย* ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย แต่การใช้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเพียงอย่างเดียว อาจยังไม่เพียงพอในการประเมินสมรรถภาพของระบบโครงข่ายเพื่อตัดสินใจที่จะปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้นหรือไม่ ทั้งนี้เพราะว่าในการขนส่งผ่านโครงข่ายจะมีต้นทุนเกิดขึ้นทั้งที่เป็นค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่แตกต่างกันตามเส้นทางที่ใช้ และค่าความสูญเสียที่เกิดจากการไม่สามารถขนส่งได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเสนอตัวประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนตัวใหม่ โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายรวมกับต้นทุนในการขนส่งของระบบโครงข่าย ตัวประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนตัวใหม่นี้เรียกว่า *ต้นทุนเฉลี่ยของการใช้ระบบโครงข่าย* โดยมีเงื่อนไขว่าจะเลือกใช้เส้นทางที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดก่อนเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายก่อนซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 2.1

ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย คือความน่าจะเป็นที่ระบบโครงข่ายสามารถใช้งานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น โดยทำการประเมินจากความน่าจะเป็นของระบบย่อยต่างๆ ที่อยู่ในระบบโครงข่าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการประเมินหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบย่อยที่อยู่ในระบบโครงข่ายก่อน ซึ่งวิธีในการประเมินหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบย่อยจะมีความแตกต่างกันไปตามระบบโครงข่ายที่นำไปประยุกต์ใช้ เช่น ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบย่อยจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง เช่น สายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถทำการประเมินความน่าจะเป็นผ่านข้อมูลในอดีต โดยดูจากอัตราส่วนของเวลาที่อุปกรณ์สามารถใช้งานได้เทียบกับเวลาทั้งหมด โดยวิธีนี้จะต้องใช้การเก็บข้อมูลจากอดีตเป็นจำนวนมากทำให้สิ้นเปลืองเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอวิธีการประเมินความน่าจะเป็นของระบบย่อยโดยการพยากรณ์ แต่เนื่องจากค่าที่จะทำการพยากรณ์นั้นเป็นสถานะของโครงข่ายซึ่งในการศึกษานี้เป็นแบบ 2 สถานะ คือสามารถใช้งานได้ และไม่สามารถใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคที่เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก หรือ “Logistic Regression” เข้ามาประยุกต์เพื่อทำการประเมินหาค่าความน่าจะเป็นของระบบย่อยที่จะสามารถทำงานได้ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.2

นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายจะกำหนดให้เลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนเสมอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวิธีในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (เสียค่าใช้จ่ายในการเดินทางจากจุดกำเนิดไปยังจุดหมายปลายทางน้อยที่สุด) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ยด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า Dijkstra's Algorithm ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.3

2.1 การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

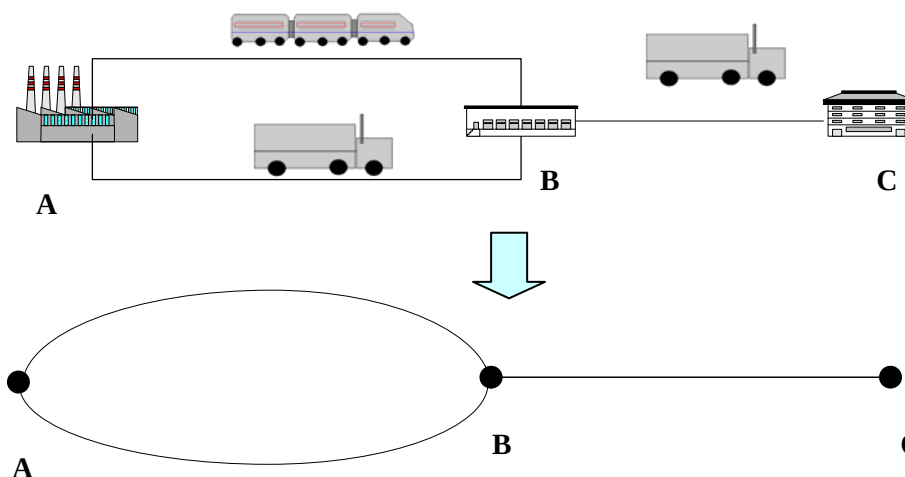
ในระบบโครงข่ายหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยระบบย่อยๆ ซึ่งระบบย่อยเหล่านี้จะได้รับการแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โหนด (Nodes) คือระบบย่อยที่ใช้เป็นจุดเริ่มต้น จุดรวม หรือจุดสิ้นสุดในระบบโครงข่าย และ ทางเชื่อม (Edges) คือระบบย่อยที่ใช้ทำการเชื่อมต่อจุดโนดต่างเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงทิศทางเดียวหรือ 2 ทิศทางก็ได้ เราสามารถเขียนกราฟแทนระบบโครงข่ายโดยใช้จุดแทนโนด และใช้เส้นแทนทางเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีเซตของโนดคือ $\{A, B, C, D, E, F, G, H\}$ และเซตของทางเชื่อมคือ $\{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m\}$



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบโครงข่ายที่มีทิศทาง

ในปัจจุบันระบบโครงข่ายหรือกราฟ (Graph) นี้ สามารถนำมาใช้ในการจำลองระบบต่างๆ เพื่อทำการศึกษาถึงสมรรถนะของระบบโครงข่าย หรือนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาอื่นๆ เช่น ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบเครือข่ายสื่อสาร และระบบการขนส่งหรือระบบโซ่อุปทาน (Supply Chain)

สำหรับระบบโครงข่ายโซ่อุปทาน โหนดจะหมายถึงจุดเริ่มต้น จุดหมายปลายทาง จุดพักหรือจุดเปลี่ยนถ่ายของสินค้าระหว่างทาง (Transshipment Nodes) ส่วนเส้นทางเชื่อมต่อจะหมายถึงเส้นทางที่ใช้ในการขนส่ง โดยอาจแบ่งตามรูปแบบ (Modes) ในการขนส่งหรือผู้ให้บริการขนส่งสินค้า (Transportation Service Provider) ที่แตกต่างกันก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น การขนส่งสินค้าจากจุดโรงงาน A ไปคลังสินค้า B มีการขนส่งได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ขนส่งโดยรถบรรทุก และ ขนส่งโดยรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นรูปแบบการขนส่งสินค้าระหว่าง 2 โหนดใดๆ ที่แตกต่างกันอาจจะนับเป็น 2 ทางเชื่อมในระบบโครงข่ายได้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงข่ายที่มีการขนส่งสินค้าจาก A ไป B ใน 2 รูปแบบที่แตกต่างกัน

ในการศึกษาระบบโครงข่ายโดยมากมักจะเริ่มต้นจากโครงข่ายแบบ 2 สถานะ (Binary State Network) คือเป็นโครงข่ายที่มีสถานะที่เป็นไปได้ของระบบย่อยอยู่ 2 สถานะ คือสถานะพร้อมทำงาน (Working) หมายถึงระบบย่อยสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และ สถานะล้มเหลว (Failure) คือสถานะที่ไม่สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ แต่ในปัจจุบันมีการขยายผลการศึกษาจากโครงข่าย 2 สถานะ ไปเป็นโครงข่ายหลายสถานะ (Multi State Network) โดยมีการเพิ่มสถานะ “ใช้งานได้เพียงบางส่วน” ซึ่งเป็นการกำหนดให้ระบบย่อยทำงานได้เป็นสัดส่วนของที่ออกแบบไว้เช่น ระบบย่อยสามารถทำงานได้เพียง 50 % ของสถานะพร้อมทำงาน โดยจะกำหนดสถานะดังกล่าวก็สถานะแล้วแต่ความเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีหรือหลักการที่ใช้ในการประเมินโครงข่ายหลายสถานะจะเหมือนกับโครงข่าย 2 สถานะ เพียงแต่จะมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากมีสถานะให้พิจารณามากขึ้น ในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการประเมินโครงข่าย 2 สถานะเท่านั้น

ในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายจะสามารถประเมินได้จากความน่าจะเป็นที่ระบบโครงข่ายสามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นไปยังจุดหมาย ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ โดยทำการประเมินผ่านความน่าจะเป็นของโหนดและเส้นเชื่อม ซึ่งมีผู้ศึกษาวิธีการในการประเมินไว้ดังนี้

Yeh (2001, 2002, 2004) และ Lin (2001 และ 2006) ทำการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายทั้งแบบ 2 สถานะและหลายสถานะโดยเริ่มจากการหาความน่าจะเป็นของมินิมัลคัท (Minimal Cut) หรือมินิมัลพาธ (Minimal Path) แล้วนำมารวมกันผ่านหลักการของ Inclusion-Exclusion Principle โดยงานวิจัยของ Yeh และ Lin นั้นได้นำเสนอวิธีการแบบต่างๆ ในการค้นหามินิมัลคัทหรือมินิมัลพาธที่แตกต่างกันออกไปตามเงื่อนไขที่ถูกกำหนดขึ้นเช่น Yeh (2004) และ Lin (2006) ทำการประเมินหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายหลายสถานะโดยการค้นหามินิมัลคัทเมื่อมีข้อจำกัดด้านต้นทุนของทางเชื่อมเป็นเงื่อนไข

ในการเลือกทางเชื่อม หรือ Lin (2001) ทำการศึกษาวิธีการในการนำมินิมัลพาทมาใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเมื่อโนคมีการล้มเหลวเกิดขึ้น หรือ Yeh (2001 และ 2002) ทำการหามินิมัลคัทหรือมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเชื่อมไปจากเดิม โดยใช้มินิมัลคัทหรือมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายเดิม เพื่อย่นเวลาในการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายใหม่ ฯลฯ

Jin และ Coit (2003) ได้ใช้วิธีการประมาณค่าแบบเชิงเส้นและเชิงควอดราติก (Linear and Quadratic Estimation) ผ่านมินิมัลคัท (Minimal Cut) เพื่อประมาณหาค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ในการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย 2 สถานะ เปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณผ่านมินิมัลคัทโดยตรง และยังทำการเปรียบเทียบกับประมาณค่าโดยวิธี Esary-Proschan Model (ESP) และ Edge-Packing Model (EDP) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณผ่านมินิมัลคัทโดยตรงมากกว่าการประมาณค่าแบบ ESP และ EDP

Ramirez-Marquez, et al. (2005) ศึกษาความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้การจำลองเหตุการณ์ที่เรียกว่าการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ทำการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถจ่ายโหลดได้ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณโดยตรงมีความผิดพลาดมากที่สุดไม่เกิน 0.90 % ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าขอบเขต (Boundary) จะมีความผิดพลาดได้สูงถึง 18.97% วิธีการจำลองเหตุการณ์จึงให้ผลที่ดีกว่า

Billinton และ Tang (2004) แสดงให้เห็นถึงการนำมอนติคาร์โลมาประยุกต์หาค่าดัชนีชี้วัดในระบบไฟฟ้ากำลังเช่น Expected Energy Not Supplied (EENS), Expected Damage Cost (EDC), SI (Severity Index) และอื่นๆ โดยใช้ระบบของ IEEE-RTS เปรียบเทียบ ซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับการคำนวณค่าดัชนีต่างๆ โดยตรงแต่ใช้เวลาน้อยกว่า

จากการสำรวจงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้พบว่า วิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายจะแบ่งเป็น 3 วิธีคือ วิธีการคำนวณโดยตรง (Analytical Calculation) วิธีการประมาณค่าโดยใช้ค่าขอบเขต (Boundary) และ การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ในการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้วิธีการแบบการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์ โดยทั้ง 2 วิธีมีรายละเอียดดังนี้

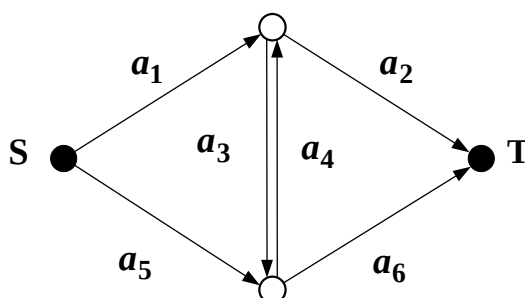
2.1.1 การประเมินโดยการคำนวณโดยตรง

วิธีนี้เป็นวิธีการประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโครงข่ายโดยการคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์โดยตรงซึ่งถือเป็นวิธีที่ให้ผลถูกต้องแม่นยำ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณความน่าเชื่อถือของโครงข่ายมีหลายวิธีเช่น วิธีมินิมัลคัท วิธีมินิมัลพาท และวิธีการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ของข้อผิดพลาด (Fault Tree Analysis) ฯลฯ ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีมินิมัลพาท เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

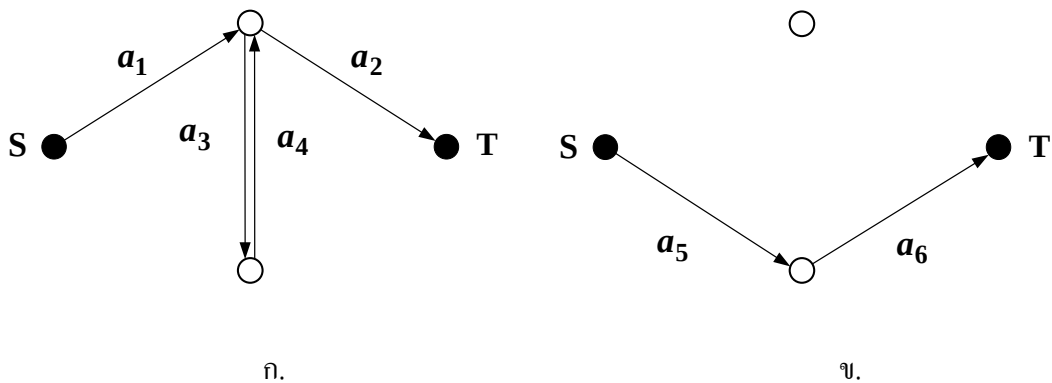
ในการใช้วิธีมินิมัลพาธเพื่อทำการประเมินความน่าเชื่อถือเริ่มจากการค้นหามินิมัลพาธในระบบโครงข่ายก่อนซึ่งมีนิยามดังนี้

- พาธ (Path) คือ กลุ่มหรือเซตของทางเชื่อม (Edge) ใดๆ ในระบบโครงข่าย ซึ่งสามารถใช้เชื่อมต่อโครงข่ายจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายที่กำหนดได้
- มินิมัลพาธ (Minimal Path : MP) คือ พาธที่มีจำนวนสมาชิกน้อยที่สุด โดยที่หากมีทางเชื่อมใดทางเชื่อมหนึ่งในพาธนี้ไม่สามารถใช้งานได้แล้ว จะทำให้ไม่เป็นพาธอีกต่อไป ซึ่งหมายความว่า จะไม่สามารถเชื่อมจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้
- มินิมัลพาธเวกเตอร์ (Minimal Path Vector : MPV) คือ การเขียนมินิมัลพาธให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ที่มีการเรียงลำดับทางเชื่อมและใช้ตัวเลข 1 แสดงสถานะของทางเชื่อมที่ใช้งานได้ และ 0 แทนสถานะของทางเชื่อมที่ไม่ได้ใช้งาน

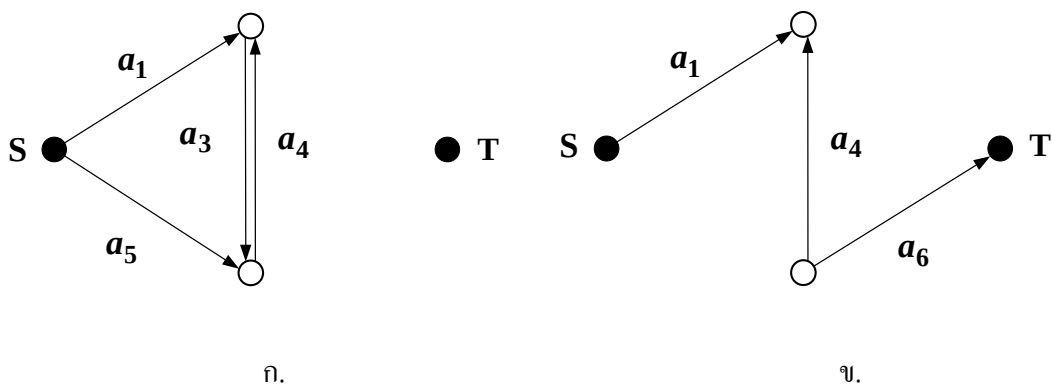
ยกตัวอย่างเช่น ระบบโครงข่ายในรูปที่ 2.3 (Lin, 2001) ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มี 4 โหนด และ 6 ทางเชื่อม มีจุดเริ่มต้นที่ S และจุดปลายที่ T เราจะได้ว่า $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ และ $\{a_5, a_6\}$ เป็นพาธ เนื่องจากทางเชื่อมดังกล่าวสามารถเชื่อมต่อโครงข่ายจาก S ไปยัง T ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ก. และ 2.4 ข. ตามลำดับ ในขณะที่ $\{a_1, a_3, a_4, a_5\}$ และ $\{a_1, a_4, a_6\}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก. และ ข. ไม่ถือว่าเป็นพาธ เนื่องจากไม่สามารถเชื่อมต่อโครงข่ายจาก S ไปยัง T ได้ และเมื่อทำการพิจารณาพาธ $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ และ $\{a_5, a_6\}$ จะพบว่า $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ ไม่เป็นมินิมัลพาธ เนื่องจากเมื่อทำการตัดทางเชื่อม a_3 หรือ a_4 ทิ้งไป เซตของเส้นทางเชื่อมที่เหลือ $\{a_1, a_2\}$ ก็ยังคงเชื่อมต่อ S กับ T ได้ ส่วน $\{a_5, a_6\}$ เป็นมินิมัลพาธเนื่องจากไม่ว่าตัดทางเชื่อมใดทิ้งไปจะทำให้เซตของเส้นทางเชื่อมที่เหลือไม่สามารถเชื่อมต่อ S กับ T ได้



รูปที่ 2.3 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1



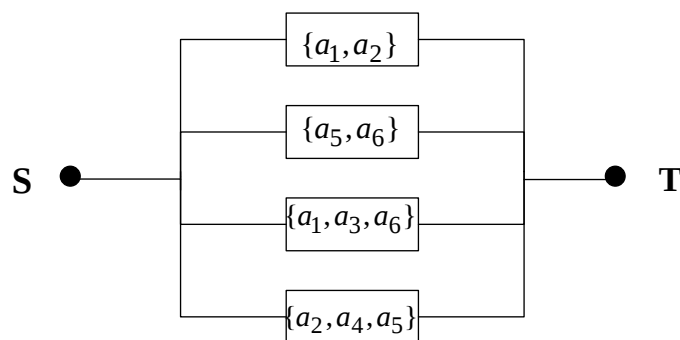
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของพาทในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของกลุ่มทางเชื่อมที่ไม่ใช่พาทในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ในตัวอย่างโครงข่ายที่ 1 ตามรูปที่ 2.3 จะสามารถหาขั้นต่ำของพาทของโครงข่ายทั้งหมดได้ 4 ขั้นขั้นต่ำพาทคือ $\{a_1, a_2\}$, $\{a_5, a_6\}$, $\{a_1, a_3, a_6\}$ และ $\{a_2, a_4, a_5\}$ หรือสามารถเขียนแสดงการเชื่อมต่อโครงข่ายด้วยขั้นต่ำพาทได้เป็นดังรูปที่ 2.6

นอกจากการแสดงขั้นต่ำพาทในรูปของเซตแล้ว ยังสามารถเขียนขั้นต่ำพาทให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้เป็น $(1,1,0,0,0,0)$, $(0,0,0,0,1,1)$, $(1,0,1,0,0,1)$ และ $(0,1,0,1,1,0)$ ตามลำดับโดยตัวเลขตัวแรกจะแสดงสถานะของทางเชื่อมที่ 1 (เลข “1” แทนสถานะที่สามารถใช้งานได้ และตัวเลข “0” แทนสถานะที่ไม่สามารถใช้งานได้) และตัวเลขตัวถัดไปจะแสดงสถานะของทางเชื่อมที่ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ในรูปแบบของมินิมัลพาท

จากรูปที่ 2.6 พบว่า ความน่าจะเป็นที่ระบบสามารถเชื่อมโยงจุด S ไปยัง T ได้จะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่มินิมัลพาท $\{a_1, a_2\}$ หรือ $\{a_5, a_6\}$ หรือ $\{a_1, a_3, a_6\}$ หรือ $\{a_2, a_4, a_5\}$ ทำงานอย่างน้อย 1 ชุด ซึ่งสามารถเขียนสมการในการหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายได้เป็นดังสมการที่ (2.1)

$$R = \Pr(\{a_1, a_2\} \cup \{a_5, a_6\} \cup \{a_1, a_3, a_6\} \cup \{a_2, a_4, a_5\}) \quad (2.1)$$

โดยที่ R = ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

$\Pr$ = ความน่าจะเป็น

ดังนั้นหากกำหนดให้ X_i แทนมินิมัลพาทเวกเตอร์ที่ i ของระบบโครงข่ายและ n เป็นจำนวนมินิมัลพาททั้งหมดที่มีในระบบโครงข่าย จะสามารถเขียนแสดงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่สามารถเชื่อมโยงจุด S ไปยัง T ได้เป็น

$$R = \Pr(X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i \cup \dots \cup X_n) \quad (2.2)$$

2.1.1.1 การประยุกต์ใช้กฎ Inclusion-Exclusion Principle

จากสมการ (2.2) เราไม่สามารถคำนวณหาความน่าเชื่อถือได้โดยการนำความน่าจะเป็นของแต่ละมินิมัลพาทมารวมกันโดยตรง เนื่องจากมินิมัลพาทต่างๆ มีการใช้ทางเชื่อมร่วมกัน ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมใดทางเชื่อมหนึ่งจะทำงานได้หรือไม่นั้น อาจส่งผลต่อความน่าจะเป็นที่มินิมัลพาทหลายๆ พาทสามารถทำงานได้ จึงจำเป็นต้องกระจายพจน์ในสมการ (2.2) ก่อน โดยอาศัยพีชคณิตของเซตและกฎ Inclusion-Exclusion Principle ซึ่งหลักการของ Inclusion-Exclusion Principle คือ

$$\Pr(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots \cup A_n) = \Pr(A_1) + \Pr(A_2) + \Pr(A_3) + \dots + \Pr(A_n) - \Pr(A_1 \cap A_2) - \dots$$

$$\begin{aligned}
 & - \Pr(A_1 \cap A_2) - \dots - \Pr(A_1 \cap A_n) - \Pr(A_2 \cap A_3) - \dots - \Pr(A_{n-1} \cap A_n) \\
 & + \Pr(A_1 \cap A_2 \cap A_3) + \dots
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

นำสมการที่ (2.3) ไปแทนประยุกต์ใช้กับสมการที่ (2.2) ทำให้สามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$R = \sum_{i=1}^n \Pr(X_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr(X_i \cap X_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n \Pr(X_i \cap X_j \cap X_k) - \dots \tag{2.4}$$

โดยที่ $\Pr(X_i) = \prod_{e=1}^a \Pr(x_{ie} = 1)$

a = จำนวนทางเชื่อมทั้งหมดในระบบโครงข่าย

n = จำนวนมินิมัลพาททั้งหมดในระบบโครงข่าย

x_{ie} = สถานะของทางเชื่อมที่ e ในมินิมัลพาทที่ i จะมีค่าเป็น 1 เมื่อทางเชื่อมนั้นใช้งานได้และมีค่าเป็น 0 เมื่อทางเชื่อมนั้นไม่สามารถใช้งานได้

$\Pr(x_{ie} = 1)$ = ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมที่ e ในมินิมัลพาทที่ i จะสามารถใช้งานได้

เมื่อนำสมการที่ (2.4) ไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ (2.1) เพื่อทำการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีมินิมัลพาท 4 พาท จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned}
 R = & \Pr(X_1) + \Pr(X_2) + \Pr(X_3) + \Pr(X_4) - \Pr(X_1 \cap X_2) - \Pr(X_1 \cap X_3) - \Pr(X_1 \cap X_4) \\
 & - \Pr(X_2 \cap X_3) - \Pr(X_2 \cap X_4) - \Pr(X_3 \cap X_4) + \Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_3) \\
 & + \Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_4) + \Pr(X_1 \cap X_3 \cap X_4) + \Pr(X_2 \cap X_3 \cap X_4) \\
 & - \Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_3 \cap X_4)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

โดยที่ $X_1 = \{a_1, a_2\}$, $X_2 = \{a_5, a_6\}$, $X_3 = \{a_1, a_3, a_6\}$ และ $X_4 = \{a_2, a_4, a_5\}$ และความน่าจะเป็นแต่ละพจน์สามารถคำนวณโดยอาศัยข้อมูลของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ยกตัวอย่างเช่น หากค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมต่างๆ ในตัวอย่างที่ 1 สามารถทำงานได้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความน่าจะเป็นของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้
a_1	0.8
a_2	0.8
a_3	0.9
a_4	0.9
a_5	0.8
a_6	0.8

และสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของแต่ละพจน์ในสมการที่ (2.5) ได้ดังนี้

$$\Pr(X_1) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) = 0.8 \times 0.8 = 0.64$$

$$\Pr(X_2) = \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) = 0.8 \times 0.8 = 0.64$$

$$\Pr(X_3) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) = 0.8 \times 0.9 \times 0.8 = 0.576$$

$$\Pr(X_4) = \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) = 0.8 \times 0.9 \times 0.8 = 0.576$$

$$\begin{aligned} \Pr(X_1 \cap X_2) &= \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) \\ &= 0.8 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.8 = 0.4096 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr(X_1 \cap X_3) &= \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) \\ &= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 = 0.4608 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr(X_1 \cap X_4) &= \Pr(1,1,0,1,1,0) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \\ &= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 = 0.4608 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr(X_2 \cap X_3) &= \Pr(1,0,1,0,1,1) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) \\ &= 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.4608 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pr(X_2 \cap X_4) &= \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1) \\ &= 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.4608 \end{aligned}$$

$$\Pr(X_3 \cap X_4) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.331776$$

$$\Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_3) = \Pr(1,1,1,0,1,1)$$

$$= \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.36864$$

$$\Pr(X_1 \cap X_3 \cap X_4) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.36864$$

$$\Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_4) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.331776$$

$$\Pr(X_2 \cap X_3 \cap X_4) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.331776$$

$$\Pr(X_1 \cap X_2 \cap X_3 \cap X_4) = \Pr(x_1 = 1) \times \Pr(x_2 = 1) \times \Pr(x_3 = 1) \times \Pr(x_4 = 1) \times \Pr(x_5 = 1) \times \Pr(x_6 = 1)$$

$$= 0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.8 = 0.331776$$

นำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละพจน์ที่คำนวณได้แทนกลับไปในสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} R &= 0.64 + 0.64 + 0.576 + 0.576 - 0.4096 - 0.4608 - 0.4608 - 0.4608 - 0.4608 - 0.331776 \\ &\quad + 0.36864 + 0.331776 + 0.36864 + 0.331776 - 0.331776 . \\ &= 0.91648 \end{aligned}$$

ฉะนั้นค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เมื่อค่าความน่าจะเป็นของทางเชื่อมต่างๆ ในระบบโครงข่ายมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1 คือ 0.91648

จากสมการที่ 2.4 พบว่าจำนวนพจน์ในการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายจะมีจำนวนพจน์เป็น $2^n - 1$ พจน์ นั้นแปลว่าหากมีจำนวนมินิมัลพาทเพิ่มขึ้น 1 ตัว จะมีจำนวนพจน์ที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า เช่น ในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่มีมินิมัลพาทจำนวน 4 มินิมัลพาท จะมีจำนวนพจน์ในการคำนวณความน่าจะเป็นจำนวน 15 พจน์ แต่ถ้าเพิ่มมินิมัลพาท อีก 1 มินิมัลพาท จะทำให้พจน์ในการคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบเพิ่มเป็น 31 พจน์ ซึ่งเป็นการเพิ่มแบบเอ็กโปเนนเชียล ดังนั้นเมื่อจำนวนมินิมัลพาทในระบบมีจำนวนมากขึ้น จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานและมีความยากในการหาความน่าจะเป็น

เป็นแต่ละพจน์ด้วย วิธีการลดทอนพจน์ในการคำนวณวิธีหนึ่งคือวิธี Sum of Disjoint Product ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

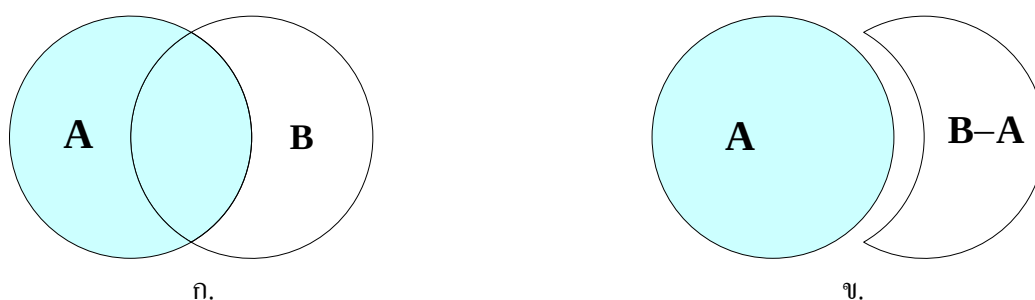
2.1.1.2 การใช้ Sum of Disjoint Products

จากสมการที่ 2.4 และตัวอย่างในการคำนวณซึ่งเป็นการกระจายความน่าจะเป็นโดยใช้ Inclusive-Exclusive Principle นั้นพบว่าวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีค่อนข้างยาก เนื่องจากจำนวนของพจน์ความน่าจะเป็นย่อยจะแปรเปลี่ยนไปตามจำนวนของมินิมัลพาทที่มีอยู่ในระบบโครงข่าย อีกทั้งการนำไปคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ก็ทำได้ยาก

Abraham (1979) เสนอให้กระจายสมการที่ (2.2) โดยให้อยู่ในรูปของ Sum of Disjoint Products และมีนักวิจัยอีกมากมายนำวิธีดังกล่าวมาพัฒนาต่ออาทิเช่น Locks (1982) ได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่า ALR (Abraham-Locks-Revised), Wilson (1990) นำวิธี ALR มาพัฒนาต่อเป็น ALW (Abraham-Locks-Wilson) โดยแต่ละวิธีที่การที่พัฒนานั้น เป็นการจัดและรวมพจน์ใหม่เพื่อให้ได้จำนวนพจน์ของ Sum of Disjoint Products น้อยที่สุดแต่อย่างไรก็ตาม วิธีทั้งหมดล้วนแล้วแต่มีพื้นฐานมาจากวิธีของ Abraham ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Disjoint Products คือการแตกพจน์ของเซตให้อยู่ในเทอมที่ไม่มีการซ้อนทับกัน เช่น หากมีเซตดังแสดงในรูปที่ 2.4ก และต้องการหาค่าของ $P(A \cup B)$ ค่าจะไม่เท่ากับ $P(A) + P(B)$ แต่จะมีค่าเป็น $Pr(A) + Pr(B - A)$ ตามรูปที่ 2.4ข ซึ่งจะเรียกผลรวมดังกล่าวว่า Sum of Disjoint Product และจากพีชคณิตของเซตจะสามารถจัดรูปเป็น

$$\begin{aligned} Pr(A \cup B) &= Pr(A) + Pr(B - A) \\ &= Pr(A) + Pr(B \cap A') = Pr(A) + Pr(A' \cap B) \end{aligned} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.7 Disjoint Product

ดังนั้นเมื่อนำผลของสมการที่ (2.6) มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (2.2) จะสามารถกระจายความน่าเชื่อถือในรูปของ Sum of Disjoint Products ได้เป็น ดังสมการที่ (2.7)

$$R = \Pr(X_1) + \Pr(X_1') \cap \Pr(X_2) + \Pr(X_1') \cap \Pr(X_2') \cap \Pr(X_3) + \Pr(X_1') \cap \Pr(X_2') \cap \Pr(X_3') \cap \Pr(X_4) . \quad (2.7)$$

จากนั้นทำการแปลงสมการ (2.7) ให้อยู่ในรูปของ Boolean เพื่อใช้กฎของ Boolean ในการคำนวณ โดยกำหนดให้สัญลักษณ์มีดังนี้

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ของ Boolean

Set	Boolean
$\cup$	+
$\cap$	$\times$
$\Pr(X_i)$	X_i
$\Pr(X_i')$	$\bar{X}_i$
$\Pr(x_{ij} = 1)$	x_j
$\Pr(x_{ij} = 0)$	$\bar{x}_j$

เมื่อเขียนสมการ (2.7) ใหม่ในรูปของ Boolean จะได้สมการเป็น

$$R = X_1 + \bar{X}_1 X_2 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 + \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 X_4 \quad (2.8)$$

โดย $\Pr(X_i')$ หรือ $\bar{X}_i$ คือความน่าจะเป็นที่ไม่สามารถใช้งานมินิมัลพาท X_i ได้ ซึ่งสามารถคำนวณจากความน่าจะเป็นที่มีทางเชื่อมใดทางเชื่อมหนึ่งในมินิมัลพาท X_i ไม่สามารถทำงานได้ และเมื่อใช้หลักการของ Sum of Disjoint Products จะได้ความน่าจะเป็นที่มีมินิมัลพาท X_i ไม่สามารถใช้งานได้ เป็นดังสมการที่ (2.9)

$$\Pr(X_i') = \bar{X}_i = x_r + \bar{x}_r x_s + \bar{x}_r \bar{x}_s x_t + \bar{x}_r \bar{x}_s \bar{x}_t x_u + \dots \quad (2.9)$$

โดยที่ $x_r, x_s, x_t, x_u, \dots$ แทนทางเชื่อมในมินิมัลพาท X_i ที่มีสถานะเป็น 1

นำกฎในสมการที่ (2.9) มาทำการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของแต่ละพจน์ในสมการที่ (2.8) ได้ผลลัพธ์คือ

$$\begin{aligned} X_1 &= x_1 x_2 \\ \bar{X}_1 X_2 &= (\bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_2) x_5 x_6 = \bar{x}_1 x_5 x_6 + x_1 \bar{x}_2 x_5 x_6 \\ \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 &= (\bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_2)(\bar{x}_5 + x_5 \bar{x}_6) x_1 x_3 x_6 = x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_5 x_6 \\ \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 X_4 &= (\bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_2)(\bar{x}_5 + x_5 \bar{x}_6)(\bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_3 + x_1 x_3 \bar{x}_6) x_2 x_4 x_5 = \bar{x}_1 x_2 x_4 x_5 \bar{x}_6 \end{aligned}$$

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (2.8) จะได้ว่า

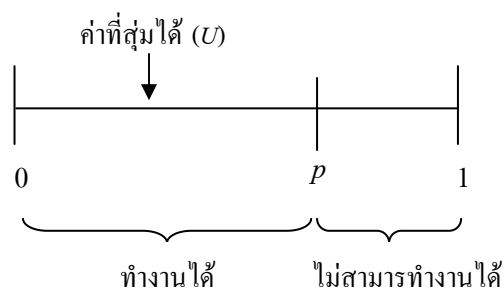
$$\begin{aligned} R &= x_1 x_2 + \bar{x}_1 x_5 x_6 + x_1 \bar{x}_2 x_5 x_6 + x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_5 x_6 + \bar{x}_1 x_2 x_4 x_5 \bar{x}_6 \\ &= 0.8 \times 0.8 + 0.2 \times 0.8 \times 0.8 + 0.8 \times 0.2 \times 0.8 \times 0.8 + 0.8 \times 0.2 \times 0.9 \times 0.2 \times 0.8 \\ &\quad + 0.2 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.2 = 0.91648. \end{aligned}$$

จากวิธีการของ Sum of Disjoint Products แสดงให้เห็นว่า จำนวนพจน์ในการคำนวณจะน้อยกว่าการใช้ Inclusion-Exclusion Principle แต่อย่างไรก็ตามเมื่อระบบโครงข่ายมีจำนวนมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากตามด้วย จึงมีผู้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความน่าจะเป็นของระบบโครงข่ายโดยการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) ซึ่งจะช่วยลดเวลาและความยุ่งยากเมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.1.2 การประเมินโดยการจำลองเหตุการณ์

วิธีการจำลองเหตุการณ์ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) ซึ่งอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสุ่มผ่านแบบจำลองที่จำลองพฤติกรรมของระบบจริง โดยการสุ่มนั้นจะถูกกระทำซ้ำหลายๆ ครั้งจนกว่าค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจเข้าสู่ค่าหนึ่ง วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมายเช่น การศึกษาความไว (Sensitivity) ของระบบความปลอดภัยของระบบนิวเคลียร์ (Marseguerra, et al., 2005) การวิเคราะห์โครงสร้าง (Papadrakakis และ Lagaros, 2002) การวิเคราะห์ความร้อนของการแผ่รังสี (Zhao, et al., 2006) และการประเมินสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง (Billinton และ Tang, 2004; Zhaohong และ Xifan, 2002) เป็นต้น

การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ในการสุ่มสถานะของทางเชื่อมผ่านการสุ่มตัวเลขหนึ่งตัวในช่วง $[0,1]$ โดยอาศัยการกระจายแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) แล้วนำตัวเลขที่ได้ไปเทียบกับความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมนั้นจะสามารถทำงานได้ ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ p แสดงว่าทางเชื่อมสามารถทำงานได้ แต่ในทางกลับกันถ้าค่าที่สุ่มได้มากกว่าค่า p แสดงว่าทางเชื่อมนั้นไม่สามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

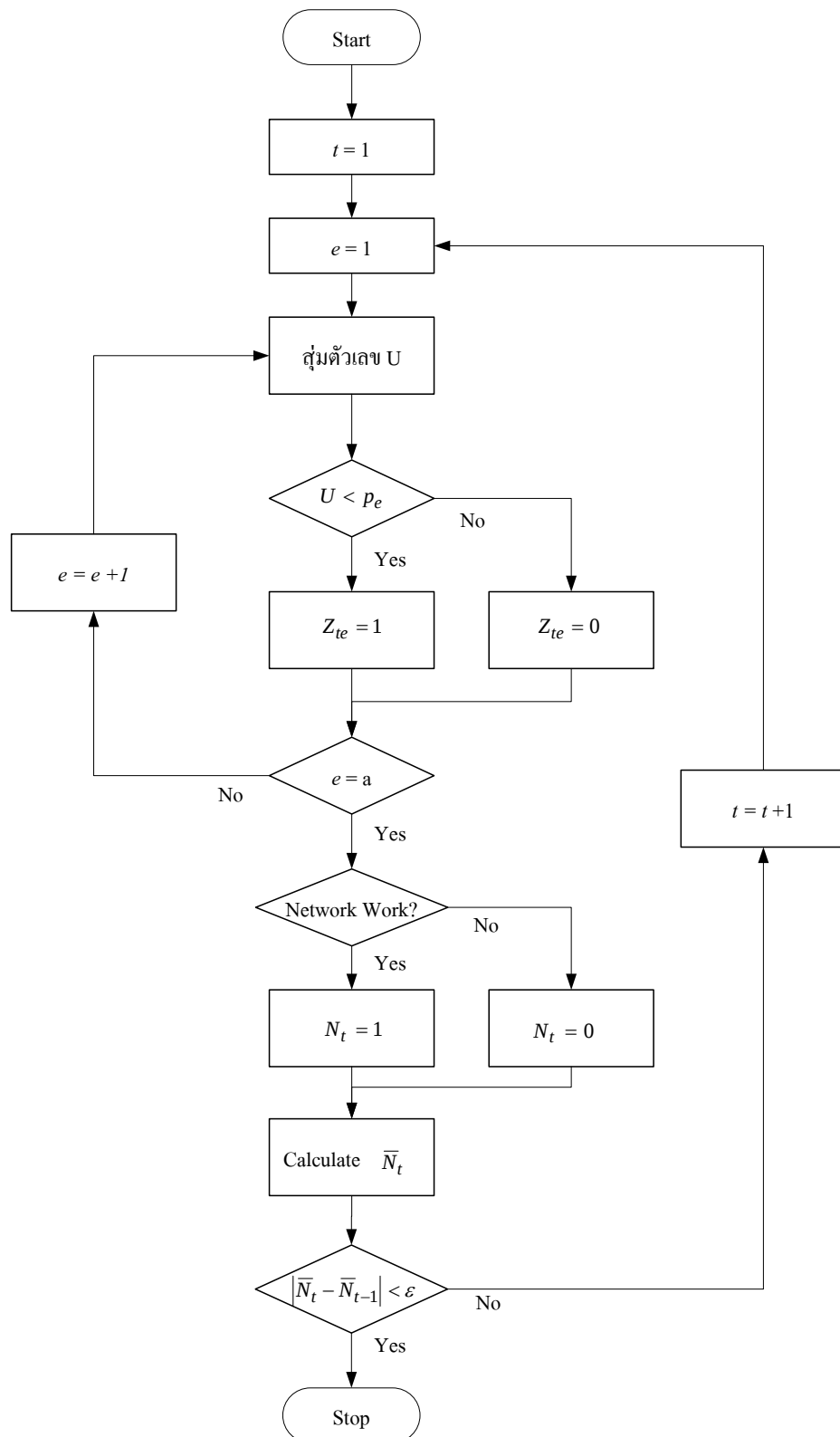


รูปที่ 2.8 วิธีการสุ่มสถานะการทำงานของแต่ละทางเชื่อม

หลังจากนั้น ทำการประเมินระบบโดยรวมโดยพิจารณาจากผลของสถานะของทางเชื่อมที่เกิดขึ้นจากการสุ่มทั้งหมด เพื่อตัดสินใจว่าระบบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขหรือไม่ หากระบบโครงข่ายสามารถเชื่อม S ไปยัง T ได้จะให้ค่าของเหตุการณ์เป็น 1 และ หากไม่สามารถเชื่อมโยงได้เป็น 0 ทำการบันทึกค่าเก็บไว้ ทำซ้ำหลายๆ ครั้งและบันทึกจำนวนเหตุการณ์ที่ระบบสามารถทำงานได้เปรียบเทียบกับจำนวนเหตุการณ์ทั้งหมดที่ทำการสุ่มเพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบ และเนื่องจากวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลไม่มีการกำหนดแน่ชัดว่าจำนวนการสุ่มเหตุการณ์ทั้งหมดควรเป็นเท่าไร แต่มีการถือปฏิบัติโดยทั่วไปว่าจำนวนของเหตุการณ์ที่สุ่มต้องเพียงพอที่จะสังเกตว่าผลที่ได้เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง ดังนั้นในการจำลองเหตุการณ์ในงานวิจัยนี้จะทำการสุ่มซ้ำจนกระทั่งค่าความน่าเชื่อถือของระบบเข้าสู่ค่าค่าหนึ่ง ซึ่งขั้นตอนในการประเมินโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์ด้วยวิธีมอนติคาร์โลสามารถสรุปได้ดังนี้:

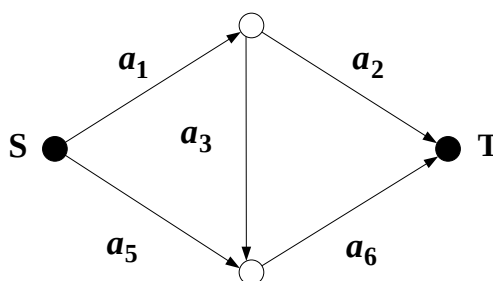
- ขั้นตอนที่ 1 กำหนด $t=1$ โดยที่ t คือครั้งที่ในการสุ่ม กำหนด NS ซึ่งแทนจำนวนครั้งในการหยุดและกำหนดค่า ε ซึ่งเป็นค่า Tolerance
- ขั้นตอนที่ 2 สุ่มตัวเลข U จากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0,1]$ สำหรับแต่ละทางเชื่อมในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 3 เปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มได้ของแต่ละทางเชื่อมกับความน่าจะเป็น p ที่แต่ละทางเชื่อมจะสามารถทำงานได้
 ถ้า $U \leq p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 1 ($z_{te} = 1$)
 ถ้า $U > p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 0 ($z_{te} = 0$)
 เมื่อทำการสุ่มสถานะจนครบทุกทางเชื่อมจะได้เวกเตอร์สถานะของเหตุการณ์ครั้งที่ t เป็น $Z_t = (z_{t1}, z_{t2}, \dots, z_{te}, \dots, z_{ta})$
 โดยที่ $a =$ จำนวนทางเชื่อมทั้งหมดในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาระบบโดยรวมว่า ด้วยสถานะของเวกเตอร์ทางเชื่อม Z_t ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นั้นระบบสามารถทำงานได้หรือไม่
 ถ้าระบบสามารถทำงานได้ให้สถานะของระบบ $N(Z_t) = 1$
 ถ้าระบบไม่สามารถทำงานได้ให้สถานะของระบบ $N(Z_t) = 0$
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายโดยการเปรียบเทียบจำนวนเหตุการณ์ที่ระบบสามารถทำงานได้กับจำนวนครั้งทั้งหมดในการสุ่มซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น
- $$\bar{N}_t = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t N(Z_i) \quad (2.10)$$
- โดยที่ $m =$ จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทำการสุ่มเหตุการณ์
- ขั้นตอนที่ 6 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-4 จนกว่า $t > NS$ หรือ $|\bar{N}_t - \bar{N}_{t-1}| < \varepsilon$ จึงหยุด

โดยขั้นตอนในการจำลองเหตุการณ์สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.9

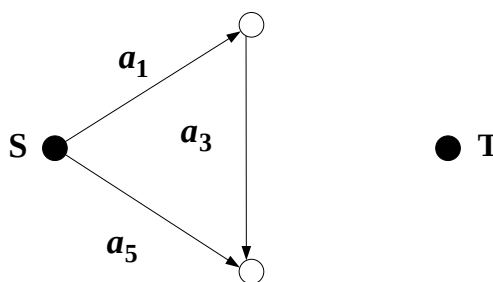


รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์เพื่อประเมินค่าความน่าจะเป็นแบบมอนติคาร์โล

ตัวอย่างการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายด้วยวิธีการข้างต้น โดยอาศัยระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ในรูปที่ 2.3 เมื่อทำการสุ่มค่าตัวเลข 6 ค่าสำหรับทางเชื่อมทั้ง 1-6 สมมติว่าได้เป็น 0.21, 0.35, 0.76, 0.95, 0.67 และ 0.02 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นในการที่ทางเชื่อมแต่ละทางเชื่อมจะทำงานได้จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าไม่มีทางเชื่อมที่ 4 เพียงทางเชื่อมเดียวที่ไม่สามารถใช้งานได้ในการสุ่มครั้งแรก จึงได้เวกเตอร์สถานะสำหรับการสุ่มครั้งที่ 1 ($t = 1$) เป็น $Z_1 = (1, 1, 1, 0, 1, 1)$ เมื่อนำมาพิจารณาแล้วพบว่า ระบบโครงข่ายดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงจุด S และ T ได้ดังรูปที่ 2.10 ดังนั้นจะได้ค่า $N(Z_1) = 1$ และเมื่อทำการสุ่มในครั้งที่ 2 ($t = 2$) ซึ่งสมมติให้ $Z_2 = (1, 0, 1, 0, 1, 0)$ จะพบว่าในการสุ่มครั้งนี้ ระบบไม่สามารถเชื่อมโยงจุด S และ T ได้ดังรูปที่ 2.11 ดังนั้นจะได้ค่า $N(Z_2) = 0$ ทำการสุ่มไปเรื่อยๆ และบันทึกผล ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างผลของการสุ่มเหตุการณ์



รูปที่ 2.10 สถานะของโครงข่ายตัวอย่างจากการสุ่มครั้งที่ 1

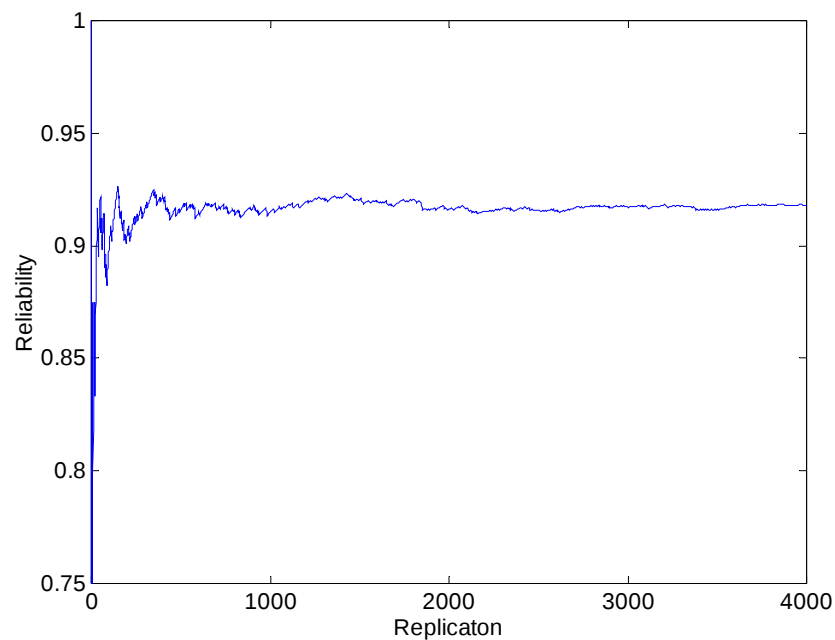


รูปที่ 2.11 สถานะของโครงข่ายตัวอย่างจากการสุ่มครั้งที่ 2

เมื่อนำผลจากตารางที่ได้มาคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตามสมการที่ (2.10) จะได้ผลของค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจากกราฟพบว่า ค่าความน่าเชื่อถือจะเริ่มเข้าสู่ค่าหนึ่งเมื่อผ่านการสุ่มเหตุการณ์ประมาณ 3,000-4,000 ครั้ง โดยสามารถอ่านค่าเฉลี่ยจากกราฟในช่วงนี้ได้ประมาณ 0.9132 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์กับค่าความน่าเชื่อถือที่คำนวณได้จากวิธีคำนวณโดยตรงแล้ว ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างผลการจำลองเหตุการณ์ของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

ครั้งที่ในการสุ่ม (t)	เวกเตอร์สถานะ	สถานะของระบบโครงข่าย	$N(Z_t)$
1	(1,1,1,0,1,1)	ทำงานได้	1
2	(1,0,1,0,1,0)	ไม่สามารถทำงานได้	0
3	(1,0,0,0,0,1)	ไม่สามารถทำงานได้	0
4	(0,0,0,0,1,1)	ทำงานได้	1
5	(1,0,1,0,0,1)	ทำงานได้	1
6	(0,1,1,0,1,1)	ทำงานได้	1
7	(0,1,1,1,0,1)	ไม่สามารถทำงานได้	0
8	(0,1,1,1,1,0)	ทำงานได้	1
...		...	...
...		...	...
3999	(1,1,0,1,0,1)	ทำงานได้	1
4000	(1,0,0,1,1,1)	ทำงานได้	1



รูปที่ 2.12 ผลของค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 จากการประมาณค่าด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

จากการศึกษาวิธีในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายทั้ง 2 วิธีได้แก่การคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้น พบว่าจำเป็นจะต้องทราบค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมต่างๆ ในระบบโครงข่ายจะสามารถใช้งานได้ก่อน ซึ่งวิธีในการประเมินหาความน่าจะเป็นนี้จะแตกต่างกันไปตามโครงข่ายที่นำไปประยุกต์ใช้ เช่น ทางเชื่อมในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังจะแทนสายส่งแต่ละเส้นและจะใช้อัตราส่วนของเวลาที่สายส่งสามารถใช้งานได้เทียบกับเวลาทั้งหมด เป็นค่าความน่าเชื่อถือของสายส่งเส้นนั้นๆ เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้ ทางเชื่อมจะใช้แทนรูปแบบในการขนส่ง (Modes) หรืออาจหมายถึงผู้ขนส่ง (Transportation Service Providers) แต่ละรายที่แตกต่างกัน (ดังจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4) โดยความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถใช้งานได้นั้น จะหมายถึงความน่าจะเป็นที่ผู้ขนส่งสินค้าจะรับขนส่งสินค้าในเส้นทางนั้นๆ ซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจรับหรือไม่รับขนส่งสินค้า จึงทำให้ประเมินได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการประเมินหาความน่าจะเป็นที่ผู้ขนส่งสินค้าจะตกลงรับขนส่งสินค้า โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคที่เรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก ในการประเมินความน่าจะเป็นนี้ ดังมีรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2 การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis)

ในปัจจุบันการพยากรณ์ได้เข้ามามีบทบาทในการวิจัยสาขาต่างๆ โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งในการพยากรณ์คือ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งคือตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ซึ่งอาจเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variables) หรือตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variables) ก็ได้ และอีกกลุ่มหนึ่งคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ซึ่งต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น แต่ปัญหาที่พบในความเป็นจริงนั้นมีหลายปัญหาที่ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (ราตรี จรัสมาธูสร, 2547) เช่น ปัญหาทางการแพทย์ ปัญหาทางสังคมศาสตร์ และปัญหาทางเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ มักมีตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพที่มีค่าที่เป็นไปได้เพียง 2 ค่า (Dichotomous Dependent Variables) เช่น การเกิดโรค (เกิด-ไม่เกิด) ผลการสอบเข้ามหาวิทยาลัย (ได้-ไม่ได้) การตัดสินใจ (เลือก-ไม่เลือก) เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากตัวแปรตามมีค่าเป็นไปได้เพียง 2 ค่า ทำให้ข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติตรงตามข้อสมมติพื้นฐานทั่วไปของสมการถดถอยเชิงเส้น และทำให้ความคลาดเคลื่อนที่ได้ไม่มีการแจกแจงแบบปกติด้วย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์อื่นแทน โดยวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis)

การวิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยโลจิสติกมีความสำคัญมากขึ้นในวงการต่างๆ ในปัจจุบัน เช่น ในวงการธุรกิจซึ่งมักไม่เปิดเผยรายละเอียดของข้อมูลและมักให้ข้อมูลเพียงตอบว่าใช่หรือไม่ใช่ หากทำการออกแบบสอบถามเพื่อไม่เป็นการรบกวนและง่ายต่อผู้ให้คำตอบ โดยให้ตอบเพียงว่า ใช่หรือไม่ใช่จะทำให้ได้ข้อมูลเชิงคุณภาพประเภท 2 ค่าที่สอดคล้องกับปัญหาที่สนใจศึกษา

ในการวิเคราะห์การถดถอยเมื่อตัวแปรตาม Y มีการแจกแจงแบบ Bernoulli; $Y \sim b(1, \pi(\underline{x}))$ โดย $\underline{x}$ คือกลุ่มของตัวแปรอิสระ $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ซึ่ง Y มีค่าเป็นไปได้อีกคือ 1 แทน “ใช่หรือสิ่งที่สนใจ” หรือ 0 แทน “ไม่ใช่หรือสิ่งที่ไม่สนใจ” ดังแสดงในสมการ คือ

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{ด้วยความน่าจะเป็น } \pi(\underline{x}) \\ 0 & \text{ด้วยความน่าจะเป็น } 1 - \pi(\underline{x}) \end{cases} \quad (2.11)$$

หากใช้ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้นในการพยากรณ์ค่าของ Y จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\underline{x}$ และ Y เป็น

$$Y = E(Y | \underline{x}) = \pi(\underline{x}) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (2.12)$$

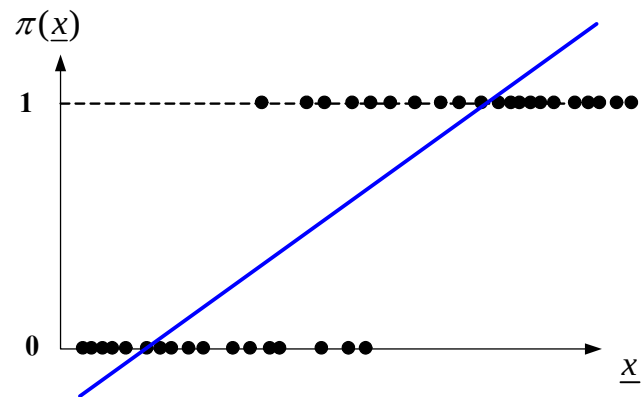
โดยที่ $E(Y | \underline{x})$ แทนค่าพยากรณ์ของ Y เมื่อกำหนดตัวแปรอิสระ $\underline{x}$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็น $\pi(\underline{x})$ เมื่อกำหนดตัวแปรอิสระ $\underline{x}$

$x_1, x_2, \dots, x_m$ เป็นตัวแปรอิสระที่ $1, 2, \dots, m$

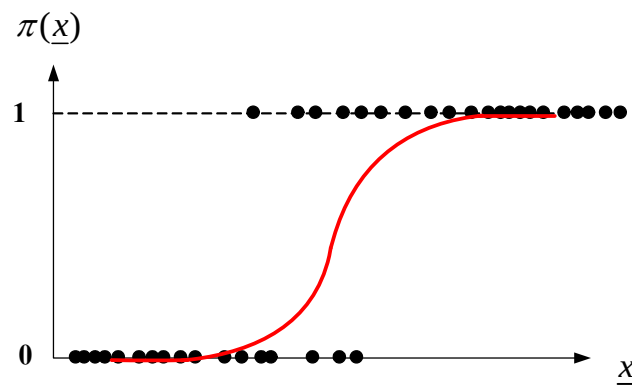
$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ เป็นสัมประสิทธิ์การถดถอย

ข้อด้อยประการหนึ่งของตัวแบบเชิงเส้นคือไม่อาจรับประกันได้ว่าค่าของ $E(Y | \underline{x})$ (ซึ่งเป็นค่าพยากรณ์ของ Y และเป็นค่าความน่าจะเป็นเมื่อกำหนดตัวแปรอิสระ $\underline{x}$) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 เพราะโดยปกติจะไม่มีข้อจำกัดของค่าพารามิเตอร์ $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ และไม่มีข้อจำกัดขอบเขตค่าของตัวแปรอิสระ $x_1, x_2, \dots, x_m$ ดังนั้นโดยทั่วไป $E(Y | \underline{x})$ สามารถเป็นจำนวนจริงใดๆ ก็ได้ไม่จำเป็นต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.13

จากเหตุผลดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ตัวแบบเชิงเส้นในการพยากรณ์ค่าของ Y และจากการที่ค่าพยากรณ์เป็นค่าความน่าจะเป็นซึ่งต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function) ของความน่าจะเป็นแทนเพราะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมที่นิยมใช้กันมากฟังก์ชันหนึ่งคือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงโลจิสติก (Logistic Distribution) เพราะมักจะพบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง $\pi(\underline{x})$ และ $\underline{x}$ มีรูปร่างเป็นเส้นโค้งรูปตัว S (Sigmoidal Curve) หรือ S-Curve ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 การประมาณค่าข้อมูล Dichotomous Dependent Variables ด้วยการถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 2.14 การประมาณค่าข้อมูล Dichotomous Dependent Variables ด้วยเส้นโค้ง S

โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงโลจิสติก มีรูปแบบดังนี้

$$\pi(\underline{x}) = E(Y|\underline{x}) = \frac{1}{1 + \exp(-h(\underline{x}))} = \frac{\exp(h(\underline{x}))}{1 + \exp(h(\underline{x}))} \quad (2.13)$$

โดยที่ $h(\underline{x})$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของ $x_1, x_2, \dots, x_m$ นั่นคือ

$$h(\underline{x}) = \underline{x}'\underline{\beta} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (2.14)$$

โดยที่ $\underline{x}'$ แทนเวกเตอร์ของตัวแปรอิสระ $(x_1, x_2, \dots, x_m)$

$\underline{\beta}$ แทนเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)'$
 เพราะฉะนั้นเราได้ตัวแบบการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Model) คือ

$$\begin{aligned}\pi(\underline{x}) &= \frac{\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1 + \exp(\underline{x}'\underline{\beta})} \\ &= \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m)}\end{aligned}\quad (2.15)$$

และเนื่องจาก $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ซึ่งจะหาค่าประมาณของ $\pi(\underline{x})$ คือ

$$\hat{\pi}(\underline{x}) = \frac{\exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_m x_m)}{1 + \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_m x_m)} \quad (2.16)$$

โดยที่ $\hat{\pi}(\underline{x})$ แทนค่าประมาณของ $\pi(\underline{x})$

ในการวิเคราะห์การถดถอยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 วัตถุประสงค์ คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 กลุ่ม ได้แก่ ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม และการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามที่น่าสนใจ นอกจากนี้วัตถุประสงค์หลักนี้มักจะมีการศึกษาถึงผลกระทบเพิ่มเติมด้วย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกมักใช้อัตราส่วนแอดด์ (Odd Ratio: OR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่น่าสนใจ ($\pi(\underline{x})$) กับความน่าจะเป็นที่จะไม่เกิดเหตุการณ์ที่น่าสนใจ $1 - \pi(\underline{x})$ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$OR = \frac{\pi(\underline{x})}{1 - \pi(\underline{x})}. \quad (2.17)$$

ดังนั้น ถ้า $OR = 3$ จะมีความหมายว่า เหตุการณ์ที่น่าสนใจมีความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้น 3 เท่าของความน่าจะเป็นในการไม่เกิดเหตุการณ์ที่น่าสนใจ หรือหมายความว่า อัตราส่วนระหว่างความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจกับการไม่เกิดเหตุการณ์ที่สนใจมีค่าเป็น 3:1

จากอัตราส่วนความน่าจะเป็นในสมการที่ (2.16) เมื่อทำการจัดรูปโดยลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm: $\ln$) และแทนค่า $\pi(\underline{x}) = \frac{\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1 + \exp(\underline{x}'\underline{\beta})}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \ln(OR) &= \ln\left(\frac{\pi(\underline{x})}{1-\pi(\underline{x})}\right) \\
 &= \ln\left(\frac{\frac{\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1+\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}}{1-\frac{\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1+\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}}\right) \\
 &= \ln\left(\frac{\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1+\exp(\underline{x}'\underline{\beta})} \times \frac{1+\exp(\underline{x}'\underline{\beta})}{1}\right) \\
 &= \ln(\exp(\underline{x}'\underline{\beta})) \\
 &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

โดยจะเรียกสมการที่ (2.18) ว่า “Log Odds Ratio” ซึ่งถือเป็นตัวแบบโลจิสติกอีกรูปแบบหนึ่ง เรียกว่า รูปแบบโลจิต (Logit Form) และมีความหมายว่าถ้าเพิ่มค่าของตัวแปรอิสระใดๆ x_i ขึ้น 1 หน่วย ขณะที่ค่า x_i อื่นๆ คงที่ จะได้ค่า $\ln(OR)$ เพิ่มขึ้น β_i เมื่อ $\beta_i > 0$ หรือลดลง β_i เมื่อ $\beta_i < 0$ แสดงว่า OR จะเปลี่ยนแปลงไป e^{β_i} เมื่อค่า x_i เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยขณะที่ค่า x_i อื่นๆ คงที่

ในการแปลความหมายของสัมประสิทธิ์การถดถอยของการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก จะมีความแตกต่างกับการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นกล่าวคือ ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นนั้น จะแปลความหมายของสัมประสิทธิ์การถดถอย β_i ได้ว่า เป็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามเมื่อตัวแปรอิสระ x_i เปลี่ยนไป 1 หน่วย แต่การแปลความหมายของสัมประสิทธิ์การถดถอยในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกจะแปลความหมายว่าเป็นขนาดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามในรูปอัตราส่วนเดิมต่อเมื่อตัวแปรอิสระ x_i เปลี่ยนไป 1 หน่วย

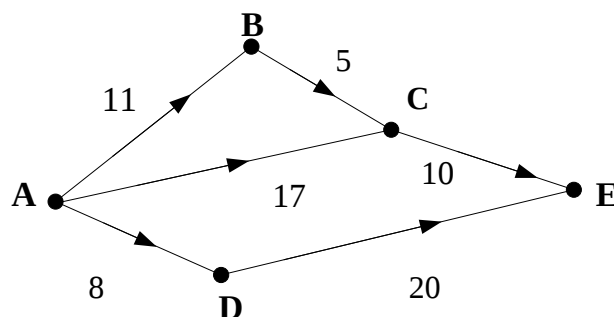
2.3 การหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุด

ในการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนหรือระยะทางต่ำที่สุดนี้ จะใช้ Dijkstra's Algorithm ในการค้นหา เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและใช้กันโดยทั่วไป โดยมีหลักการคือทำการเลือกทางเชื่อม (Edge) ที่ทำให้ต้นทุนระยะทางหรือเวลาตั้งแต่จุดเริ่ม S ต้นจนถึงจุดปลายทางเชื่อมนั้นๆ มีค่าต่ำที่สุดเข้ามาเชื่อมต่อกับทางเชื่อมเดิม จนกว่าจะถึงจุดปลายทาง T ที่กำหนดไว้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ U เป็นเอกภพสัมพัทธ์แทนเซตของโหนดทั้งหมดในระบบโครงข่าย
ให้ W เป็นเซตของจุดเริ่มต้น W' เป็นเซตของจุดที่ไม่ได้อยู่ใน W และ ρ เป็นเวกเตอร์
แสดงค่าใช้จ่ายหรือระยะทางตั้งแต่จุดเริ่ม S ไปยังจุดในเซต W'

- ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาค่า ρ ที่น้อยที่สุดว่ามาจากจุดใดในเซต W' แล้วทำการย้ายจุดนั้นออกจาก เซต W' มาใส่ในเซต W แทน
- ขั้นตอนที่ 3 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ไปจนกว่าจะพบจุดปลาย T
- ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาว่า ρ ที่น้อยที่สุดมาจากผลบวกของทางเชื่อมใดบ้าง ทางเชื่อมเหล่านี้เป็นทางเชื่อมที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด

พิจารณาตัวอย่างระบบโครงข่ายตัวอย่างดังรูปที่ 2.15 โดยกำหนดให้ตัวเลขต่างๆ แสดงต้นทุนสำหรับการใช้ทางเชื่อมนั้นๆ



รูปที่ 2.15 ระบบโครงข่ายตัวอย่างในการค้นหาต้นทุนต่ำสุดโดยใช้ Dijkstra's Algorithm

- ขั้นตอนที่ 1 $U = \{A, B, C, D, E\}$
 $W = \{A\}$, $W' = \{B, C, D, E\}$
- ขั้นตอนที่ 2 ทางเชื่อมจาก W ไปยัง W' มีอยู่ 3 ทาง มีต้นทุนคือ $\rho_{AB}=11$, $\rho_{AC}=17$ และ $\rho_{AD}=8$ ดังนั้นย้าย D มาเข้าใน W จะได้ $W = \{A, D\}$, $W' = \{B, C, E\}$
- ขั้นตอนที่ 2 ทางเชื่อมจาก W ไปยัง W' มีอยู่ 3 ทาง มีต้นทุนคือ $\rho_{AB}=11$, $\rho_{AC}=17$ และ $\rho_{ADE} = 28$ ดังนั้นย้าย B มาเข้าใน W จะได้ $W = \{A, D, B\}$, $W' = \{C, E\}$
- ขั้นตอนที่ 2 ทางเชื่อมจาก W ไปยัง W' มีอยู่ 3 ทาง มีต้นทุนคือ $\rho_{AC}=17$, $\rho_{ABC}=16$ และ $\rho_{ADE} = 28$ ดังนั้นย้าย C มาเข้าใน W จะได้ $W = \{A, D, B, C\}$, $W' = \{E\}$
- ขั้นตอนที่ 2 ทางเชื่อมจาก W ไปยัง W' มีอยู่ 2 ทาง มีต้นทุนคือ $\rho_{ABCE}=26$ และ $\rho_{ADE} = 28$ ดังนั้นย้าย E มาเข้าใน W จะได้ $W = \{A, D, B, C, E\}$, $W' = \emptyset$
- พิจารณาค่า ρ พบว่า ρ_{ABCE} มีค่าต่ำที่สุดคือ 26 ดังนั้นจะได้ว่า เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดได้แก่เส้นทางที่ผ่านโนด $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$ ตามลำดับ

2.4 สรุป

ในการประเมินสมรรถนะของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน เริ่มจากการประเมินค่าความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งในการประเมินความน่าเชื่อถือนี้สามารถแบ่งเป็น 2 วิธีคือ วิธีการคำนวณโดยตรง และวิธีจำลองเหตุการณ์ โดยวิธีการคำนวณโดยตรงใช้หลักการของมินิมัลพาทรวมกับ Sum of Disjoint Product ซึ่งวิธีนี้ให้ค่าที่ถูกต้องแต่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณ ส่วนวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล เป็นการประมาณค่าความน่าเชื่อถือของระบบและใช้การค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดร่วมด้วย ซึ่งวิธีดังกล่าวไม่ยุ่งยากซับซ้อนเท่ากับการคำนวณโดยตรง นอกจากนี้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายจำเป็นต้องทำการประเมินค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมแต่ละทางเชื่อมสามารถทำงานได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การพยากรณ์ค่าผ่านการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก

บทที่ 3

การประเมินต้นทุนเฉลี่ย

ในการประเมินสมรรถนะของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนมักจะวัดผ่านค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่การพิจารณาค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากการใช้ระบบโครงข่ายจะมีต้นทุนเกิดขึ้นด้วย ฉะนั้นระบบโครงข่ายที่มีความน่าเชื่อถือเท่ากันอาจมีต้นทุนในการใช้ระบบที่ต่างกันก็ได้ ซึ่งต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายนี้มาจาก 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นค่าใช้จ่ายในการใช้เส้นทางขนส่งต่างๆ อีกส่วนหนึ่งเป็นผลจากการที่ไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายที่มีทำการขนส่งได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาวิธีการคำนวณต้นทุนที่เกิดจากการใช้ระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนซึ่งเรียกว่า “ต้นทุนเฉลี่ย” (Expected Cost) โดยมีพื้นฐานมาจากการหาค่าคาดหวัง (Expected Value) ซึ่งเกิดจากผลรวมของต้นทุนคูณกับความน่าจะเป็นในแต่ละกรณี ดังนั้นในการประเมินค่าต้นทุนเฉลี่ยนี้จะใช้พื้นฐานของการประเมินหาความน่าเชื่อถือซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 กล่าวคือในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยนี้จะแบ่งเป็น 2 วิธีการ (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.1) ได้แก่ (1) การคำนวณโดยตรงซึ่งจะต้องใช้มีนัลพาทมารวมในการคำนวณ และ (2) คือการจำลองเหตุการณ์โดยใช้หลักการของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลร่วมกับการค้นหาค่าต้นทุนที่ต่ำที่สุดของเหตุการณ์นั้นๆ โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน จึงได้ทำการทดสอบวิธีทั้ง 2 กับระบบโครงข่ายตัวอย่างหลายตัวอย่าง เพื่อทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของทั้ง 2 วิธีการดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.2 นอกจากนี้ได้นำเสนอตัวอย่างการประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยกับตัวอย่างระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนเพื่อใช้ในการประกอบการพิจารณาปรับปรุงระบบโครงข่ายที่ความไม่แน่นอนในหัวข้อ 3.3

3.1 การประเมินต้นทุนเฉลี่ย

ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของต้นทุน (C_i) และความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุนดังกล่าว ($\Pr(C_i)$) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E(\text{Cost}) = \sum_{i=1}^m C_i \Pr(C_i) \quad (3.1)$$

โดยที่ $E(\text{Cost})$	=	ต้นทุนเฉลี่ย
C_i	=	ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ i ใดๆ
$\Pr(C_i)$	=	ความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน C_i

$$m = \text{จำนวนเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในระบบโครงข่าย}$$

จากเงื่อนไขของการเลือกใช้เส้นทางว่าจะทำการเลือกใช้เส้นทาง (หรือมินิมัลพาท) ที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนเสมอ หากไม่สามารถเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดได้จะเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำเป็นลำดับถัดไปแทน ยกตัวอย่างเช่น จากระบบโครงข่ายในรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้แต่ละทางเชื่อมมีค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 3.1 และกำหนดให้ต้นทุนจากการไม่สามารถส่งสินค้าได้มีค่าเท่ากับ 100

ตารางที่ 3.1 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายของตัวอย่างที่ 1

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.8	10
a_2	0.8	25
a_3	0.9	10
a_4	0.9	20
a_5	0.8	30
a_6	0.8	25

ในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยตามสมการที่ (3.1) สามารถทำได้โดยการแจกแจงเหตุการณ์ นั่นคือทำการแจกแจงเหตุการณ์ที่ระบบโครงข่ายเป็นไปได้ทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งมีทั้งสิ้นจำนวน 64 เหตุการณ์ (จากทั้งหมด 6 ทางเชื่อม ทางเชื่อมละ 2 สถานะ เท่ากับ $2^6 = 64$ เหตุการณ์) หลังจากนั้นทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์โดยการนำความน่าจะเป็นของแต่ละทางเชื่อมมาคูณกันได้เป็นความน่าจะเป็นที่ระบบโครงข่ายจะเกิดสถานะดังกล่าวขึ้น และทำการพิจารณาสถานะของระบบโครงข่ายดังกล่าวว่ามีต้นทุนในการขนส่งที่ต่ำที่สุดเป็นเท่าใด ถ้าระบบไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ให้นำต้นทุนจากการไม่สามารถส่งสินค้าได้มาเป็นต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่าย หลังจากนั้นหาผลรวมของความน่าจะเป็นและต้นทุนของเหตุการณ์เหล่านี้ทั้งหมดซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาความน่าจะเป็นและต้นทุนของแต่ละเหตุการณ์

กรณีที่	$Pr(a_1)$	$Pr(a_2)$	$Pr(a_3)$	$Pr(a_4)$	$Pr(a_5)$	$Pr(a_6)$	ความน่าจะเป็น	ต้นทุน
1	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.331776	35
2	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.2	0.082944	35
3	0.8	0.8	0.9	0.9	0.2	0.8	0.082944	35
4	0.8	0.8	0.9	0.9	0.2	0.2	0.020736	35
5	0.8	0.8	0.9	0.1	0.8	0.8	0.036864	35
6	0.8	0.8	0.9	0.1	0.8	0.2	0.009216	35
7	0.8	0.8	0.9	0.1	0.2	0.8	0.009216	35
8	0.8	0.8	0.9	0.1	0.2	0.2	0.002304	35
9	0.8	0.8	0.1	0.9	0.8	0.8	0.036864	35
10	0.8	0.8	0.1	0.9	0.8	0.2	0.009216	35
11	0.8	0.8	0.1	0.9	0.2	0.8	0.009216	35
12	0.8	0.8	0.1	0.9	0.2	0.2	0.002304	35
13	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.8	0.004096	35
14	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8	0.2	0.001024	35
15	0.8	0.8	0.1	0.1	0.2	0.8	0.001024	35
16	0.8	0.8	0.1	0.1	0.2	0.2	0.000256	35
17	0.8	0.2	0.9	0.9	0.8	0.8	0.082944	55
18	0.8	0.2	0.9	0.9	0.8	0.2	0.020736	100
19	0.8	0.2	0.9	0.9	0.2	0.8	0.020736	55
20	0.8	0.2	0.9	0.9	0.2	0.2	0.005184	100
21	0.8	0.2	0.9	0.1	0.8	0.8	0.009216	55
22	0.8	0.2	0.9	0.1	0.8	0.2	0.002304	100
23	0.8	0.2	0.9	0.1	0.2	0.8	0.002304	55
24	0.8	0.2	0.9	0.1	0.2	0.2	0.000576	100
25	0.8	0.2	0.1	0.9	0.8	0.8	0.009216	45
26	0.8	0.2	0.1	0.9	0.8	0.2	0.002304	100
27	0.8	0.2	0.1	0.9	0.2	0.8	0.002304	100
28	0.8	0.2	0.1	0.9	0.2	0.2	0.000576	100
29	0.8	0.2	0.1	0.1	0.8	0.8	0.001024	45
30	0.8	0.2	0.1	0.1	0.8	0.2	0.000256	100
31	0.8	0.2	0.1	0.1	0.2	0.8	0.000256	100
32	0.8	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.000064	100
33	0.2	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.082944	45

ตารางที่ 3.2 การคำนวณหาความน่าจะเป็นและต้นทุนของแต่ละเหตุการณ์ (ต่อ)

กรณีที่	$Pr(a_1)$	$Pr(a_2)$	$Pr(a_3)$	$Pr(a_4)$	$Pr(a_5)$	$Pr(a_6)$	ความน่าจะเป็น	ต้นทุน
34	0.2	0.8	0.9	0.9	0.8	0.2	0.020736	75
35	0.2	0.8	0.9	0.9	0.2	0.8	0.020736	100
36	0.2	0.8	0.9	0.9	0.2	0.2	0.005184	100
37	0.2	0.8	0.9	0.1	0.8	0.8	0.009216	45
38	0.2	0.8	0.9	0.1	0.8	0.2	0.002304	100
39	0.2	0.8	0.9	0.1	0.2	0.8	0.002304	100
40	0.2	0.8	0.9	0.1	0.2	0.2	0.000576	100
41	0.2	0.8	0.1	0.9	0.8	0.8	0.009216	45
42	0.2	0.8	0.1	0.9	0.8	0.2	0.002304	75
43	0.2	0.8	0.1	0.9	0.2	0.8	0.002304	100
44	0.2	0.8	0.1	0.9	0.2	0.2	0.000576	100
45	0.2	0.8	0.1	0.1	0.8	0.8	0.001024	45
46	0.2	0.8	0.1	0.1	0.8	0.2	0.000256	100
47	0.2	0.8	0.1	0.1	0.2	0.8	0.000256	100
48	0.2	0.8	0.1	0.1	0.2	0.2	0.000064	100
49	0.2	0.2	0.9	0.9	0.8	0.8	0.020736	45
50	0.2	0.2	0.9	0.9	0.8	0.2	0.005184	100
51	0.2	0.2	0.9	0.9	0.2	0.8	0.005184	100
52	0.2	0.2	0.9	0.9	0.2	0.2	0.001296	100
53	0.2	0.2	0.9	0.1	0.8	0.8	0.002304	45
54	0.2	0.2	0.9	0.1	0.8	0.2	0.000576	100
55	0.2	0.2	0.9	0.1	0.2	0.8	0.000576	100
56	0.2	0.2	0.9	0.1	0.2	0.2	0.000144	100
57	0.2	0.2	0.1	0.9	0.8	0.8	0.002304	45
58	0.2	0.2	0.1	0.9	0.8	0.2	0.000576	100
59	0.2	0.2	0.1	0.9	0.2	0.8	0.000576	100
60	0.2	0.2	0.1	0.9	0.2	0.2	0.000144	100
61	0.2	0.2	0.1	0.1	0.8	0.8	0.000256	45
62	0.2	0.2	0.1	0.1	0.8	0.2	0.000064	100
63	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.8	0.000064	100
64	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.000016	100

ตารางที่ 3.3 ความน่าจะเป็นและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1

ต้นทุนการใช้เส้นทาง C_i	ความน่าจะเป็น $\Pr(C_i)$	$C_i \times \Pr(C_i)$
35	0.64000	22.40000
55	0.13824	7.60320
45	0.11520	5.18400
75	0.02304	1.72800
100	0.08352	8.35200
Total	1.00000	45.26720

จากตารางที่ 3.3 พบว่าระบบโครงข่ายตัวอย่างนี้มีความน่าเชื่อถือของระบบเท่ากับ 0.91648 (ไม่รวมค่า 0.08352 ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้) และมีต้นทุนเฉลี่ยในการใช้ระบบโครงข่ายเท่ากับ 45.2672

จากตัวอย่างข้างต้นพบว่า การหาค่าความน่าจะเป็น $\Pr(C_i)$ ด้วยวิธีการแจกแจงนั้นมีความยุ่งยาก ยิ่งเมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น จะทำให้มีเหตุการณ์ที่พิจารณามากขึ้นด้วย ดังนั้นในหัวข้อถัดไป จะนำเสนอวิธีในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยอาศัยการประเมินความน่าจะเป็นเป็นพื้นฐานซึ่งมีทั้งแบบการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์ และใช้ผลจากวิธีการแบบแจกแจงนี้สำหรับอ้างอิงในการพัฒนาวิธีดังกล่าว

3.1.1 การประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยวิธีคำนวณโดยตรง

จากการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการแจกแจงเหตุการณ์ พบว่าต้นทุนที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ต้นทุนจากการใช้เส้นทางที่เลือก และต้นทุนอันเกิดจากการที่ไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่าย เช่น ค่าปรับอันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถส่งมอบสินค้าได้ตามเวลา หรือค่าเสียโอกาสในการขายสินค้า จึงกำหนดให้ $C(Y_i)$ แทนต้นทุนที่เกิดจากการใช้เส้นทางมินิมัลพาธ Y_i โดยเรียงลำดับตามต้นทุนที่น้อยสุดไปถึงมากที่สุด ดังนั้นจะได้ว่าต้นทุนมินิมัลพาธ Y_i จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าต้นทุนของมินิมัลพาธ Y_{i-1} หรือ $C(Y_{i-1}) \leq C(Y_i)$ เสมอ และกำหนดให้ $\Pr(C(Y_i))$ แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จากการใช้มินิมัลพาธ Y_i เมื่อไม่สามารถใช้มินิมัลพาธ $Y_1, Y_2, \dots, Y_{i-1}$ ได้ แต่ถ้าหากไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายดังกล่าวในการขนส่ง จะเกิดต้นทุน C_u ขึ้น โดยมีความน่าจะเป็นในการเกิดเท่ากับความน่าจะเป็นที่ไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้ $(1-R)$

ดังนั้น จากสมการต้นทุนเฉลี่ย (3.1) ซึ่งมีเหตุการณ์ทั้งหมดจำนวน m เหตุการณ์ สามารถเขียนสมการต้นทุนเฉลี่ยใหม่จากต้นทุนทั้ง 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกเกิดจากการใช้มินิมัลพาธในระบบโครงข่ายซึ่งมี

จำนวน n มินิมัลพาท และส่วนที่ 2 เกิดจากการไม่สามารถใช้มินิมัลพาทในระบบโครงข่ายได้ อีก 1 พจน์ได้เป็น

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \Pr(C(Y_i)) + C_u(1-R). \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2) ความน่าจะเป็นในการเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จะต้องมีความเท่ากับความน่าจะเป็นที่มินิมัลพาท Y_i สามารถใช้งานได้ ในขณะที่มินิมัลพาทอื่นๆ ที่มีต้นทุนที่ต่ำกว่า $C(Y_i)$ ไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าว สามารถเขียน $\Pr(C(Y_i))$ ได้ใหม่ดังสมการที่ (3.3)

$$\Pr(C(Y_i)) = \Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \Pr(Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})'. \quad (3.3)$$

และจากพีชคณิตของเซตที่ว่า

$$\Pr(A | B') \times \Pr(B') = \frac{\Pr(A \cap B')}{\Pr(B')} \times \Pr(B') \quad (3.4)$$

$$= \Pr(A \cap B') \quad (3.5)$$

$$= \Pr(A) - \Pr(A \cap B). \quad (3.6)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ที่ (3.6) มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (3.3) จะได้ความน่าจะเป็นในการเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ เป็น

$$\Pr(C(Y_i)) = \Pr(Y_i) - \Pr(Y_i \cap (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})) \quad (3.7)$$

และเมื่อใช้ Inclusion-Exclusion Principle กับสมการที่ (3.7) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \Pr(C(Y_i)) = & \Pr(Y_i) - \sum_{j=1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j) + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=j+1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j \cap Y_k) \\ & - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=j+1}^{i-1} \sum_{l=k+1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j \cap Y_k \cap Y_l) + \dots \end{aligned} \quad (3.8)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการในการคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยเป็น

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \left[\Pr(Y_i) - \sum_{j=1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j) + \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=j+1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j \cap Y_k) - \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=j+1}^{i-1} \sum_{l=k+1}^{i-1} \Pr(Y_i \cap Y_j \cap Y_k \cap Y_l) + \dots \right] + C(u)(1-R). \quad (3.9)$$

โดยในการนำสมการ (3.9) ไปใช้นั้นจะต้องทำการหา미니มัลพาททั้งหมด และเรียงลำดับต้นทุนของมินิมัลพาทจากน้อยไปมาก จากผลการหามินิมัลพาทในหัวข้อที่ 2.1.1 ซึ่งเป็นมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 2.3 เมื่อนำมาคำนวณหาต้นทุนของแต่ละมินิมัลพาทและเรียงลำดับจากน้อยไปมากจะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$Y_1 = \{a_1, a_2\}$	35
$Y_2 = \{a_1, a_3, a_6\}$	45
$Y_3 = \{a_5, a_6\}$	55
$Y_4 = \{a_2, a_4, a_5\}$	75

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (3.9) มาใช้คำนวณหาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายที่มีมินิมัลพาท 4 เส้นทาง จะได้สมการที่ใช้คำนวณต้นทุนเฉลี่ยสำหรับโครงข่ายนี้เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} E(Cost) = & C(Y_1) \times [\Pr(Y_1)] + C(Y_2) \times [\Pr(Y_2) - \Pr(Y_2 \cap Y_1)] \\ & + C(Y_3) \times [\Pr(Y_3) - \Pr(Y_3 \cap Y_1) - \Pr(Y_3 \cap Y_2) + \Pr(Y_3 \cap Y_1 \cap Y_2)] \\ & + C(Y_4) \times [\Pr(Y_4) - \Pr(Y_4 \cap Y_1) - \Pr(Y_4 \cap Y_2) - \Pr(Y_4 \cap Y_3) \\ & + \Pr(Y_4 \cap Y_1 \cap Y_2) + \Pr(Y_4 \cap Y_1 \cap Y_3) + \Pr(Y_4 \cap Y_2 \cap Y_3) \\ & - \Pr(Y_4 \cap Y_1 \cap Y_2 \cap Y_3)] + C_u \times (1-R). \end{aligned} \quad (3.10)$$

เมื่อนำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละมินิพัทที่คำนวณได้ในหัวข้อ 2.1 และต้นทุนของแต่ละมินิพัทจากตารางที่ 3.4 มาแทนค่าลงในสมการที่ (3.10) จะได้ว่าต้นทุนเฉลี่ยเป็น 45.2672 มีค่าตรงกับวิธีการคำนวณแบบแจกแจงซึ่งแสดงไว้ก่อนหน้านี้

$$\begin{aligned} E(Cost) &= 35 \times (0.64) + 45 \times (0.576 - 0.4608) + 55 \times (0.64 - 0.4096 - 0.4608 + 0.36864) \\ &\quad + 75 \times (0.576 - 0.4608 - 0.331776 - 0.4608 + 0.331776 + 0.36864 + 0.331776 - 0.331776) \\ &\quad + 100 \times (1 - 0.91648) \\ &= 35 \times 0.64 + 45 \times 0.1152 + 55 \times 0.13824 + 75 \times 0.02304 + 100 \times 0.08352 \\ &= 22.4 + 5.184 + 7.6032 + 1.728 + 8.352 = 45.2672 . \end{aligned}$$

จากตัวอย่างที่แสดงข้างต้นพบว่าถ้าระบบโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณด้วยสมการที่ (3.9) ก็จะมีคามยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นสมการที่ (3.9) จึงยังไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน แต่จากแนวคิดในการคำนวณหาค่าต้นทุนเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ (3.9) มีเงื่อนไขของการคำนวณคือ จะต้องใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนเสมอ ซึ่งความน่าจะเป็นในการที่จะใช้เส้นทางแต่ละเส้นทางนั้น จะตรงกับวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นด้วย Sum of Disjoint Products ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1.2 ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย ดังนั้น จึงนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณหาต้นทุนเฉลี่ยด้วย โดยอาศัยความสัมพันธ์จากสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$\Pr(Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})' = \Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \quad (3.11)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.11) ไปแทนในสมการที่ (3.3) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \Pr(C(Y_i)) &= \Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times [\Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots \\ &\quad \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}')] \end{aligned} \quad (3.12)$$

นำสมการที่ (3.12) ไปแทนลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการในการคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยเป็น

$$\begin{aligned} E(Cost) &= \sum_{i=1}^n C(Y_i) \left[\Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times [\Pr(Y_1') + \right. \\ &\quad \left. \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}')] \right] + C_u (1 - R) . \end{aligned} \quad (3.13)$$

เมื่อนำไปคำนวณกับตัวอย่างจะได้ผลการคำนวณดังนี้

$$E(Cost) = C(Y_1) \times \Pr(Y_1) + C(Y_2) \times \Pr(Y_2) \times \Pr(Y'_1) + C(Y_3) \times \Pr(Y_3) \times \Pr(Y'_1) \times \Pr(Y'_2) \\ + C(Y_4) \times \Pr(Y_4) \times \Pr(Y'_1) \times \Pr(Y'_2) \times \Pr(Y'_3) + C_u \times (1 - R) \quad (3.14)$$

โดยที่

$$\Pr(Y_1) = y_1 y_2 = 0.64$$

$$\Pr(Y_2) \times \Pr(Y'_1) = (\bar{y}_1 + y_1 \bar{y}_2) y_1 y_3 y_6 = y_1 \bar{y}_2 y_3 y_6 = 0.8 \times 0.2 \times 0.9 \times 0.8 = 0.1152$$

$$\Pr(Y_3) \times \Pr(Y'_1) \times \Pr(Y'_2) = (\bar{y}_1 + y_1 \bar{y}_2)(\bar{y}_1 + y_1 \bar{y}_3 + y_1 y_3 \bar{y}_6) y_5 y_6 \\ = \bar{y}_1 y_5 y_6 + y_1 \bar{y}_2 \bar{y}_3 y_5 y_6$$

$$\Pr(Y_4) \times \Pr(Y'_1) \times \Pr(Y'_2) \times \Pr(Y'_3) = (\bar{y}_1 + y_1 \bar{y}_2)(\bar{y}_1 + y_1 \bar{y}_3 + y_1 y_3 \bar{y}_6)(\bar{y}_5 + y_5 \bar{y}_6)(y_2 y_4 y_5) \\ = \bar{y}_1 y_2 y_4 y_5 \bar{y}_6 = 0.2 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.8 \times 0.2 = 0.02304$$

เมื่อนำค่าความน่าจะเป็นและต้นทุนของแต่ละมินิมัลพาตามแทนค่าลงในสมการที่ (3.14) จะได้ต้นทุนเฉลี่ยดังนี้

$$E(Cost) = 35 \times 0.64 + 45 \times 0.1152 + 55 \times 0.13824 + 75 \times 0.02304 + 100 \times (1 - 0.91648) \\ = 45.2672 .$$

จากตัวอย่างข้างต้นพบว่าการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยด้วยสมการที่ (3.13) นี้จะง่ายและสะดวกกว่าการคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.9) แต่อย่างไรก็ตามการประเมินค่าต้นทุนเฉลี่ยโดยวิธีคำนวณโดยตรง ยังมีความยุ่งยากในการหาค่าความน่าจะเป็นของต้นทุน ($\Pr(C(Y_i))$) ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการที่ใช้การจำลองเหตุการณ์ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งเพื่อทำการประมาณค่าความน่าจะเป็นของต้นทุน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.1.2 การประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยการจำลองเหตุการณ์

ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยโดยวิธีคำนวณโดยตรงมีความยุ่งยากซับซ้อนอยู่ ซึ่งเมื่อมองย้อนกลับไปยังวิธีการประเมินความน่าเชื่อถือนั้น นอกจากวิธีการคำนวณโดยตรงแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้การจำลองเหตุการณ์ในการประเมินความน่าเชื่อถือด้วย ดังนั้นจึงได้นำวิธีการจำลองเหตุการณ์มาใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ย

ในการประเมินความน่าเชื่อถือจะต่างจากการประเมินต้นทุนเฉลี่ยคือ ในการประเมินความน่าเชื่อถือนั้น เป็นการพิจารณาผลของการเชื่อมโยงระบบโครงข่ายที่เกิดขึ้น ในขณะที่การประเมินต้นทุน

เฉลี่ย เป็นการพิจารณาผลของต้นทุนที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายนั้น จะมีอัลกอริทึมที่คล้ายกับการหาค่าความน่าเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.2 แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชัน $N(Z_t)$ จากที่เคยเป็นการเช็คว่าระบบโครงข่ายสามารถใช้งานได้หรือไม่ มาเป็นการคำนวณต้นทุนในการใช้โครงข่าย ($C(Z_t)$) ในการสุ่มครั้งที่ t แทน นั่นคือทำการเปลี่ยนขั้นตอนที่ 3 ของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล(เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.2) เป็นการค้นหาเส้นทางที่สามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นและจุดปลายด้วยต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยใช้ Dijkstra's Algorithm เมื่อพบแล้วให้ทำการบันทึกต้นทุนในฟังก์ชัน $C(Z_t)$ แต่ถ้าหากไม่มีเส้นทางที่สามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้เลย แสดงว่าระบบจะเกิดต้นทุนอันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ (C_u) ดังนั้นจึงนำค่า C_u ดังกล่าวไปบันทึกไว้ใน $C(Z_t)$ และทำตามขั้นตอนเหล่านี้ไปเรื่อยๆ โดยสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้

อัลกอริทึม M&D (Monte Carlo & Dijkstra's Algorithm)

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนด $t=1$ โดยที่ t คือครั้งที่ในการสุ่ม
กำหนด NS ซึ่งแทนจำนวนครั้งในการหยุด
และกำหนดค่า ε ซึ่งเป็นค่า Tolerance
- ขั้นตอนที่ 2 สุ่มตัวเลข U จากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0,1]$ สำหรับแต่ละทางเชื่อมในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 3 เปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มได้ของแต่ละทางเชื่อมกับความน่าจะเป็น p ที่แต่ละทางเชื่อมจะสามารถทำงานได้
ถ้า $U \leq p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 1
($z_{te} = 1$)
ถ้า $U > p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 0
($z_{te} = 0$)
เมื่อทำการสุ่มสถานะจนครบทุกทางเชื่อมจะได้เวกเตอร์สถานะของเหตุการณ์ครั้งที่ t เป็น $Z_t = (z_{t1}, z_{t2}, \dots, z_{te}, \dots, z_{ta})$
โดยที่ a = จำนวนทางเชื่อมทั้งหมดในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 4 ค้นหาด้วยสถานะของเวกเตอร์ทางเชื่อม Z_t ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 นั้น ระบบโครงข่ายมีต้นทุนในการขนส่งจากจุดเริ่มไปยังจุดปลายที่ต่ำที่สุดเป็นเท่าไร โดยใช้ Dijkstra's Algorithm และทำการบันทึกใน $C(Z_t)$ แต่ถ้าไม่มีเส้นทางที่สามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายได้ให้บันทึกต้นทุนจากการไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ (C_u) ลงใน $C(Z_t)$ แทน

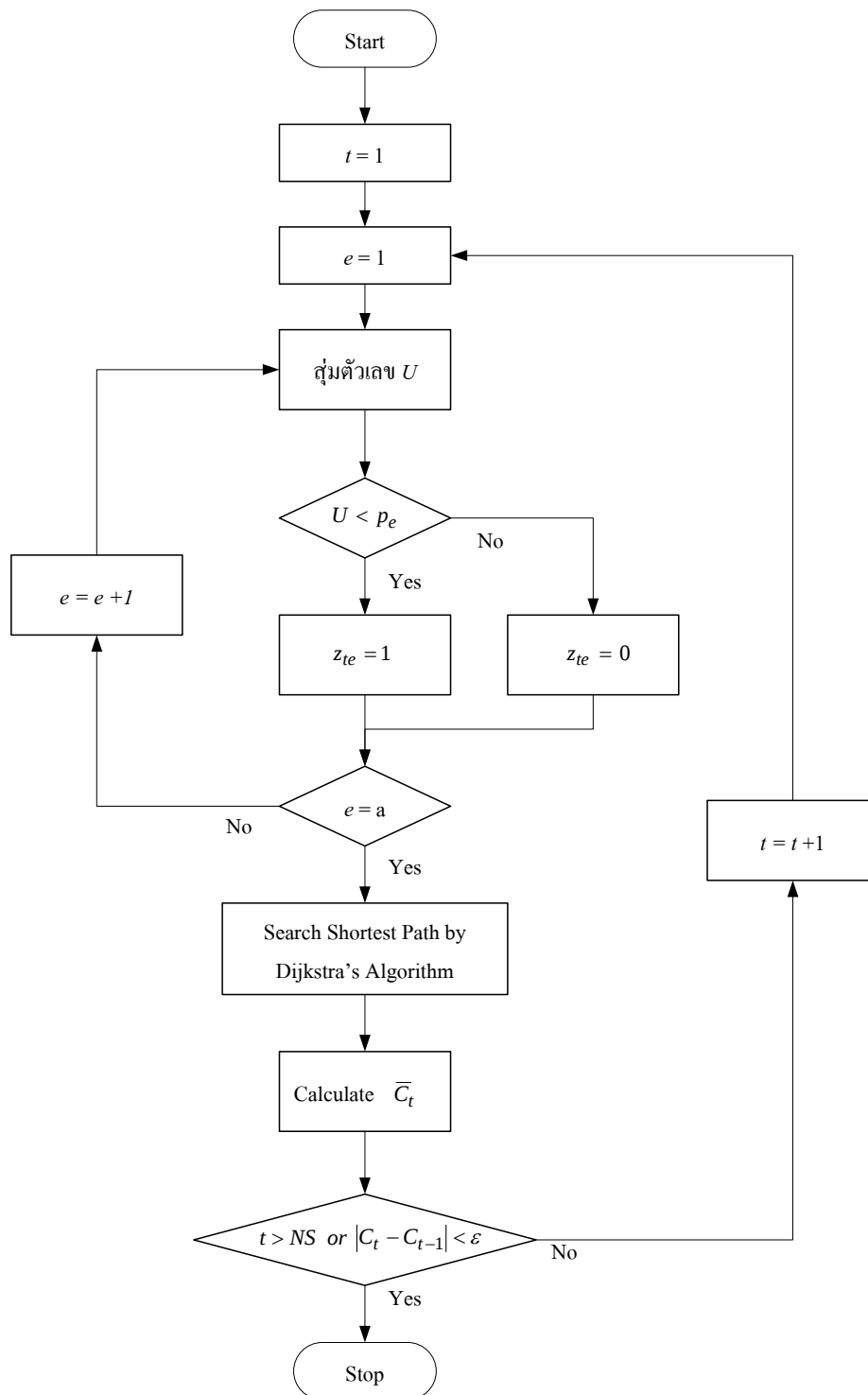
ขั้นตอนที่ 5 ทำการคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายโดยการหาค่าเฉลี่ยของต้นทุนที่ได้จากการสุ่มเหตุการณ์ซึ่งสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\bar{C}_t = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t C(Z_i) \quad (3.15)$$

ขั้นตอนที่ 6 เพิ่มค่า t และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 จนกว่า $t > NS$ หรือ $|\bar{C}_t - \bar{C}_{t-1}| < \varepsilon$ จึงหยุด

จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถนำมาแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.1

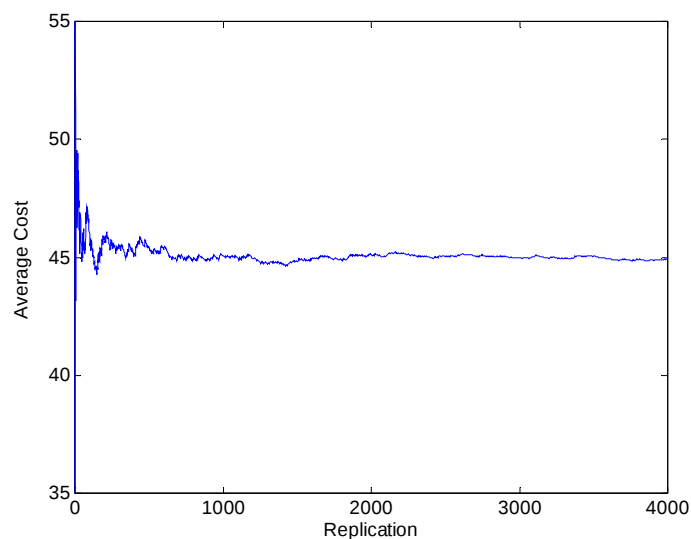
โดยในการอธิบายอัลกอริทึม จะใช้ตัวอย่างเดิมที่แสดงไว้ในหัวข้อ 2.2 ซึ่งได้ผลการสุ่มสถานะเป็นดังตารางที่ 2.2 เมื่อนำตัวอย่างการสุ่มเหตุการณ์มาทำการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งเมื่อนำผลจากตารางที่ได้มาคำนวณหาต้นทุนเฉลี่ยของระบบตามสมการที่ (3.15) จะได้ผลของค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจากกราฟจะพบว่า ค่าต้นทุนเฉลี่ยจะเริ่มลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งเมื่อผ่านการสุ่มเหตุการณ์ประมาณ 3,000 – 4,000 ครั้ง ซึ่งในช่วงนี้สามารถอ่านค่าเฉลี่ยจากกราฟได้ประมาณ 45.2312 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณโดยตรงแล้วให้ผลที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลและ Dijkstra's Algorithm (M&D)

ตารางที่ 3.5 ผลของการจำลองเหตุการณ์ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 แบบมอนติคาร์โล

ครั้งที่ในการสุ่ม	สถานะของทางเชื่อม	เส้นทางที่ถูกที่สุด	ต้นทุนการใช้เส้นทาง $C(Z_t)$
1	(1,1,0,1,1)	$\{a_1, a_2\}$	35
2	(1,0,1,0,1,0)	-	100
3	(1,0,0,0,0,1)	-	100
4	(0,0,0,0,1,1)	$\{a_5, a_6\}$	55
5	(1,0,1,0,0,1)	$\{a_1, a_3, a_6\}$	45
6	(0,1,1,0,1,1)	$\{a_5, a_6\}$	55
7	(0,1,1,1,0,1)	-	100
8	(0,1,1,1,1,0)	$\{a_2, a_4, a_5\}$	75
...		...	...
...		...	...
3999	(1,1,0,1,0,1)	$\{a_1, a_2\}$	35
4000	(1,0,0,1,1,1)	$\{a_5, a_6\}$	55



รูปที่ 3.2 ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 1 จากการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

จากการจำลองเหตุการณ์ดังกล่าว พบว่าในทุกรอบของการจำลองเหตุการณ์นั้น จะต้องทำการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดด้วย Dijkstra's Algorithm ทำให้เสียเวลาในการจำลองเหตุการณ์นาน และเมื่อพิจารณาเส้นทางที่ต้นทุนต่ำที่สุดในการจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งจากตารางที่ 3.4 พบว่าเส้นทางดังกล่าวจะ

เป็นหนึ่งในมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายนี้ ดังนั้นเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ เราจึงทำการปรับปรุงวิธีการจำลองเหตุการณ์ใหม่ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนในการค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดจากการใช้ Dijkstra's Algorithm มาเป็นการเปรียบเทียบกับมินิมัลพาททั้งหมดของระบบโครงข่ายที่เรียงตามลำดับต้นทุนแทน ทำให้ขั้นตอนในการจำลองเหตุการณ์ เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมดังนี้

อัลกอริทึม M&M (Monte Carlo & Minimal Path)

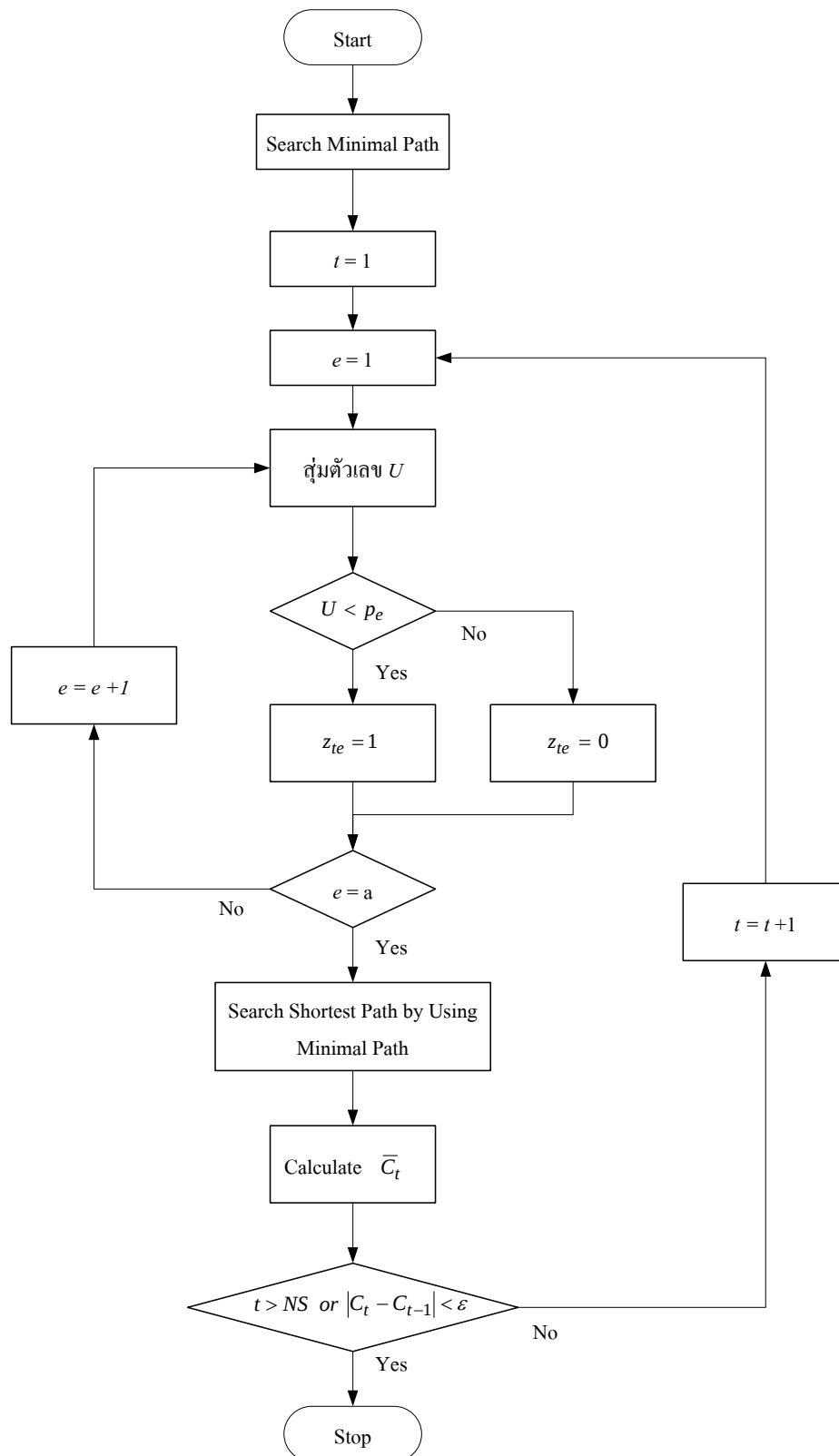
- ขั้นตอนที่ 1 ทำการค้นหามินิมัลพาททั้งหมดของระบบโครงข่าย และนำมาเรียงลำดับตามต้นทุนของการใช้มินิมัลพาทจากน้อยไปมาก
- ขั้นตอนที่ 2 กำหนด $t=1$ โดยที่ t คือครั้งที่ในการสุ่ม
กำหนด NS ซึ่งแทนจำนวนครั้งในการหยุด
และกำหนดค่า ε ซึ่งเป็นค่า tolerance
- ขั้นตอนที่ 3 สุ่มตัวเลข U จากการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วง $[0,1]$ สำหรับแต่ละทางเชื่อมในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 4 เปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มได้ของแต่ละทางเชื่อมกับความน่าจะเป็น p ที่แต่ละทางเชื่อมจะสามารถทำงานได้
ถ้า $U \leq p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 1 ($z_{te} = 1$)
ถ้า $U > p$ กำหนดให้ค่าของสถานะทางเชื่อมที่ e ที่ได้จากการสุ่มมีค่าเป็น 0 ($z_{te} = 0$)
เมื่อทำการสุ่มสถานะจนครบทุกทางเชื่อมจะได้เวกเตอร์สถานะของเหตุการณ์ครั้งที่ t เป็น $Z_t = (z_{t1}, z_{t2}, \dots, z_{te}, \dots, z_{ta})$
โดยที่ a = จำนวนทางเชื่อมทั้งหมดในระบบโครงข่าย
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการค้นหาค่าด้วยสถานะของเวกเตอร์ทางเชื่อม Z_t ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 นั้นมีมินิมัลพาทที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 อยู่หรือไม่
ถ้ามีให้เลือกมินิมัลพาทที่มีต้นทุนต่ำสุดและทำการบันทึกต้นทุนใน $C(Z_t)$
ถ้าไม่มีมินิมัลพาทแสดงว่าโครงข่ายไม่สามารถเชื่อมโยงจุดเริ่มและจุดปลายด้วยสถานะของเวกเตอร์ทางเชื่อมเหล่านี้ ให้บันทึกต้นทุนจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ (C_u) ลงใน $C(Z_t)$ แทน
- ขั้นตอนที่ 6 ทำการคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายโดยการหาค่าเฉลี่ยของต้นทุนที่ได้จากการสุ่มเหตุการณ์จากสมการ $\bar{C}_t = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t C(Z_i)$ โดยที่ t คือจำนวนครั้งที่ทั้งหมดที่ทำการสุ่มเหตุการณ์

ขั้นตอนที่ 7 เพิ่มค่า t และทำซ้ำขั้นตอนที่ 3-5 จนกว่า $t > NS$ หรือ $|\bar{C}_t - \bar{C}_{t-1}| < \varepsilon$ จึงหยุด

โดยสามารถเขียนแผนภาพแสดงการคำนวณได้ดังรูปที่ 3.3

เมื่อทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ของอัลกอริทึม M&M พบว่าจำนวนครั้งที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ไม่มีความแตกต่างจากอัลกอริทึม M&D แต่อัลกอริทึม M&M นั้นจะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์น้อยกว่าอัลกอริทึม M&D เนื่องจากอัลกอริทึม M&M นั้นไม่ได้ทำการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดทุกรอบของการจำลองเหตุการณ์ ทำให้สามารถลดเวลาในการจำลองเหตุการณ์ในแต่ละรอบลงได้

จากวิธีการจำลองเหตุการณ์ดังกล่าวพบว่า การประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการจำลองเหตุการณ์นั้นจะไม่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับการคำนวณโดยตรง ค่าที่ได้แม้เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้นแต่ให้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรง แต่ผลจะใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรงเพียงใดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่า ε ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ ถ้ากำหนด ε ให้มีค่าต่ำมากก็จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย



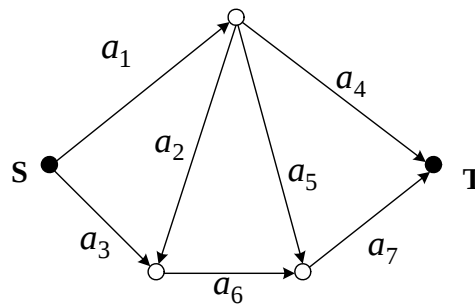
รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลและมินิมัลพาท (M&M)

3.2 การเปรียบเทียบผลการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์

ในหัวข้อที่ 3.1 ได้อธิบายถึงวิธีการในการการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบผลเชิงประสิทธิภาพของการประเมินต้นทุนเฉลี่ย ผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกันโดยทำการคัดเลือกโครงข่ายตัวอย่างที่มีจำนวนมินิมัลพาจากน้อยไปมากจำนวน 16 โครงข่าย ซึ่งมีทั้งโครงข่ายที่มีทางเชื่อมทิศทางเดียว (ตัวอักษรปกติ) และโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทาง (ตัวอักษรหนา) ดังแสดงในตารางที่ 3.6 พร้อมจำนวนโนด จำนวนทางเชื่อม และจำนวนมินิมัลพา ของระบบโครงข่ายตัวอย่าง โดยมีลักษณะโครงข่ายดังรูปที่ 3.4-3.16 (ข้อมูลของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 แสดงในตารางที่ 3.7 และ 3.8 สำหรับระบบโครงข่ายอื่นๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 3.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างในการศึกษาเปรียบเทียบผล

ระบบโครงข่าย	จำนวนโนด	จำนวน ทางเชื่อม	จำนวน มินิมัลพา	อ้างอิงที่มา
ตัวอย่างที่ 1	4	6	4	Lin, 2001
ตัวอย่างที่ 2	5	7	4	Lin, 2003
ตัวอย่างที่ 3	9	13	6	Yoo และ Deo, 1988
ตัวอย่างที่ 4	6	9	13	Balan และ Traldi, 2003
ตัวอย่างที่ 5	7	15	14	Soh, S. และ Rai, S., 1993
ตัวอย่างที่ 6	11	21	17	Balan และ Traldi, 2003
ตัวอย่างที่ 7	8	12	20	Balan และ Traldi, 2003
ตัวอย่างที่ 8	11	22	23	-
ตัวอย่างที่ 9	8	12	24	Abraham, 1979
ตัวอย่างที่ 10	7	12	25	Balan และ Traldi, 2003
ตัวอย่างที่ 11	11	20	28	-
ตัวอย่างที่ 12	15	28	33	-
ตัวอย่างที่ 13	8	13	34	-
ตัวอย่างที่ 14	16	30	36	Soh, S. และ Rai, S., 1993
ตัวอย่างที่ 15	7	13	40	-
ตัวอย่างที่ 16	9	14	44	Soh, S. และ Rai, S., 1993



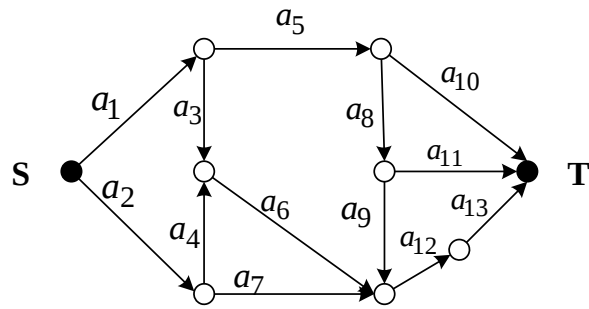
รูปที่ 3.4 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 3.7 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2

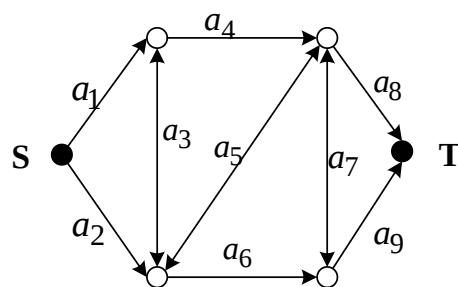
ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.80	10
a_2	0.80	12
a_3	0.85	24
a_4	0.90	46
a_5	0.80	30
a_6	0.75	10
a_7	0.70	15
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		100

ตารางที่ 3.8 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

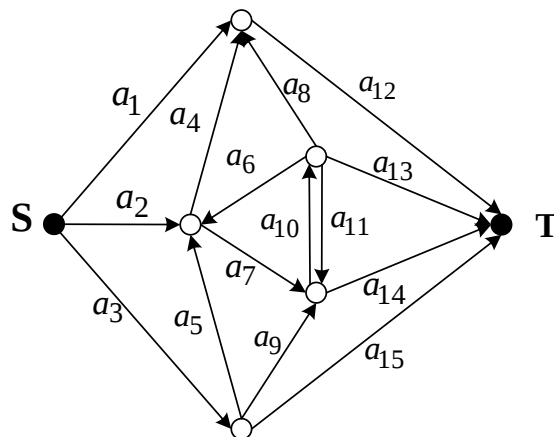
มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	47
$\{a_3, a_6, a_7\}$	49
$\{a_1, a_5, a_7\}$	55
$\{a_1, a_4\}$	56



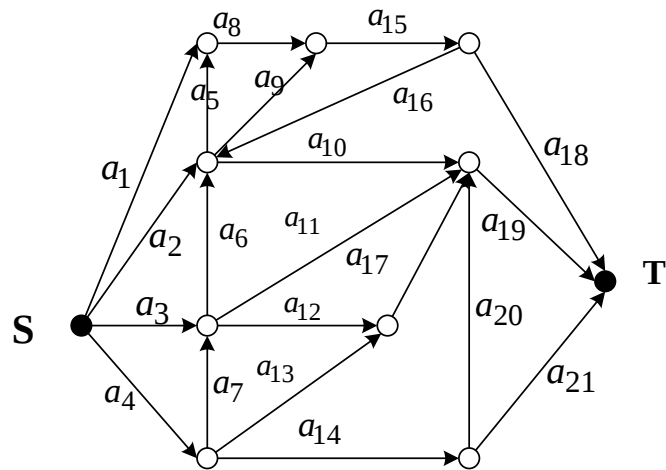
รูปที่ 3.5 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 3



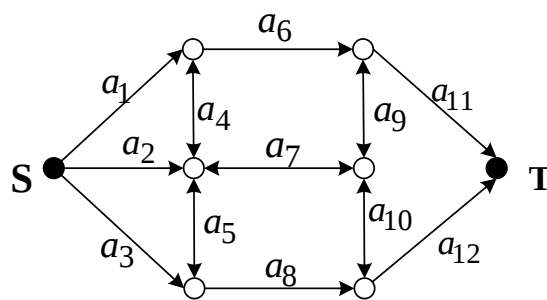
รูปที่ 3.6 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 4



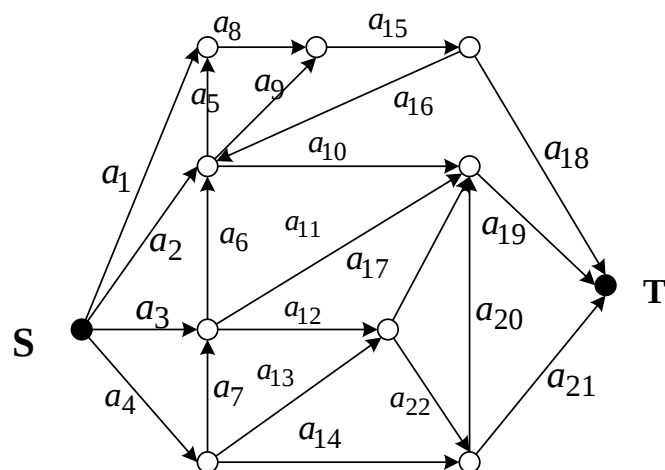
รูปที่ 3.7 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 5



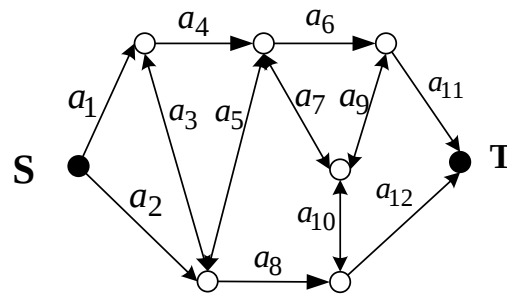
รูปที่ 3.8 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 6



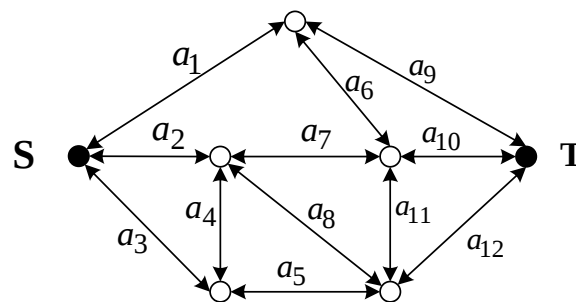
รูปที่ 3.9 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 7



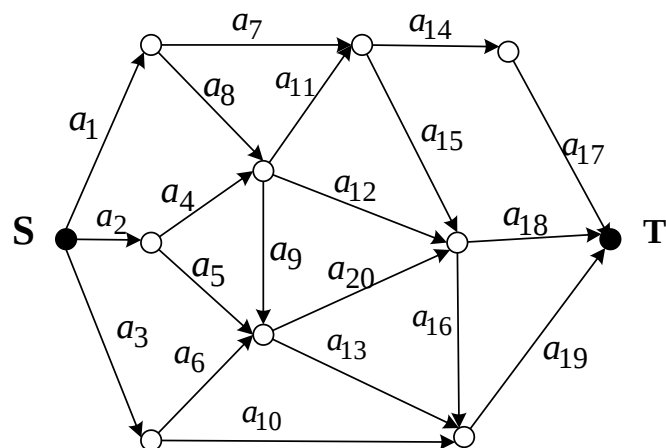
รูปที่ 3.10 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 8



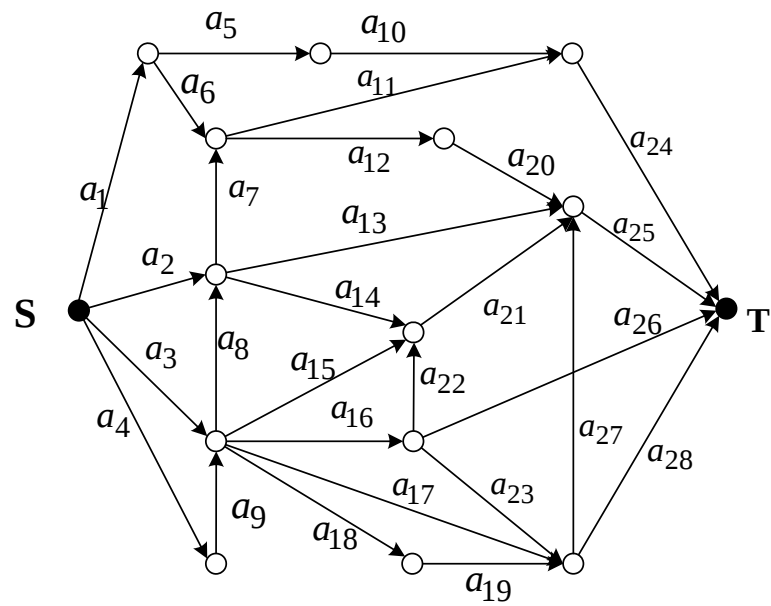
รูปที่ 3.11 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 9



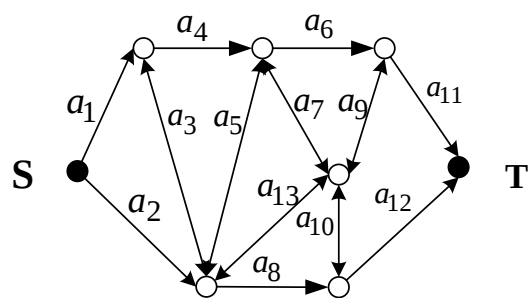
รูปที่ 3.12 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 10



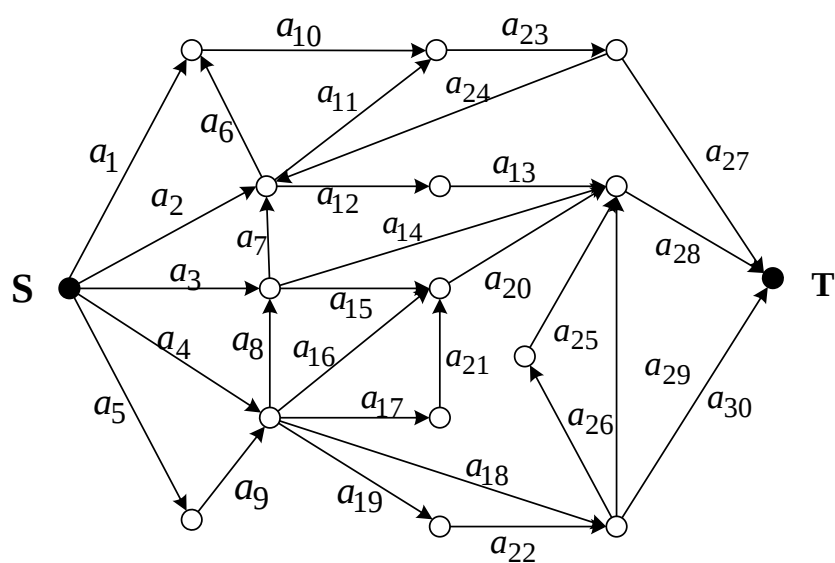
รูปที่ 3.17 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 11



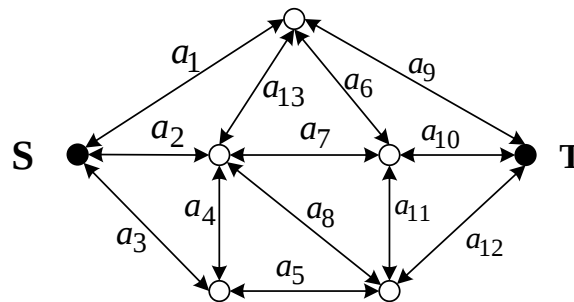
รูปที่ 3.18 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 12



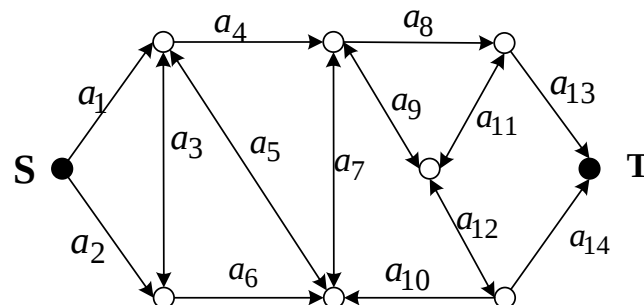
รูปที่ 3.13 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13



รูปที่ 3.14 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14



รูปที่ 3.15 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 15



รูปที่ 3.16 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 16

ในการทดสอบประสิทธิภาพของการประเมินต้นทุนเฉลี่ยทั้ง 2 วิธี ทำการทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB 5.3 ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์รุ่น Pentium 4, 2.4 GHz 512 RAM โดยมีรายละเอียดในการทดสอบของแต่ละวิธีดังนี้

- การคำนวณโดยตรง จะใช้วิธี Sum of Disjoint Products ในการหาความน่าจะเป็น โดยมีอัลกอริทึมตามที่แสดงในภาคผนวก ก.
- การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล จะทำการจำลองเหตุการณ์ด้วยอัลกอริทึม M&M โดยในแต่ละกรณีจะทำการจำลองเหตุการณ์เป็นจำนวน 40 รอบ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เนื่องจากการจำลองเหตุการณ์ในแต่ละรอบมีความแตกต่างกัน และกำหนดค่าความผิดพลาดที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ $\varepsilon_R = 0.0001$ สำหรับค่าความน่าเชื่อถือ และ $\varepsilon_C = 0.01$ สำหรับต้นทุนเฉลี่ย

เมื่อทำการประเมินความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ ตามวิธีที่กำหนดไว้ ได้ผลการประเมินระบบโครงข่ายดังตารางที่ 3.9 และเวลาที่ใช้ในการประเมินดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.9 ต้นทุนและสมรรถนะของระบบโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ

ระบบโครงข่าย	ต้นทุนการใช้ระบบโครงข่าย			การคำนวณโดยตรง		การจำลองเหตุการณ์	
	ต่ำสุด	สูงสุด	ส่งไม่ได้	ความน่าเชื่อถือ	ต้นทุนเฉลี่ย	ความน่าเชื่อถือ	ต้นทุนเฉลี่ย
ตัวอย่างที่ 1	35	75	100	0.916	45.267	0.916	45.276
ตัวอย่างที่ 2	47	56	100	0.862	57.793	0.862	57.784
ตัวอย่างที่ 3	72	95	200	0.916	84.037	0.916	84.029
ตัวอย่างที่ 4	100	207	300	0.913	124.980	0.913	124.997
ตัวอย่างที่ 5	96	170	300	0.914	117.122	0.914	117.140
ตัวอย่างที่ 6	96	169	300	0.905	121.985	0.905	121.970
ตัวอย่างที่ 7	94	195	300	0.912	119.251	0.912	119.227
ตัวอย่างที่ 8	96	185	300	0.925	118.984	0.925	118.954
ตัวอย่างที่ 9	93	184	300	0.911	114.869	0.911	114.834
ตัวอย่างที่ 10	108	249	400	0.912	138.078	0.912	138.033
ตัวอย่างที่ 11	88	167	300	0.906	122.302	0.906	122.269
ตัวอย่างที่ 12	90	165	300	0.908	126.326	0.908	126.288
ตัวอย่างที่ 13	93	189	300	0.922	111.714	0.922	111.736
ตัวอย่างที่ 14	91	174	300	0.916	113.209	0.916	113.184
ตัวอย่างที่ 15	108	256	400	0.925	134.857	0.925	134.910
ตัวอย่างที่ 16	122	238	400	0.912	150.648	0.912	150.606

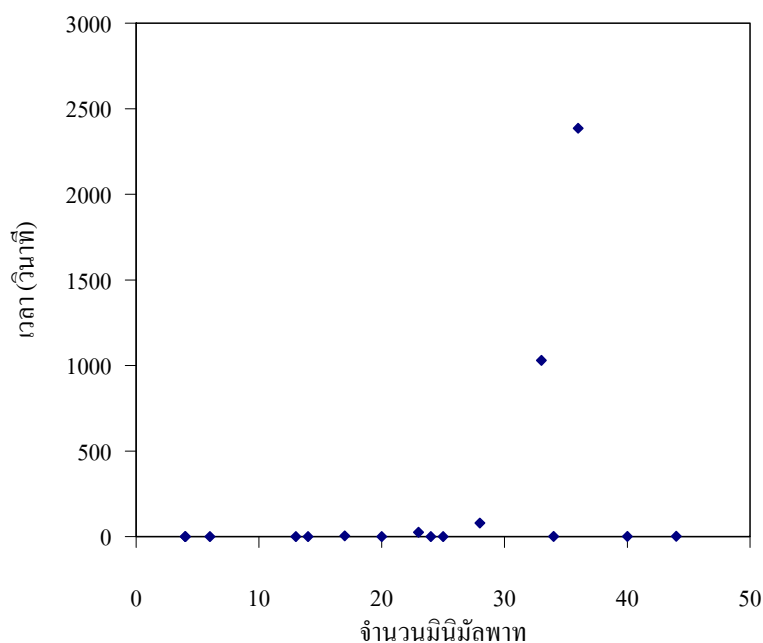
ตารางที่ 3. 10 เวลาในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยวิธีต่างๆ

ระบบโครงข่าย	การคำนวณโดยตรง	การจำลองเหตุการณ์	
	เวลา (วินาที)	เวลา (วินาที)	จำนวนครั้งในการจำลองเหตุการณ์
ตัวอย่างที่ 1	0.031	21.208	19092
ตัวอย่างที่ 2	0.031	19.016	17976
ตัวอย่างที่ 3	0.062	65.486	33199
ตัวอย่างที่ 4	0.109	164.545	51727
ตัวอย่างที่ 5	0.187	163.099	50621
ตัวอย่างที่ 6	4.203	191.332	53994
ตัวอย่างที่ 7	0.311	171.511	51785
ตัวอย่างที่ 8	26.031	145.589	47962
ตัวอย่างที่ 9	0.343	194.755	53344
ตัวอย่างที่ 10	0.485	418.858	71700
ตัวอย่างที่ 11	79.109	213.355	56059
ตัวอย่างที่ 12	1030	188.775	51187
ตัวอย่างที่ 13	0.828	169.221	50287
ตัวอย่างที่ 14	2386.32	191.479	51573
ตัวอย่างที่ 15	1.109	294.171	65949
ตัวอย่างที่ 16	1.734	347.314	67200

จากตารางที่ 3.9 เมื่อเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นที่ทำการประเมินโดยการคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์ พบว่าทั้งสองวิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่าต้นทุนเฉลี่ยจะมีความแตกต่างกันในทศนิยมตำแหน่งที่ 2 อันเป็นผลเนื่องจากการกำหนดค่า ε ซึ่งความแตกต่างนี้มีค่าน้อยมากจึงไม่ส่งผลต่อค่าต้นทุนเฉลี่ยที่ประเมินได้ แต่ถ้าหากต้องการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการจำลองเหตุการณ์ให้มีความใกล้เคียงกับการคำนวณโดยตรงก็สามารถทำได้โดยการกำหนดค่า ε ให้มีค่าต่ำกว่านี้ แต่ผลที่ได้อาจจะไม่คุ้มกับเวลาในการจำลองเหตุการณ์ที่นานขึ้น

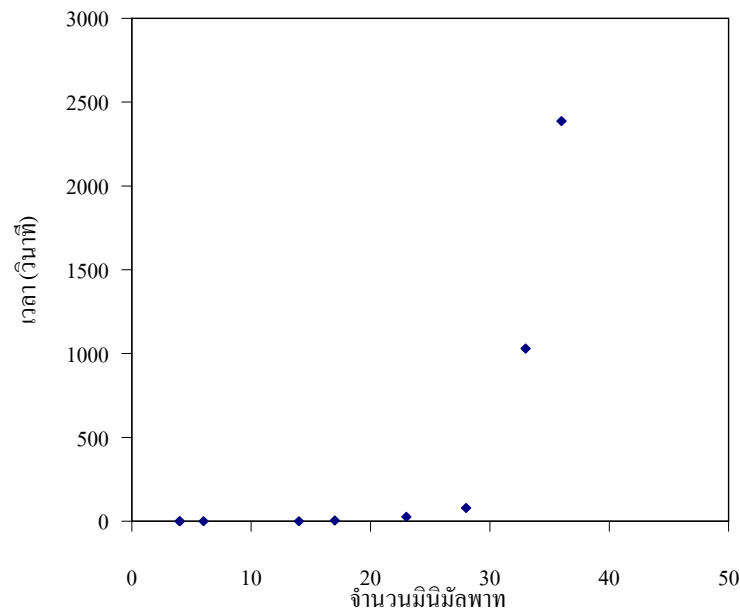
3.2.1 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยตรง

จากตารางที่ 3.10 พบว่าเมื่อระบบโครงข่ายมีจำนวนมินิมัลพาทมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการประเมินด้วยวิธีการคำนวณโดยตรงจะมีแนวโน้มที่มากขึ้น จึงนำข้อมูลดังกล่าวมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการประเมินกับจำนวนทางเชื่อมของระบบโครงข่ายตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.19

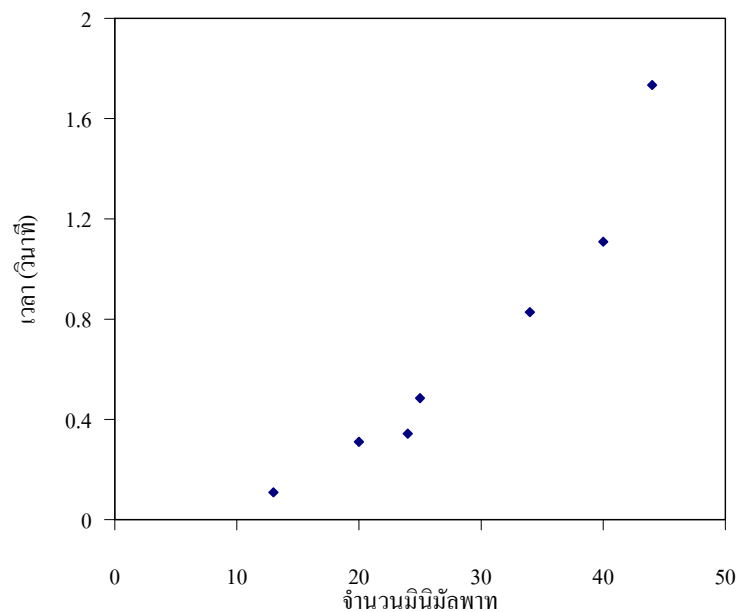


รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่าง

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.19 พบว่าเวลาที่ใช้ในการประเมินนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับจำนวนทางเชื่อม ดังนั้น จึงทำการพิจารณาข้อมูลใหม่พบว่า เวลาที่ใช้ในการประเมินของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทางนั้น จะมีค่าที่ต่ำกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทางที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จึงทำการแยกข้อมูลของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อมเป็นแบบ 1 และ 2 ทิศทางและทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ของเวลากับจำนวนทางเชื่อมใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาทของระบบโครงข่าย
ตัวอย่างที่มีทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาทของระบบโครงข่าย
ตัวอย่างที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทาง

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.20 และ 3.21 พบว่า ทั้งระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทางและ 2 ทิศทางจะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเมื่อจำนวนทางเชื่อมในระบบโครงข่ายมีจำนวนมากขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของ

เวลาจะมีค่าแตกต่างกัน โดยในระบบโครงข่ายที่มีขนาดใกล้เคียงกันนั้น ระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทางจะใช้เวลามากกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทาง และเมื่อระบบที่มีทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง มีมินิมัลพาทเกิน 30 พาท เวลาที่ใช้ในการประเมินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทางนั้นมีการเพิ่มของเวลาที่ต่ำกว่า

เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้การประเมินของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทาง ใช้เวลามากกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทาง พบว่า ในระบบโครงข่ายที่มีจำนวนมินิมัลพาทใกล้เคียงกัน ระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทางจะมีจำนวนทางเชื่อมน้อยกว่าระบบโครงข่ายที่มีจำนวนทางเชื่อม 1 ทิศทาง ซึ่งจะส่งผลให้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทางนั้นมีทางเชื่อมที่ซ้ำกันมากกว่าระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง เช่น ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทางและระบบโครงข่ายที่ 14 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทาง ที่มีมินิมัลพาทอยู่ 34 และ 36 พาทตามลำดับ เมื่อทำการนับจำนวนทางเชื่อมที่ปรากฏอยู่ในมินิมัลพาททั้งหมด จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.11 และ 3.12 ซึ่งจากตารางพบว่า ทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทาง จะมีการใช้ทางเชื่อมซ้ำกันมากกว่าในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 2 ทิศทาง

ตารางที่ 3.11 จำนวนทางเชื่อมที่ปรากฏในมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 12

ทางเชื่อม	จำนวนครั้งที่ปรากฏในมินิมัลพาท
a_1	20
a_2	14
a_3	14
a_4	14
a_5	12
a_6	13
a_7	13
a_8	10
a_9	15
a_{10}	16
a_{11}	18
a_{12}	16
a_{13}	10

ตารางที่ 3.12 จำนวนทางเชื่อมที่ปรากฏในมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14

ทางเชื่อม	จำนวนครั้งที่ปรากฏ ในมินิมัลพาท	ทางเชื่อม	จำนวนครั้งที่ปรากฏ ในมินิมัลพาท
a_1	2	a_{16}	2
a_2	3	a_{17}	2
a_3	5	a_{18}	6
a_4	13	a_{19}	6
a_5	13	a_{20}	7
a_6	4	a_{21}	2
a_7	9	a_{22}	6
a_8	10	a_{23}	10
a_9	13	a_{24}	1
a_{10}	6	a_{25}	4
a_{11}	4	a_{26}	4
a_{12}	5	a_{27}	9
a_{13}	5	a_{28}	23
a_{14}	3	a_{29}	4
a_{15}	3	a_{30}	4

เมื่อมินิมัลพาทมีทางเชื่อมที่ซ้ำกันมาก จะส่งผลให้พจน์ในการคำนวณความน่าจะเป็นมีจำนวนที่ลดลงเนื่องจากในการคำนวณด้วยวิธี Sum of Disjoint Products นั้น จะใช้การนำมินิมัลพาทลำดับที่ i มากระทำกับผลของ Sum of Disjoint Products ของมินิมัลพาทลำดับ $i-1$ ถ้ามีการซ้ำกันของทางเชื่อมมากจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของการกระทำนั้นมีจำนวนพจน์ที่น้อยลง (พิจารณาการคำนวณในสมการที่ 3.14 ประกอบ) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการประเมินจึงมีค่าน้อย

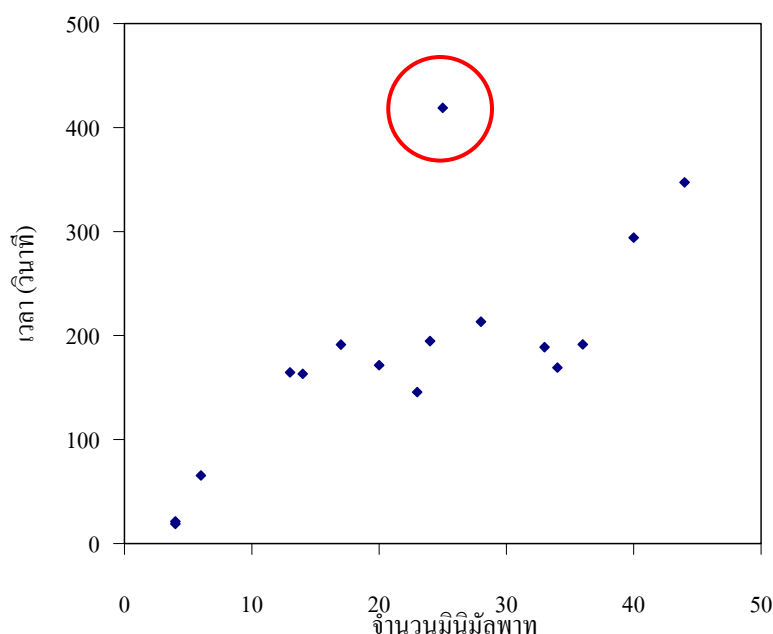
ในทางกลับกัน ถ้ามีการซ้ำกันของทางเชื่อมน้อยจะส่งผลให้ผลลัพธ์ของการกระทำนั้นมีจำนวนพจน์มาก และเมื่อระบบมีมินิมัลพาทมากจะส่งผลให้การคำนวณ Sum of Disjoint Products ในเทอมหลังๆ ใช้เวลานานมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้เวลาในการประเมินระบบโครงข่ายที่ 12 และ 14 ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มีทางเชื่อม 1 ทิศทางที่มีมินิมัลพาทมากกว่า 30 มีค่าสูงมาก

จากผลดังกล่าว สรุปได้ว่าวิธีประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการคำนวณโดยตรงนั้น ใช้เวลามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับจำนวนพจน์ของการหา Sum of Disjoint Products ในแต่ละรอบ โดยสิ่งที่ส่งผลต่อจำนวนพจน์ในการหา Sum of Disjoint Products นั้น ได้แก่การซ้ำกันของทางเชื่อมในมินิมัลพาท ซึ่งมีผลมาจาก

จำนวนมินิมัลพาทและลักษณะของทางเชื่อม เมื่อจำนวนมินิมัลพาทมากจะส่งผลให้พจน์ในการหา Sum of Disjoint Products มากตามด้วย ส่วนทางเชื่อมแบบ 2 ทิศทางจะส่งผลให้พจน์ในการหา Sum of Disjoint Products มีค่าน้อยกว่าทางเชื่อมแบบ 1 ทิศทาง

3.2.2 ความสัมพันธ์ของเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์

เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จากตารางที่ 3.10 พบว่า มีแนวโน้มที่มีค่ามากขึ้น เมื่อระบบโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นจึงนำเวลาในการจำลองเหตุการณ์มาวาดกราฟความสัมพันธ์กับจำนวนมินิมัลพาทดังแสดงในรูปที่ 3.22 พบว่าโดยส่วนใหญ่เวลาในการจำลองเหตุการณ์จะมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อระบบโครงข่ายมีจำนวนมินิมัลพาทมากขึ้นด้วย ยกเว้นระบบโครงข่ายที่ 10 ที่มี 25 มินิมัลพาทแต่ใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานถึง 418.858 วินาที ทั้งๆ ที่เป็นโครงข่ายที่ไม่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับโครงข่ายอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าเวลาในการจำลองเหตุการณ์นั้นอาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของโครงข่ายเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองเหตุการณ์ในการหาต้นทุนเฉลี่ยกับจำนวนมินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่าง

เมื่อลองพิจารณาถึงวิธีการในการจำลองเหตุการณ์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับว่า ผลของการจำลองเหตุการณ์จะเข้าสู่ค่าค่าหนึ่งได้เร็วเพียงใด ซึ่งการที่ผลการจำลองเหตุการณ์จะเข้าสู่ค่าค่าหนึ่งเร็วหรือช้าขึ้น ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ

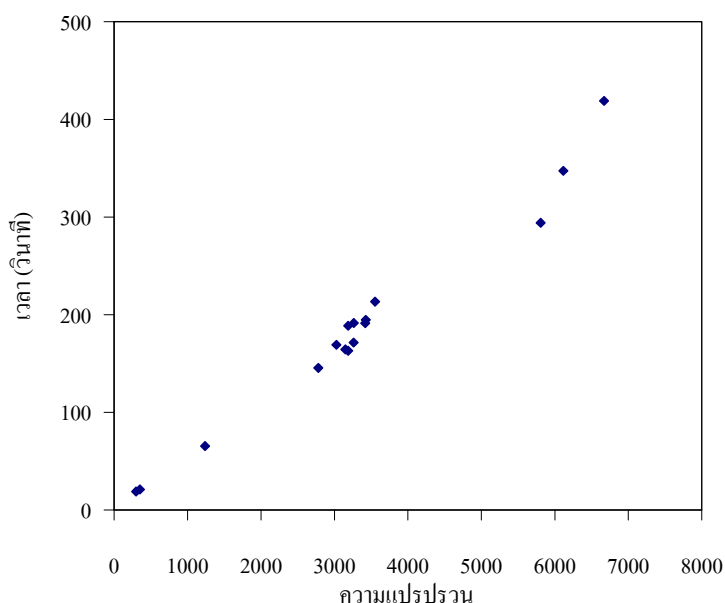
ระบบโครงข่ายที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงทำการคำนวณค่าความแปรปรวน (Variance) ของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่ายดังนี้

$$V(Cost) = \sum_{i=1}^m [C_i - E(Cost)]^2 \Pr(C_i) . \quad (3.16)$$

ทำการคำนวณความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่ายต่างๆ ตามสมการที่ (3.16) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.13 เมื่อนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแปรปรวนกับเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.23 พบว่าเวลาในการจำลองเหตุการณ์นั้นจะแปรตามค่าความแปรปรวนของระบบโครงข่าย โดยในระบบโครงข่ายที่มีความแปรปรวนของต้นทุนมากกว่า จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานกว่าด้วย

ตารางที่ 3. 13 ต้นทุนเฉลี่ยและความแปรปรวนของต้นทุนระบบโครงข่ายตัวอย่างต่างๆ

ระบบโครงข่าย	ต้นทุนเฉลี่ย	ความแปรปรวนของต้นทุน
ตัวอย่างที่ 1	45.267	351.137
ตัวอย่างที่ 2	57.793	298.781
ตัวอย่างที่ 3	84.037	1238.722
ตัวอย่างที่ 4	124.980	3147.761
ตัวอย่างที่ 5	117.122	3186.701
ตัวอย่างที่ 6	121.985	3418.253
ตัวอย่างที่ 7	119.251	3262.366
ตัวอย่างที่ 8	118.984	2781.544
ตัวอย่างที่ 9	114.869	3426.829
ตัวอย่างที่ 10	138.078	6670.320
ตัวอย่างที่ 11	122.302	3552.518
ตัวอย่างที่ 12	126.326	3187.957
ตัวอย่างที่ 13	111.714	3026.594
ตัวอย่างที่ 14	113.209	3264.305
ตัวอย่างที่ 15	134.857	5806.942
ตัวอย่างที่ 16	150.648	6115.813



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการจำลองเหตุการณ์ในการหาต้นทุนเฉลี่ยกับค่าความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่ายตัวอย่าง

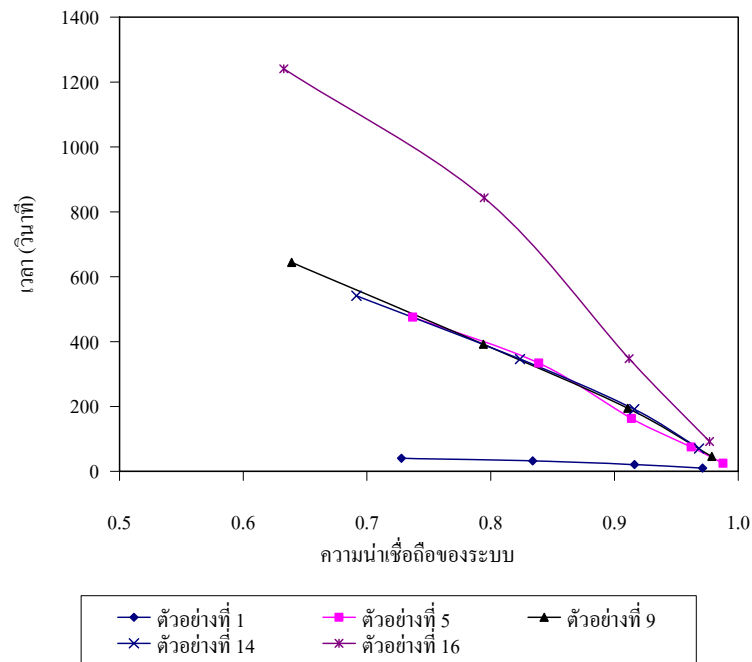
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์กับค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย โดยทำการเลือกตัวอย่างระบบโครงข่าย 5 ระบบ และทำการเปลี่ยนค่าความน่าเชื่อถือของแต่ละทางเชื่อมโดยทำการปรับค่าทุกๆ ทางเชื่อมด้วยอัตราส่วนที่เท่าๆ กัน แต่ยังคงค่าต้นทุนของแต่ละทางเชื่อมไว้เหมือนเดิม แล้วทำการจำลองเหตุการณ์ในแต่ละกรณี กรณีละ 40 รอบ และทำการหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.14 พบว่าในระบบโครงข่ายเดียวกัน เมื่อความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น เวลาในการจำลองเหตุการณ์จะมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 3.24 ทั้งนี้เนื่องจากความแปรปรวนของต้นทุนที่คำนวณจากสมการที่ (3.16) มีค่ามากหรือน้อยเพียงใดนั้นจะมีผลมาจากความแตกต่างของต้นทุนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการใช้ระบบโครงข่าย เมื่อพิจารณาด้านทุนที่ใช้ในการขนส่งสินค้ากับต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ พบว่าต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนในการขนส่งสินค้า ดังนั้นความแปรปรวนของต้นทุนจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น หากความน่าเชื่อถือของระบบมีค่าสูง ($\Pr(C(Y_i))$ มีค่ามาก) ทำให้ค่า $1-R$ มีค่าต่ำ ผลของต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งสินค้าไม่ได้จะมีน้อย ส่งผลให้ความแปรปรวนของต้นทุนมีค่าต่ำไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.25 จึงใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์น้อย ในทางกลับกันถ้าระบบโครงข่ายมีค่าความน่าเชื่อถือของระบบต่ำ ค่า $1-R$ จะมีค่ามาก ส่งผลให้ความแปรปรวนของต้นทุนมีค่าสูง จึงใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย

จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่า เวลาที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการจำลองเหตุการณ์จะมีค่ามากหรือน้อยเพียงใดเป็นผลมาจากลักษณะของระบบโครงข่าย รวมถึงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายนั้นๆ

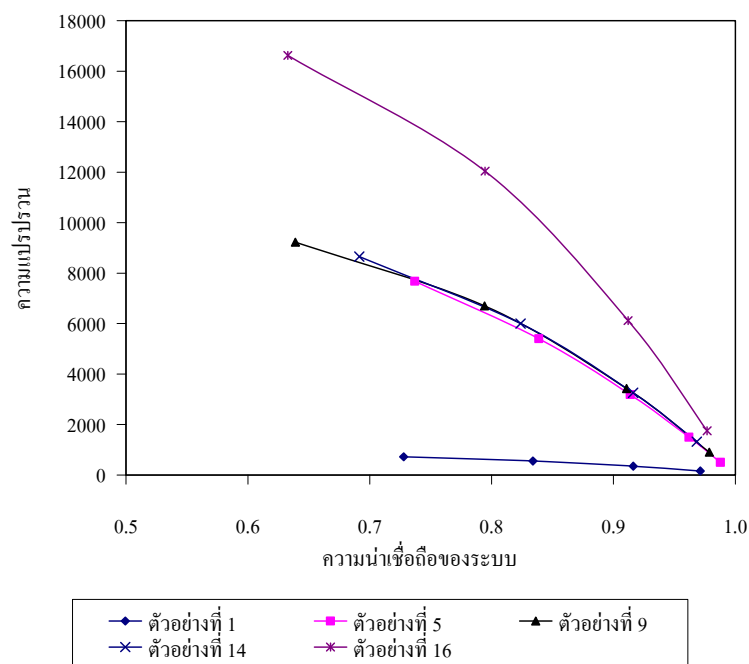
ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ผ่านความแปรปรวนของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่าย ถ้าระบบโครงข่ายมีความแตกต่างของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบมาก เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะมีความสูงตามไปด้วย

ตารางที่ 3.14 ผลการจำลองเหตุการณ์ของระบบตัวอย่างเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นของทางเชื่อม

	ความน่าเชื่อถือ	ต้นทุนเฉลี่ย	เวลาในการจำลองเหตุการณ์
ตัวอย่างที่ 1	0.729	58.738	40.221
	0.833	51.656	32.270
	0.916	45.276	21.208
	0.972	40.087	10.239
ตัวอย่างที่ 5	0.736	153.875	475.232
	0.839	132.836	333.823
	0.914	117.140	163.099
	0.962	106.569	74.975
	0.988	100.510	25.251
ตัวอย่างที่ 9	0.639	173.027	644.379
	0.794	140.568	391.765
	0.911	114.834	194.755
	0.978	98.944	46.168
ตัวอย่างที่ 14	0.691	161.247	541.359
	0.824	133.355	346.037
	0.916	113.184	191.479
	0.968	100.817	70.410
ตัวอย่างที่ 16	0.633	231.727	1240.529
	0.795	185.657	843.238
	0.912	150.606	347.314
	0.977	129.925	92.352



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของความน่าเชื่อถือกับเวลาในการจำลองเหตุการณ์ของระบบโครงข่าย



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ของความน่าเชื่อถือกับความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่าย

3.2.3 เปรียบเทียบเวลาในการคำนวณโดยตรงกับการจำลองเหตุการณ์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยตรงและเวลาในการจำลองเหตุการณ์จากตารางที่ 3.10 พบว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณโดยตรงด้วย Sum of Disjoint Products จะใช้เวลาน้อยกว่าการจำลองเหตุการณ์ในเกือบจะทุกระบบโครงข่ายตัวอย่าง ยกเว้นโครงข่ายตัวอย่างที่ 12 และ 14 ที่การจำลองเหตุการณ์ใช้เวลาน้อยกว่าวิธีการคำนวณโดยตรง เนื่องจากระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 12 และ 14 มีจำนวนมินิมัลพาทมาก ทำให้จำนวนพจน์ของ Sum of Disjoint Products มีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้การคำนวณหา Sum of Disjoint Products ในพจน์หลังๆ ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมากขึ้นด้วย

จากการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า เวลาที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของทั้ง 2 วิธีจะมาจากปัจจัยที่แตกต่างกัน โดยในวิธีการคำนวณโดยตรงนั้น เวลาจะแปรตามจำนวนมินิมัลพาทและลักษณะของทางเชื่อมในระบบ (ซึ่งทั้งคู่ส่งผลต่อเวลาในการคำนวณหา Sum of Disjoint Products) แต่โดยรวมแล้วถ้าระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะนานขึ้นด้วย ส่วนเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์นั้นจะไม่ได้แปรตามขนาดของระบบโครงข่ายเพียงอย่างเดียว แต่จะแปรตามความแตกต่างของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดโดยวัดผ่านความแปรปรวน ถ้าระบบโครงข่ายมีค่าความแปรปรวนมาก จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ด้วยว่าต้องการค่าที่มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ถ้าต้องการความถูกต้องมาก (ε มีค่าน้อย) จะใช้เวลาในการจำลองเหตุการณ์นานขึ้นด้วย

3.3 การประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวประเมินการปรับปรุงระบบโครงข่าย

ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างในการนำค่าต้นทุนเฉลี่ยมาใช้ในการเป็นตัวประเมินการปรับปรุงระบบโครงข่าย โดยจะทำการอธิบายผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 (รูปที่ 3.2) ซึ่งมีข้อมูลของระบบโครงข่ายดังแสดงในตารางที่ 3.6 และ 3.7 มีค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเป็น 0.862 และมีต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายเป็น 57.793 เมื่อต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายมีค่าเป็น 100

จากผลการคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย พบว่าความน่าเชื่อถือมีค่าต่ำ จึงต้องการจะปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายให้ดีขึ้น โดยวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับว่าทางเชื่อมแทนระบบใด เช่น ในกรณีที่ทางเชื่อมแทนผู้ประกอบการขนส่ง อาจทำการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับทางเชื่อมบางทางเชื่อมโดยการปรับราคาค่าขนส่งให้สูงขึ้น หรืออาจหาผู้ขนส่งรายใหม่เข้ามาเป็นทางเชื่อมใหม่ในระบบโครงข่าย โดยในตัวอย่างนี้สมมุติให้มีแนวทางเลือกในการปรับปรุงระบบโครงข่าย 5 แบบดังนี้คือ

6. ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของทางเชื่อม a_7 จากเดิมที่มีค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถใช้งานได้ 0.7 เป็นความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุนเพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 20 ซึ่งจะทำให้ลำดับและต้นทุนของมินิมัลพาทเปลี่ยนไปดังแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทก่อนและหลังปรับปรุงระบบแบบที่ 1

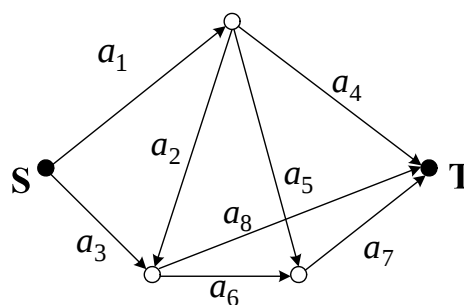
มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้มินิมัลพาท	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	47	52
$\{a_3, a_6, a_7\}$	49	54
$\{a_1, a_4\}$	56	56
$\{a_1, a_5, a_7\}$	55	60

7. ปรับปรุงความน่าเชื่อถือของทางเชื่อม a_1 จากเดิมที่มีค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถใช้งานได้ 0.8 เป็นความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุนเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 ซึ่งจะทำให้ลำดับและต้นทุนของมินิมัลพาทเปลี่ยนไปดังแสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทก่อนและหลังปรับปรุงระบบแบบที่ 2

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้มินิมัลพาท	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
$\{a_3, a_6, a_7\}$	49	49
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	47	52
$\{a_1, a_5, a_7\}$	55	60
$\{a_1, a_4\}$	56	61

8. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีความน่าจะเป็น 0.8 และมีต้นทุน 28 ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ซึ่งจะทำให้มีมินิมัลพาทมากขึ้น 2 มินิมัลพาทในโครงข่ายและมีลำดับและต้นทุนของมินิมัลพาทเปลี่ยนไปดังแสดงในตารางที่ 3.17



รูปที่ 3.26 ระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ที่เพิ่มทางเชื่อม a_8

ตารางที่ 3.17 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทเมื่อปรับปรุงระบบแบบที่ 3

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้มินิมัลพาท
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	47
$\{a_3, a_6, a_7\}$	49
$\{a_1, a_2, a_8\}$	50
$\{a_3, a_8\}$	52
$\{a_1, a_5, a_7\}$	55
$\{a_1, a_4\}$	56

9. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุน 35 ซึ่งได้ระบบโครงข่ายดังแสดงในรูปที่ 3.26 ซึ่งมีมินิมัลพาทเพิ่มขึ้นมา 2 มินิมัลพาทเหมือนกับกรณีที่ 3 แต่ลำดับและต้นทุนของมินิมัลพาทเปลี่ยนไปดังแสดงในตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทเมื่อปรับปรุงระบบแบบที่ 4

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้มินิมัลพาท
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	47
$\{a_3, a_6, a_7\}$	49
$\{a_1, a_5, a_7\}$	55
$\{a_1, a_4\}$	56
$\{a_1, a_2, a_8\}$	57
$\{a_3, a_8\}$	59

10. เพิ่มทางเชื่อม a_8 ที่มีความน่าจะเป็น 0.9 และมีต้นทุน 28 ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ซึ่งจะทำให้ทั้งลำดับและต้นทุนของมินิมัลพาทเปลี่ยนไป โดยจะต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทจะเหมือนแบบที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 3.18 แต่ค่าความน่าจะเป็นของมินิมัลพาทจะต่างกัน

จากวิธีการปรับปรุงระบบโครงข่ายทั้ง 5 แบบข้างต้นนี้ เมื่อทำการคำนวณความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย เมื่อกำหนดต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้เป็น 100 จะได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.19 ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ในการปรับปรุงแบบต่างๆ

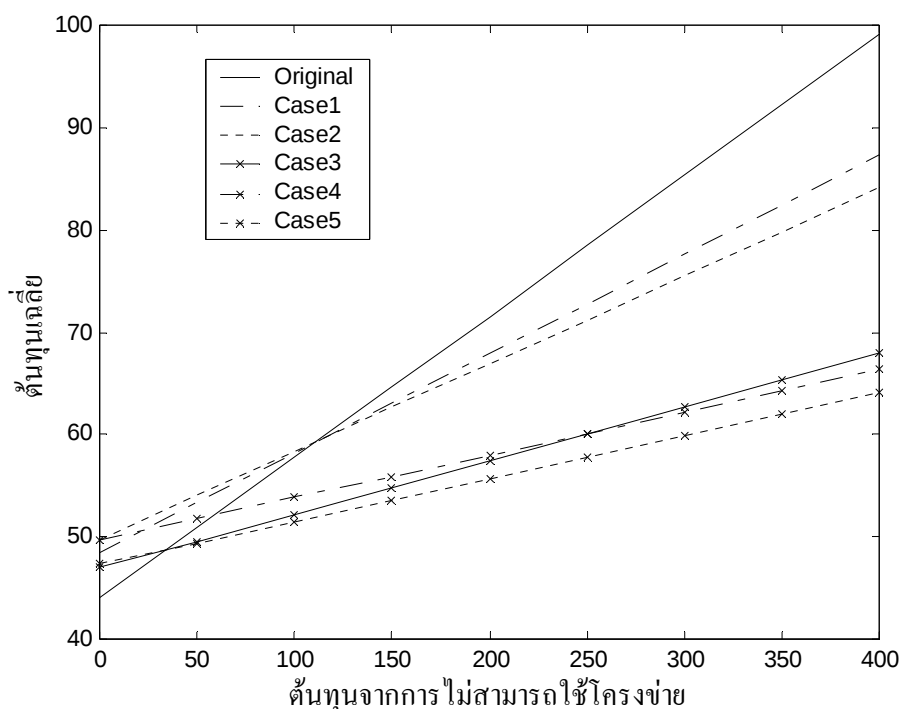
แบบที่	ความน่าเชื่อถือของระบบ	ต้นทุนเฉลี่ย
1. ปรับปรุง $a_7/0.9/20$	0.903	58.200
2. ปรับปรุง $a_1/0.9/15$	0.914	58.340
3. เพิ่ม $a_8/0.8/28$	0.948	52.200
4. เพิ่ม $a_8/0.9/35$	0.948	54.260
5. เพิ่ม $a_8/0.9/28$	0.958	51.500

เมื่อพิจารณาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย จะเห็นว่าวิธีที่ดีที่สุดในการปรับปรุงโครงข่ายทั้ง 5 แบบคือการเพิ่มทางเชื่อม a_8 ตามแบบที่ 5 แต่ในการปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้น จะส่งผลให้ต้นทุนเฉลี่ยในการใช้ระบบโครงข่ายเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาด้านต้นทุนเฉลี่ย พบว่าการปรับปรุงแบบที่ 5 ให้ต้นทุนเฉลี่ยที่มีค่าต่ำสุดเช่นกัน

แต่นอกจากการเปลี่ยนแปลงต้นทุนที่ใช้ในแต่ละทางเชื่อมจะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยแล้ว ต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้นั้นก็จะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าของต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่าย ตั้งแต่ 0 จนถึง 400 ซึ่งจะได้รับความสัมพันธ์ของต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้กับต้นทุนเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 3.27

จากรูปที่ 3.27 พบว่าต้นทุนเฉลี่ยของการใช้ระบบโครงข่ายจะแปรไปตามต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้ ซึ่งทำให้การปรับปรุงระบบโครงข่ายแบบที่ 5 นั้น ไม่ได้มีต้นทุนเฉลี่ยต่ำที่สุดเสมอไป จากรูปถ้าต้นทุนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้มีค่าต่ำกว่า 34.5 ก็ควรใช้ระบบโครงข่ายเดิมเนื่องจากต้นทุนเฉลี่ยในการขนส่งสินค้ามีค่าต่ำสุด แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 34.5 ควรทำการเพิ่มระบบโครงข่ายด้วยทางเชื่อม a_8 ตามเงื่อนไขแบบที่ 5

แต่ในกรณีที่หากไม่สามารถหาทางเชื่อมใหม่ได้(มีวิธีในการปรับปรุงเพียง 2 วิธีคือแบบที่ 1 และ 2) ควรเลือกการปรับปรุงระบบโครงข่ายแบบที่ 2 คือทำการปรับปรุงทางเชื่อม a_1 เมื่อต้นทุนจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้มีค่ามากกว่า 110.5 แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า ควรใช้ระบบโครงข่ายเดิม



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ของต้นทุนเฉลี่ยกับต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่าย

จากตัวอย่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การนำต้นทุนเฉลี่ยมาช่วยในการพิจารณาปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้น จะทำให้เราเลือกตัดสินใจแนวทางการปรับปรุงระบบโครงข่ายได้ดีขึ้น ถึงแม้ว่าในบางครั้งจะไม่สามารถคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยที่แท้จริงได้เนื่องจากไม่ทราบต้นทุนที่แน่นอนอันเนื่องมาจากการไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่ายได้ แต่ก็ยังสามารถประเมินโดยสังเขปได้ว่า เมื่อต้นทุนดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงใด แล้วควรเลือกปรับปรุงระบบโครงข่ายด้วยแนวทางใด ดังที่แสดงให้เห็นในตัวอย่าง

3.4 สรุป

ในการประเมินสมรรถนะของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน ด้วยต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost Index) จะอาศัยพื้นฐานมาจากการประเมินความน่าเชื่อถือซึ่งสามารถประเมินได้ 2 วิธี ได้แก่ การคำนวณโดยตรงและการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล โดยแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน จากการทดลองผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างจำนวน 16 ตัวอย่าง พบว่าวิธีการคำนวณโดยตรงนั้นเป็นวิธีที่ซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณแต่ให้ผลที่ถูกต้อง นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแปรตามความซับซ้อนและขนาดของระบบโครงข่าย โดยระบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นก็จะใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นด้วย ในขณะที่การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนแต่ค่าที่ได้จะเป็นค่าประมาณ นอกจากนี้

เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะไม่ได้แปรตามขนาดระบบโครงข่าย แต่จะแปรตามความแปรปรวนของต้นทุนของระบบโครงข่าย

หลังจากนั้นได้นำเสนอตัวอย่างในการนำต้นทุนเฉลี่ยไปใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย ผ่านทางเลือกที่มีหลายทางเลือก ซึ่งจากตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า ถ้าหากพิจารณาเพียงแต่ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่มีค่าสูงเพียงอย่างเดียว นั้น อาจจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้ระบบโครงข่ายมีค่าสูงเกินไป ดังนั้น เมื่อพิจารณาผ่านต้นทุนเฉลี่ย จะทำให้ได้ทางเลือกที่ดีที่สุด

บทที่ 4

การศึกษากระบวนการขนส่ง

ในบทที่ผ่านมา ได้นำเสนอวิธีในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย โดยในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยนั้นต้องมีข้อมูลเบื้องต้นของระบบโครงข่ายซึ่งได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยงของโครงข่าย ความน่าจะเป็นของแต่ละทางเชื่อมที่จะสามารถทำงานได้ รวมไปถึงค่าต้นทุนในการใช้ทางเชื่อมต่างๆ ดังนั้นในบทนี้ จะแสดงให้เห็นถึงการประเมินระบบโครงข่ายเบื้องต้นผ่านระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์สูงของ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด และนำข้อมูลโครงข่ายที่ได้มาประเมินหาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายต่อไป

ในการขนส่งปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด จะใช้การว่าจ้างผู้ประกอบการขนส่งสินค้าเป็นคนทำหน้าที่ในการขนส่งสินค้าจากโรงงานผลิตไปยังลูกค้า ซึ่งมีทั้งรถบรรทุก รถไฟ หรือเรือ ขึ้นอยู่กับจุดหมายปลายทางที่จะทำการส่ง จึงเปรียบเสมือนว่าผู้ขนส่งเหล่านี้เป็นทางเชื่อมในระบบโครงข่ายการขนส่ง ซึ่งในบางช่วงเวลาจะประสบกับปัญหาเกี่ยวกับการว่าจ้างผู้ขนส่ง จึงเปรียบเสมือนกับว่าทางเชื่อมเหล่านี้เกิดความไม่แน่นอนขึ้น ดังนั้นในการประเมินความน่าจะเป็นที่ผู้ขนส่งจะทำการเลือกรับขนส่งสินค้าตามปัจจัยต่างๆ นั้นจะต้องนำวิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 มาประยุกต์ใช้ และเมื่อได้ความน่าจะเป็นพร้อมกับต้นทุนในการขนส่งของผู้ขนส่ง จึงนำมาสร้างเป็นระบบโครงข่ายการขนส่งเพื่อทำการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายต่อไป

4.1 ความเป็นมา

ในการประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยเพื่อทำการประเมินระบบโครงข่าย จะทำการศึกษาผ่านระบบการขนส่งสินค้าของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

- โรงงานผลิตตั้งอยู่ที่เลขที่ 99 หมู่ที่ 9 และเลขที่ 219 หมู่ที่ 5 ถ.มิตรภาพ ก.ม. ที่ 129-131 ต.ทับกวาง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี 18260
- ผลิตปูนซีเมนต์เม็ด (Clinker) และปูนซีเมนต์ผงขายทั้งในและต่างประเทศ

ในการขายสินค้าในประเทศ จะมีทั้งแบบที่ลูกค้ามารับเองที่โรงงานสระบุรี และแบบที่จัดส่งให้กับลูกค้า โดยในส่วนของการจัดส่งสินค้าให้กับลูกค้าผ่านทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ไม่ได้ทำการขนส่งสินค้าเอง แต่จะทำการว่าจ้างผู้ประกอบการขนส่งสินค้าให้ทำการขนส่งสินค้าให้ โดยในการขนส่งปูนซีเมนต์นั้น จะต้องใช้รถขนส่งตามประเภทของลักษณะบรรทุกภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่ทำการขนส่ง เช่น

ปูนซีเมนต์เม็ด (Clinker) และปูนซีเมนต์ผง จะใช้รถพิเศษเฉพาะดังแสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนปูนซีเมนต์บรรจุถุง 50 กิโลกรัม (Bag) (รูปที่ 4.2) และ ปูนซีเมนต์บรรจุถุง 1,500 กิโลกรัม (Big Bag) (รูปที่ 4.3) จะใช้รถบรรทุก รถบรรทุกพ่วงหรือรถเทเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการขนส่ง



รูปที่ 4.1 รถขนปูนซีเมนต์ผง



รูปที่ 4.2 ปูนซีเมนต์บรรจุถุง 50 กิโลกรัม



รูปที่ 4.3 ปูนซีเมนต์บรรจุถุง 1500 กิโลกรัม



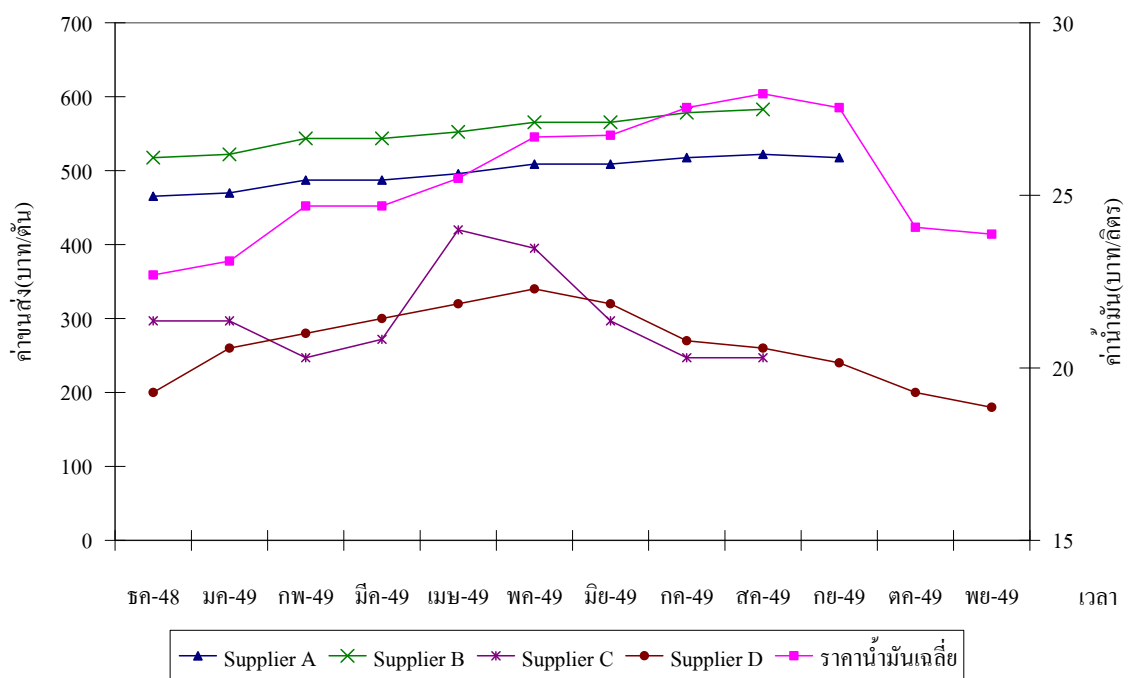
รูปที่ 4.4 รถบรรทุกพ่วง

จากข้อจำกัดในการขนส่งดังกล่าว จะเห็นได้ว่า รถที่ใช้ในการขนส่งปูนซีเมนต์เม็ดและปูนซีเมนต์ผง จะแทบไม่สามารถนำไปใช้ขนส่งสินค้าอื่นๆ ได้ (ยกเว้นนำไปใช้ขนวัสดุขุดบางอย่างที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์เอง) ทำให้ผู้ขนส่งเหล่านี้ไม่สามารถนำรถไปใช้ขนส่งสินค้าอื่นได้ ในขณะที่ปูนซีเมนต์ถุงนั้นสามารถใช้รถบรรทุกที่มีอยู่ทั่วไปขนส่งได้ ซึ่งหมายความว่ารถที่ใช้ในการขนส่งปูนซีเมนต์ถุงนั้นสามารถ

นำไปใช้ชนสินค้าอื่นได้เช่นกัน ดังนั้นเมื่อมีสินค้าอย่างอื่นที่ให้ราคาส่งดีกว่า ผู้ประกอบการขนส่งสินค้าอาจเปลี่ยนไปรับขนส่งสินค้าอย่างอื่นแทน ทำให้ระบบการขนส่งเกิดความไม่แน่นอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงระบบการขนส่งปูนซีเมนต์ถึงขนาด 50 กิโลกรัมที่ใช้รถบรรทุกทั่วไปเท่านั้น

ในการขนส่งปูนซีเมนต์ถึงนั้น ปูนซีเมนต์นครหลวงจะทำการแบ่งค่าจ้างออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าจ้างในการบรรทุกสินค้า และค่าจ้างในการขนถ่ายปูนซีเมนต์ถึงจากรถบรรทุกไปยังโกดังลูกค้า โดยค่าจ้างบรรทุกสินค้านั้นทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจะพิจารณาจากระยะทางในการขนส่ง น้ำหนักบรรทุกและราคาน้ำมันเป็นหลัก แต่ในส่วน of ค่าจ้างขนปูนถึงนั้น จะกำหนดไว้เป็นมาตรฐานอยู่แล้วตามชนิดของปูนถึง

จากการศึกษาข้อมูลราคาค่าขนส่งปูนซีเมนต์ถึงในเขตภาคอีสาน(ไม่รวมค่าขนถ่ายสินค้า) ย้อนหลังเปรียบเทียบกับราคาน้ำมันในแต่ละเดือนดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าแนวโน้มของราคาค่าขนส่งของผู้ขนส่ง A และ B จะมีแนวโน้มไปตามราคาน้ำมัน ในขณะที่ผู้ขนส่ง C และ D ที่แนวโน้มของราคาค่าขนส่งจะไม่แปรผันโดยตรงกับราคาน้ำมัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยในการรับขนส่งสินค้านั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับราคาน้ำมันเพียงอย่างเดียว

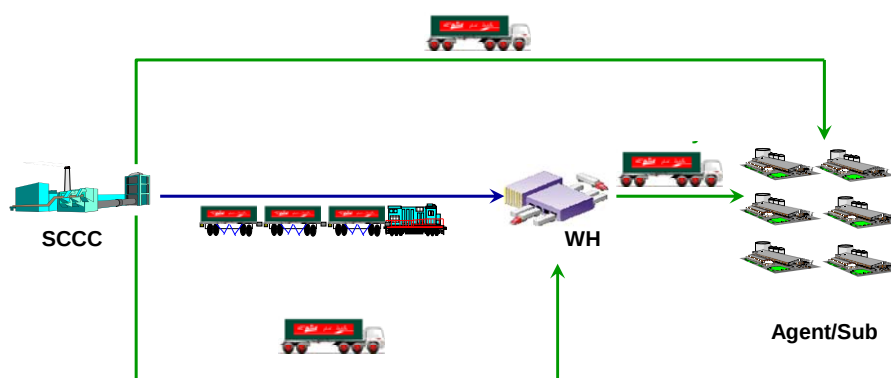


* หมายเหตุ ตัวเลขราคาค่าขนส่งดังกล่าว เป็นตัวเลขที่ลูกค้าคงที่ค่าหนึ่งทั้งหมดเนื่องจากข้อมูลจริงเป็นความลับของทางบริษัท

รูปที่ 4.5 แนวโน้มราคาน้ำมันและราคาค่าขนส่งในแถบภาคอีสาน*

4.2 การเก็บข้อมูล

ในการศึกษาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายการขนส่งนั้น จะใช้ตัวอย่างระบบการขนส่งสินค้าจากโรงงานผลิตที่สระบุรี ไปยังลูกค้าในจังหวัดอุบลราชธานี โดยในการขนส่งนั้นจะสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ทำการขนส่งสินค้าโดยตรงจากโรงงานที่สระบุรีไปยังลูกค้าโดยตรง ส่วนอีกกรณีคือการส่งจากคลังสินค้าในจังหวัดอุบลราชธานีไปยังลูกค้า ซึ่งในการขนส่งสินค้าจากสระบุรีไปยังคลังสินค้าสามารถทำได้ 2 รูปแบบ (Mode) ได้แก่ การขนส่งโดยรถบรรทุกและการขนส่งโดยรถไฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ระบบการขนส่งปูนซีเมนต์จากโรงงานสระบุรีไปยังลูกค้าที่อุบลราชธานี

ในการศึกษาต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายนี้ ต้องทำการประเมินหาความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้ซึ่งในที่นี้คือความน่าจะเป็นที่ผู้ประกอบการขนส่งแต่ละรายสามารถขนส่งสินค้าได้ ซึ่งในการประเมินหาความน่าจะเป็นในการขนส่งสินค้านั้น สามารถทำได้ 2 แบบ คือ

1. การเก็บข้อมูลจากสถิติการขนส่งในอดีต
ทำการรวบรวมข้อมูลการขนส่งจากผู้ประกอบการที่รับขนส่งปูนซีเมนต์ในอดีตเพื่อทำการประเมินหาความน่าจะเป็นในการที่ผู้ขนส่งแต่ละรายจะรับขนส่งปูนซีเมนต์ตามราคาที่กำหนดไว้
2. การประเมินผู้ขนส่งด้วยแบบจำลองจากการสอบถาม
วิธีการหนึ่งที่สามารถประเมินผู้ขนส่งคือการใช้แบบสอบถามโดยสร้างแบบจำลองของเหตุการณ์ต่างๆ แล้วให้ผู้ขนส่งตัดสินใจว่าจะทำการขนส่งสินค้าหรือไม่จากข้อกำหนดต่างๆ ในแบบจำลองเหตุการณ์ในแบบสอบถาม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นที่ผู้ขนส่งจะทำการรับขนส่ง โดยการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินทั้ง 2 วิธีประกอบกันทั้งนี้เพราะข้อมูลของผู้ขนส่งแต่ละรายมีความแตกต่างกัน ดังนี้

- การขนส่งด้วยรถไฟจากโรงงานไปยังคลังสินค้า จะใช้ข้อมูลการขนส่งในอดีตแต่ละเดือนในการประมาณความน่าจะเป็นที่รถไฟจะสามารถขนส่งสินค้าได้
- การขนส่งจากคลังสินค้าในจังหวัดอุบลราชธานีไปยังลูกค้า จะพิจารณาจากข้อมูลการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าว่า ลูกค้าได้รับสินค้าตามเวลาที่ต้องการหรือไม่
- การขนส่งด้วยรถบรรทุกจากสระบุรีไปยังคลังสินค้า จะใช้วิธีการประเมินผู้ขนส่งด้วยแบบสอบถามเนื่องจากไม่มีข้อมูลการขนส่งในอดีตที่สามารถนำมาใช้ประเมินหาความน่าเชื่อถือได้ ดังมีรายละเอียดดังนี้
 1. ศึกษา/สัมภาษณ์ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจการรับขนส่งสินค้า
 2. ออกแบบสอบถามตามปัจจัยที่ได้จากข้อ 1
 3. ทำการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งแต่ละราย
 4. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์
 5. สรุปผลการประเมินความน่าจะเป็นที่ผู้ประกอบการจะสามารถรับขนส่งสินค้าพร้อมค่าใช้จ่ายในการขนส่ง

จากการสอบถามนักวิเคราะห์การขนส่งของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัดและการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งเบื้องต้นพบว่า การรับขนส่งสินค้าจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยนอกเหนือจากราคาขนส่งและราคาน้ำมันเช่น ปริมาณการขนส่งที่ตกลงกัน (Committed Volume) การมีสินค้าเที่ยวกลับ (Back Hauling) หรือฤดูกาลในการขนส่ง ซึ่งจากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าราคาค่าขนส่งพุ่งสูงไปยังจังหวัดในแถบภาคอีสานนั้น ช่วงเดือนเมษายนและเดือนพฤษภาคมจะเป็นช่วงที่รถขนส่งส่วนใหญ่วิ่งรับส่งสินค้าเกษตร เช่น ทำการรับอ้อยเข้าโรงงานและรับน้ำตาลส่งไปยังท่าเรือแหลมฉบัง พร้อมกันนั้นยังเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการก่อสร้างทำให้เกิดการแย่งรถในการขนวัสดุก่อสร้าง ทำให้ราคาค่าขนส่งมีค่าสูงในช่วงดังกล่าว แต่ในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ราคาค่าขนส่งถูกลงเนื่องจากเป็นฤดูฝน ซึ่งไม่เหมาะกับการก่อสร้าง อีกทั้งไม่ใช่ฤดูการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร จึงไม่มีความต้องการในการใช้รถขนส่ง ทำให้ผู้ประกอบการขนส่งยอมรับราคาที่ต่ำเพื่อให้มีงานถึงแม้ว่าบางครั้งจะไม่ได้กำไรก็ตาม

จากการสอบถามเบื้องต้นดังกล่าว พบว่าผู้ประกอบการขนส่งมีปัจจัยหลายปัจจัยในการพิจารณารับงานขนส่งสินค้า แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญมากจะได้แก่ ราคาค่าขนส่ง ราคาน้ำมัน ลักษณะการว่าจ้างงานต่อเนื่องหรือรายครั้ง การมีสินค้าเที่ยวกลับ และ ฤดูกาลในการขนส่งสินค้า โดยจากข้อมูลที่ทำการศึกษาพบว่ามีปัจจัยมีระดับดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการตัดสินใจรับขนส่งสินค้าของผู้ขนส่ง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย
1. ราคาขนส่งสินค้า (บาท/ตัน/ก.ม.)	0.6-1.3
2. ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	22 / 25
3. การว่าจ้าง (Commit Volume)	ต่อเนื่อง / รายครั้ง
4. การมีสินค้าเที่ยวกลับ (Back Hauling)	มี / ไม่มี
5. ฤดูกาล	มีการขนส่งมาก / น้อย

จากระดับของปัจจัยต่างๆ ในตารางที่ 4.1 นำมาสร้างแบบสอบถามโดยใช้ การออกแบบแบบ Full Factorial เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามตอบคำถาม ว่ารับขนส่งหรือไม่รับนั้น จะได้จำนวนแบบสอบถามที่มาก ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ตอบแบบสอบถามเบื่อหน่ายและไม่ต้องการจะตอบแบบสอบถาม ดังนั้นจึงทำการออกแบบแบบสอบถามใหม่โดยใช้ปัจจัยเพียง 4 ตัว โดยไม่ใช้ราคาขนส่งแล้วทำการออกแบบแบบสอบถามแบบ Full factorial ซึ่งจะได้จำนวนแบบสอบถามทั้งหมด 16 ชุด โดยให้ผู้ตอบแบบสอบถามประมาณช่วงราคาขนส่งที่จะรับขนส่งสินค้าตามตัวอย่างแบบสอบถามดังแสดงในรูปที่ 4.7 หลังจากนั้นนำไปสอบถามกับผู้ประกอบการขนส่ง ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก ก.

ราคาขนส่งสินค้า	0.6 / 0.7 / 0.8 / 0.9 / 1.0 / 1.1 / 1.2 / 1.3	บาท/ตัน/กม.
ราคาน้ำมัน	22	(บาท/ลิตร)
การว่าจ้าง	ต่อเนื่อง	
การมีสินค้าเที่ยวกลับ	มี	
ฤดูกาล	มีการขนส่ง มาก	

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างแบบสอบถาม

4.3 แบบจำลองระบบการขนส่ง

จากการเก็บข้อมูล ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 นั้น จะได้ข้อมูลในแต่ละส่วนของแบบจำลองดังนี้

4.3.1 แบบจำลองของการขนส่งทางรถบรรทุก

ในการสร้างตัวแบบเพื่อการประเมินความน่าจะเป็นในการรับขนส่งสินค้าจากผลการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งตามแบบสอบถามที่ออกแบบไว้ จะทำการประเมินผ่านการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2

จากข้อมูลการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งดังแสดงในภาคผนวก ก. พบว่าสามารถแยกผู้ประกอบการได้เป็น 2 กลุ่ม เมื่อนำมาวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกด้วยโปรแกรม Minitab จะได้ผลดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

Binary Logistic Regression:

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
Result	1	98	(Event)
	0	94	
Total		192	

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	OddsRatio	95% Lower	CI Upper
Constant	-8.4036	5.31595	-1.67	0.094			
Price	32.5125	6.08196	5.35	0	1.32E+14	8.77E+08	1.98E+19
Oil	-1.09083	0.290131	-3.76	0	0.34	0.19	0.59
Contact	2.87332	0.826933	3.47	0.001	17.7	3.5	89.49
Back haul	6.92365	1.41801	4.88	0	1016.03	63.08	16366.03
Peak	-2.09168	0.760286	-2.75	0.006	0.12	0.03	0.55

Log-Likelihood = -32.014

Test that all slopes are zero: =202.056 DF =5 P-Value = 0.0000

Goodness-of-Fit Tests

Method	Chi-Square	DF	P
Pearson	29.7529	90	1.000
Deviance	25.2126	90	1.000
Hosmer-Lemeshow	1.5147	8	0.992

Measures of Association:

(Between the Response Variable and Predicted Probabilities)

Pairs	Number	Percent	Summary Measures	
Concordant	9041	98.1	Somers' D	0.97
Discordant	151	1.6	Goodman-Kruskal Gamma	0.97
Ties	20	0.2	Kendall's Tau-a	0.48
Total	9212	100		

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกของผู้ขนส่งกลุ่มที่ 1 ด้วย Minitab

Binary Logistic Regression:							
Link Function: Logit							
Response Information							
Variable	Value		Count				
Result		1	97	(Event)			
		0	127				
	Total	224					
Logistic Regression Table							
Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	OddsRatio	95% CI Lower	Upper
Constant	-45.5173	13.7073	-3.32	0.001			
Price	42.9343	10.6095	4.05	0.000	4.43E+18	4.12E+09	4.75E+27
Oil	-0.458958	0.260945	-1.76	0.079	0.63	0.38	1.05
Contact	8.31504	2.13165	3.9	0.000	4084.87	62.62	266485.33
Back haul	17.3999	4.25776	4.09	0.000	36032180.9	8558.71	1.51695E+11
Peak	-3.47698	1.18529	-2.93	0.003	0.03	0	0.32
Log-Likelihood		=-29.121					
Test that all slopes are zero:		=262.499,	DF =5	P-Value = 0.0000			
Goodness-of-Fit Tests							
Method	Chi-Square		DF	P			
Pearson	22.8872		106	1.000			
Deviance	13.5022		106	1.000			
Hosmer-Lemeshow	0.8061		8	0.999			
Measures of Association:							
(Between the Response Variable and Predicted Probabilities)							
Pairs	Number	Percent	Summary Measures				
Concordant	12235	99.3	Somers' D		0.99		
Discordant	73	0.6	Goodman-Kruskal Gamma		0.99		
Ties	11	0.1	Kendall's Tau-a		0.49		
Total	12319	100					

รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกของผู้ขนส่งกลุ่มที่ 2 ด้วย Minitab

การวิเคราะห์ผลลัพธ์จะเริ่มจากการพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้มานั้นมีคุณภาพดีเพียงพอต่อการนำมาวิเคราะห์การถดถอยหรือไม่ โดยพิจารณาผลการวิเคราะห์ Measures of Association ผ่านค่า Concordant ซึ่งจากรูป 4.8 พบว่ามีค่ามากถึง 99.3 % และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของ Somers'D มีค่าถึง 0.99 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงข้อมูลดังกล่าว มีความสัมพันธ์กันสามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ หลังจากนั้น ทำการอ่าน

ความสมรูปของตัวแบบผ่านค่า Goodness-of-Fit Tests ซึ่งจากตารางพบว่า ไม่ว่าจะทำการคำนวณด้วยวิธีของ Pearson, Deviance หรือ Hosmer-Lemeshow จะให้ค่า p-value ที่มีค่าสูง แสดงว่าข้อมูลดังกล่าวมีความเหมาะสมกับแบบจำลองการถดถอยโลจิสติก เมื่อพบว่าแบบจำลองดังกล่าวเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว จึงทำการพิจารณาต่อไปว่า ปัจจัยต่างๆที่กำหนดไว้นั้นส่งผลต่อการตัดสินใจรับขนส่งหรือไม่ ผ่านค่า p-value ของ Log-Likelihood ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า p-value มีค่าต่ำแสดงให้เห็นว่า มีปัจจัยอย่างน้อย 1 ตัวที่ส่งผลต่อการตัดสินใจ ดังนั้นจึงทำการพิจารณาค่า p-value ของแต่ละปัจจัย พบว่า ทุกปัจจัยมีผลต่อการตัดสินใจที่ระดับความมีนัยสำคัญ 0.1 แสดงว่า ปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษามีผลต่อการตัดสินใจรับขนส่งสินค้าของผู้ประกอบการ และจะได้รับความสัมพันธ์ของการตัดสินใจรับขนส่งสินค้ากับปัจจัยต่างๆ โดยการนำสัมประสิทธิ์ของแต่ละปัจจัยแทนลงในสมการที่ 2.15 เพื่อสร้างแบบจำลองการของผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1 ในการรับขนส่งสินค้าได้ตามความสัมพันธ์ที่ 4.1

$$\hat{\pi}_1(\underline{x}) = \frac{\exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)}{1 + \exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)} \quad (4.1)$$

ในส่วนของผู้ประกอบการกลุ่มที่ 2 จะทำการตีความเหมือนกับผู้ประกอบการกลุ่มที่ 1 และได้แบบจำลองการในการรับขนส่งสินค้าเป็นไปตามความสัมพันธ์ที่ 4.2

$$\hat{\pi}_2(\underline{x}) = \frac{\exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)}{1 + \exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)} \quad (4.2)$$

โดยที่

$\hat{\pi}_1(\underline{x}), \hat{\pi}_2(\underline{x}) =$	ความน่าจะเป็นในการรับขนส่งสินค้าจากเงื่อนไข
	$\underline{x} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ของผู้ประกอบการกลุ่มที่ 1 และ 2
x_1	= ราคาขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)
x_2	= ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)
x_3	= ลักษณะการวิ่ง (ต่อเนื่อง = 1, รายครั้ง = 0)
x_4	= การมีสินค้าเที่ยวกลับ (มี = 1, ไม่มี = 0)
x_5	= ฤดูกาล (มีปริมาณการขนส่งมาก = 1, มีปริมาณการขนส่งน้อย = 0)

4.3.2 แบบจำลองการขนส่งด้วยรถไฟ

ในการขนส่งด้วยรถไฟ ทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ได้กำหนดปริมาณการขนส่งไว้ที่ 4,000 ตันต่อเดือน ซึ่งเมื่อตรวจสอบข้อมูลการขนส่งจริงในอดีตพบว่า ปริมาณการขนส่งนั้นจะต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดไว้ อันเนื่องมาจาก ในบางครั้งทางรถไฟไม่สามารถหาหัวลากมาทำการลากตู้สินค้าไป

ยังจุดหมายปลายทางได้ ดังนั้น จึงทำการประมาณหาความน่าจะเป็นที่รถไฟจะสามารถทำการขนส่งสินค้าตามที่กำหนดไว้โดยการคำนวณหาสัดส่วนของการส่งสินค้าในแต่ละเดือนเทียบกับปริมาณที่กำหนดไว้ ซึ่งจะได้ความน่าจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ราคาและความน่าจะเป็นในการขนส่งด้วยรถไฟ

เดือน	ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น
ม.ค.-06	302	0.864
ก.พ.-06	302	0.936
มี.ค.-06	339	0.608
เม.ย.-06	339	0.481
พ.ค.-06	349	0.288
มิ.ย.-06	N/A	0.000
ก.ค.-06	349	0.144
ส.ค.-06	358	0.432
ก.ย.-06	358	0.432
ต.ค.-06	357	0.288
พ.ย.-06	352	0.288
ธ.ค.-06	352	0.144

แต่จากข้อมูลในตารางพบว่า ความน่าจะเป็นตั้งแต่เดือนมีนาคมจนถึงเดือนธันวาคมมีค่าต่ำมากและเมื่อทำการทวนสอบข้อมูลพบว่า ตั้งแต่เดือนมีนาคม ค่าขนส่งทางรถไฟมีการปรับตัวสูงขึ้น ทำให้ทางบริษัทลดปริมาณการส่งสินค้าผ่านทางรถไฟ ดังนั้นข้อมูลการส่งสินค้าด้วยรถไฟในช่วงดังกล่าว จึงไม่สามารถนำมาใช้แทนความน่าจะเป็นในการขนส่งด้วยรถไฟได้ ดังนั้นข้อมูลในส่วนของการขนส่งด้วยรถไฟนั้น จะนำไปใช้ประเมินระบบได้เฉพาะข้อมูลในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์เท่านั้น

4.3.3 แบบจำลองของคลังสินค้าและการขนส่งต่อไปยังลูกค้า

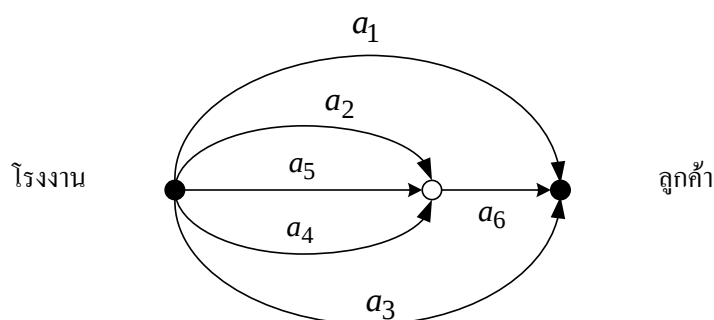
ในส่วนของคลังสินค้าและการขนส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า นั้น ทางบริษัทได้ทำการว่าจ้างผู้ขนส่งเพียงรายเดียวในการขนส่งสินค้าด้วยอัตราค่าขนส่งที่คงที่ ดังนั้นในการประเมินหาความน่าจะเป็น จะใช้ข้อมูลการขนส่งจากคลังไปยังลูกค้าที่มีในอดีต ว่าคลังสินค้าสามารถจัดส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้ตามเวลาหรือไม่ ซึ่งผลดังกล่าวจะรวมถึงถึงการมีสินค้าในคลังสินค้าและผู้ขนส่งสามารถขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าได้ตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากการที่ลูกค้าได้รับสินค้าตรงเวลาแสดงว่า มีสินค้าที่คลังและมีรถพร้อมขนส่ง แต่

ถ้าลูกค้าไม่ได้รับสินค้าตามเวลาที่ต้องการแสดงว่าไม่มีสินค้าหรือไม่มีรถในการขนส่ง ดังนั้นสัดส่วนของจำนวนครั้งที่สามารถส่งสินค้าได้ตรงตามเวลาที่เทียบกับจำนวนครั้งที่จัดส่งสินค้าให้ลูกค้า จะมีค่าเป็นความน่าเชื่อถือของทางเชื่อนี้ ซึ่งจากการพิจารณาข้อมูลการจัดส่งในอดีตจะได้ความน่าจะเป็นในการส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปยังลูกค้าดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ราคาและความน่าจะเป็นในการขนส่งสินค้าจากคลังไปยังลูกค้า

เดือน	ต้นทุนในการจัดเก็บและดำเนินงานที่คลังรวมกับค่าขนส่งไปยังลูกค้า (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น
ม.ค.-06	146	0.567
ก.พ.-06	169	0.604
มี.ค.-06	127	0.314
เม.ย.-06	133	0.307
พ.ค.-06	146	0.314
มิ.ย.-06	164	0.498
ก.ค.-06	183	0.650
ส.ค.-06	171	0.605
ก.ย.-06	172	0.755
ต.ค.-06	149	0.665
พ.ย.-06	210	0.851
ธ.ค.-06	139	0.922

จากลักษณะโครงข่ายการขนส่งในรูปที่ 4.6 รวมกับแบบจำลองการขนส่งทางรถบรรทุก รถไฟ คลังสินค้าและขนส่งต่อเนื่อง ข้างต้นทั้งหมด สามารถนำมาเขียนเป็นระบบโครงข่ายที่จะใช้ในการศึกษาได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์สูง

โดยที่

- a_1 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกกลุ่มที่ 1 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีตรงไปยังลูกค้ามีระยะทางโดยมีระยะทาง 520 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 4.1
- a_2 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกกลุ่มที่ 1 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีไปยังคลังสินค้าโดยมีระยะทาง 500 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 4.1
- a_3 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกกลุ่มที่ 2 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีตรงไปยังลูกค้ามีระยะทางโดยมีระยะทาง 520 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 4.2
- a_4 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกกลุ่มที่ 2 ในการส่งสินค้าจากโรงงานสระบุรีไปยังคลังสินค้าโดยมีระยะทาง 500 กม. และมีความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามสมการที่ 4.2
- a_5 แทน การขนส่งด้วยรถไฟจากโรงงานไปยังคลังสินค้า โดยมีความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามตารางที่ 4.2
- a_6 แทน คลังสินค้าและการส่งสินค้าไปจากคลังไปยังลูกค้า โดยมีความน่าจะเป็นและราคาเป็นไปตามตารางที่ 4.3

เมื่อได้แบบจำลองโครงข่ายแล้ว จะนำต้นทุนเฉลี่ยมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบโครงข่าย โดยทำการกำหนดเหตุการณ์และคำนวณต้นทุนเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบโครงข่ายต่อไป

4.4 ผลของค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย

ในการศึกษาผลของค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย นั้นจะทำการกำหนดเหตุการณ์หรือเงื่อนไขต่างๆ เพื่อทำการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้น โดยทำการกำหนดเหตุการณ์ต่างๆ ดังนี้

ราคาน้ำมัน 22.00 บาท/ลิตร

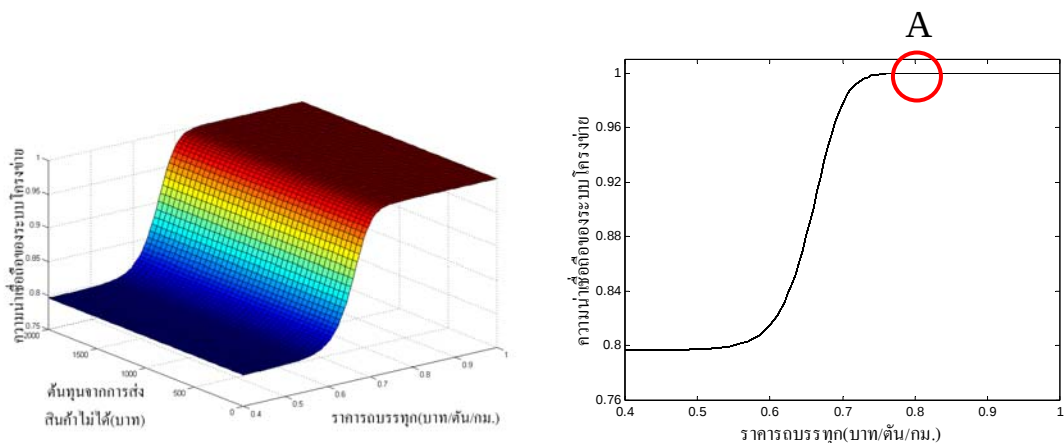
โดยเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องในช่วงที่มีการขนส่งและมีสินค้าเที่ยวกลับ

ต้นทุนการขนส่งด้วยรถไฟ 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864

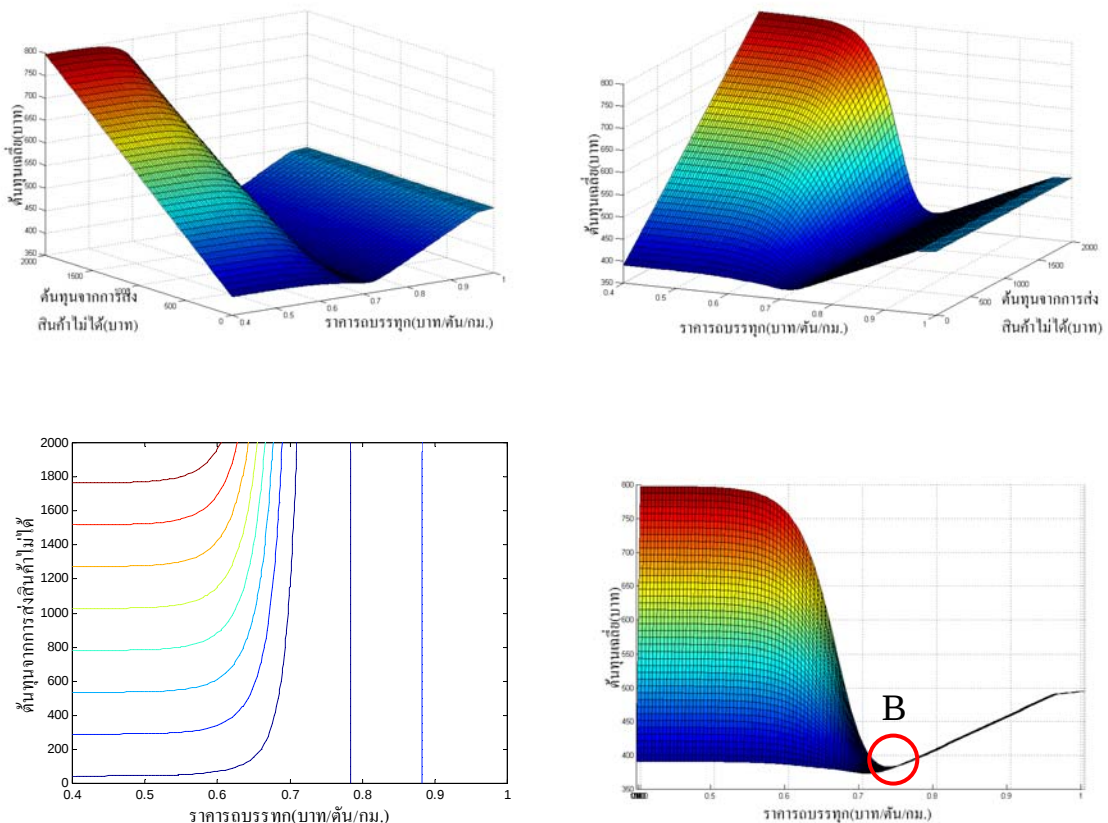
ต้นทุนการผ่านคลังและจัดส่งให้ลูกค้า 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการประเมินหาค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย พบว่าการกำหนดราคาค่าขนส่งรถบรรทุกจากการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นเพียงอย่างเดียวนั้น จะทำให้ราคาค่าขนส่งที่ได้อาจมีค่าสูงเกินไป อีกทั้งยังไม่สะท้อนถึงผลของต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ จากรูปที่ 4.11 พบว่าราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ระบบโครงข่ายมีความน่าเชื่อถือมาก ควรมีค่าประมาณ 0.8 บาท/ตัน/กม. ช่วงราคาที่ต่ำกว่า 0.8 บาท/ตัน/ก.ม. ถึง 0.6 บาท/ตัน/ก.ม. จะมีการลดลงของความน่าเชื่อถือของระบบอย่างรวดเร็ว รูปที่ 4.11 ยังบอกด้วยว่า การเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่า 0.8 บาท/ตัน/ก.ม. ก็ไม่ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเพิ่มมากขึ้นนัก

แต่เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของต้นทุนการขนส่งและค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย โดยใช้ค่าต้นทุนเฉลี่ยพบว่า ต้นทุนเฉลี่ยนั้นมีค่าแตกต่างกันไปตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ โดยจากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ต้นทุนราคาค่าขนส่งรถบรรทุกนั้น ควรมีค่าประมาณ 0.75 บาท/ตัน/กม. จึงจะทำให้ต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งนี้มีค่าต่ำสุด หากราคาค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกน้อยกว่านี้ ระบบโครงข่ายอาจมีปัญหาด้านความน่าเชื่อถือ ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยแปรผันตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ ดังรูปที่ 4.12 แต่หากราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่า 0.75 บาท/ตัน/กม. การเพิ่มขึ้นของต้นทุนเฉลี่ยจะมีอิทธิพลจากการเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าระบบโครงข่ายมีความน่าเชื่อถือมากพอแล้ว (ดังรูปที่ 4.12 เช่นกัน)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อความน่าเชื่อถือของระบบ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย

4.5 ผลของปัจจัยต่างๆของการขนส่งด้วยรถบรรทุกที่มีต่อต้นทุนเฉลี่ย

นอกจากราคาค่าขนส่งรถบรรทุกกับต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งไม่ได้ จะมีผลต่อต้นทุนเฉลี่ยดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยเช่นกัน ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อต้นทุนเฉลี่ย โดยในการศึกษาจะใช้กรณีในหัวข้อ 4.4 เป็นกรณีเปรียบเทียบ และทำการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ที่ละปัจจัย โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงราคาน้ำมันจาก 22 บาท/ลิตร เป็น 25 บาท/ลิตร เป็นกรณีที่ 2 และทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะการว่าจ้าง การมีสินค้าที่ขยับกลับและฤดูกาลขนส่งในกรณีที่ 3-5 ตามลำดับ เพื่อดูผลของต้นทุนเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปจากแต่ละปัจจัย โดยกำหนดให้ต้นทุนการขนส่งด้วยรถไฟเป็น 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864 และต้นทุนการผ่านคลังและจัดส่งให้ลูกค้าเป็น 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

ตารางที่ 4.4 ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด

กรณี	การขนส่งด้วยรถบรรทุก				ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยต่ำสุด (บาท/ตัน/กม.)	เปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ 1 (%)
	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การว่าจ้าง	สินค้าที่ขากลับ	ฤดูกาลขนส่ง		
1	22.00	ต่อเนื่อง	มี	น้อย	0.75	-
2	25.00	ต่อเนื่อง	มี	น้อย	0.78	+4.0
3	22.00	รายครั้ง	มี	น้อย	0.86	+14.6
4	22.00	ต่อเนื่อง	ไม่มี	น้อย	1.05	+40.0
5	22.00	ต่อเนื่อง	มี	มาก	0.80	+6.7

ผลการศึกษาแสดงในภาคผนวก ง. โดยมีค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด แสดงในตารางที่ 4.4 จากผลดังกล่าวพบว่า การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ จะส่งผลให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันดังนี้

- การมีสินค้าที่ขากลับ ส่งผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากที่สุด คือหากไม่มีสินค้าที่ขากลับจะทำให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกเพิ่มขึ้น 0.3 บาท/ตัน/กม.(เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 กับกรณีที่ 1) หรือคิดเป็น 40% ของราคาเดิม
- รูปแบบการว่าจ้างต่อเนื่องหรือรายครั้งนั้น จะมีผลรองลงมาคือ เมื่อไม่ว่าจ้างแบบต่อเนื่อง แต่ใช้การว่าจ้างเป็นรายครั้ง จะทำให้ราคาขนส่งรถบรรทุกเพิ่มขึ้นประมาณ 14.6%
- ฤดูกาลขนส่ง จะมีผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุก โดยในช่วงที่มีการขนส่งมาก จะทำให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าสูงขึ้นประมาณ 6.7 %
- ในส่วนของราคาน้ำมันนั้น เมื่อราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นประมาณ 10% จะส่งผลให้ราคาค่าขนส่งปรับตัวขึ้น 4%

จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านการมีสินค้าที่ขากลับและลักษณะการว่าจ้าง จะส่งผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่าราคาน้ำมันและฤดูกาล

ดังนั้นในการพิจารณาราคาขนส่งรถบรรทุกนั้นควรจะมีการพิจารณาจากปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ด้วย ซึ่งจากข้อมูลแบบจำลองระบบโครงข่ายในหัวข้อ 4.3 เมื่อลองนำมาประเมินหาต้นทุนเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดตามปัจจัยที่เกิดขึ้น จะได้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ราคาขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดในแต่ละเดือนเมื่อเป็นการว่าจ้างแบบรายครั้งและไม่มีสินค้าที่ยกกลับ

เดือน	การขนส่งด้วยรถบรรทุก				การขนส่งด้วยรถไฟ		คลังสินค้าและการขนส่งจากคลังไปยังลูกค้า		ราคาขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด (บาท/ตัน/กม.)
	ราคาน้ำมัน	การว่าจ้าง	สินค้าที่ยกกลับ	ฤดูกาลขนส่ง	ต้นทุน (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น	ต้นทุน (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น	
ม.ค.	23.69	รายครั้ง	ไม่มี	สูง	302	0.864	146	0.567	1.25
ก.พ.	24.69	รายครั้ง	ไม่มี	สูง	302	0.864	169	0.604	1.27
มี.ค.	24.69	รายครั้ง	ไม่มี	สูง	339	0.864	127	0.314	1.29
เม.ย.	25.49	รายครั้ง	ไม่มี	สูง	339	0.864	133	0.307	1.32
พ.ค.	26.69	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	349	0.864	146	0.314	1.30
มิ.ย.	26.74	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	349	0.864	164	0.498	1.30
ก.ค.	27.54	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	349	0.864	183	0.650	1.31
ส.ค.	27.94	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	358	0.864	171	0.605	1.34
ก.ย.	27.54	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	358	0.864	172	0.755	1.31
ต.ค.	24.94	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	357	0.864	149	0.665	1.23
พ.ย.	23.84	รายครั้ง	ไม่มี	ต่ำ	352	0.864	210	0.851	1.18
ธ.ค.	23.84	รายครั้ง	ไม่มี	สูง	352	0.864	139	0.922	1.24

ตารางที่ 4.6 ราคาขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุดในแต่ละเดือนเมื่อเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องและมีสินค้าที่ยกกลับ

เดือน	การขนส่งด้วยรถบรรทุก				การขนส่งด้วยรถไฟ		คลังสินค้าและการขนส่งจากคลังไปยังลูกค้า		ราคาต้นทุนเฉลี่ยที่ต่ำสุดที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด (บาท/ตัน/กม.)
	ราคาน้ำมัน	การว่าจ้าง	สินค้าที่ยกกลับ	ฤดูกาลขนส่ง	ต้นทุน (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น	ต้นทุน (บาท/ตัน)	ความน่าจะเป็น	
ม.ค.	23.69	ต่อเนื่อง	มี	สูง	302	0.864	146	0.567	0.85
ก.พ.	24.69	ต่อเนื่อง	มี	สูง	302	0.864	169	0.604	0.87
มี.ค.	24.69	ต่อเนื่อง	มี	สูง	339	0.864	127	0.314	0.88
เม.ย.	25.49	ต่อเนื่อง	มี	สูง	339	0.864	133	0.307	0.90
พ.ค.	26.69	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	349	0.864	146	0.314	0.85
มิ.ย.	26.74	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	349	0.864	164	0.498	0.85
ก.ค.	27.54	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	349	0.864	183	0.650	0.85
ส.ค.	27.94	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	358	0.864	171	0.605	0.86
ก.ย.	27.54	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	358	0.864	172	0.755	0.84
ต.ค.	24.94	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	357	0.864	149	0.665	0.81
พ.ย.	23.84	ต่อเนื่อง	มี	ต่ำ	352	0.864	210	0.851	0.77
ธ.ค.	23.84	ต่อเนื่อง	มี	สูง	352	0.864	139	0.922	0.84

4.6 เปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยของการขนส่งโดยการเลือกใช้เส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อนกับการใช้เส้นทางที่ผ่านคลังก่อน

เนื่องจากการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยที่นำเสนอในบทที่ 3 นั้น จะเป็นต้นทุนเฉลี่ยบนเงื่อนไขการเลือกทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อนเสมอ แต่ในระบบการขนส่งจริงนั้นอาจไม่ได้เลือกใช้ทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อนเสมอ เนื่องจากสาเหตุใดๆ ก็ตาม ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยในกรณีที่ใช้ทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อนกับกรณีที่ทำให้มีการขนส่งผ่านคลังก่อน โดยในการศึกษาเปรียบเทียบจะทำการกำหนดเงื่อนไขในการศึกษาเหมือนกันดังนี้

ราคาน้ำมัน 23.69 บาท/ลิตร

โดยเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องในช่วงที่มีการขนส่งสูงและมีสินค้าที่ยกกลับ

ต้นทุนการขนส่งด้วยรถไฟ 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864

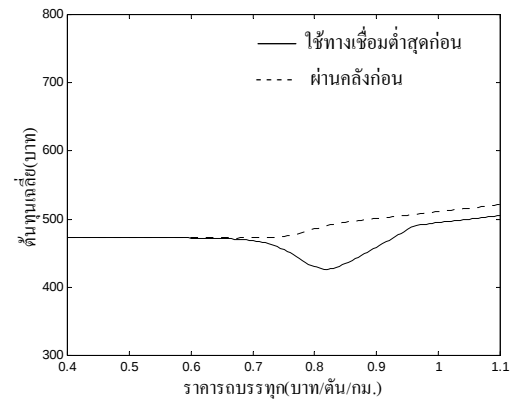
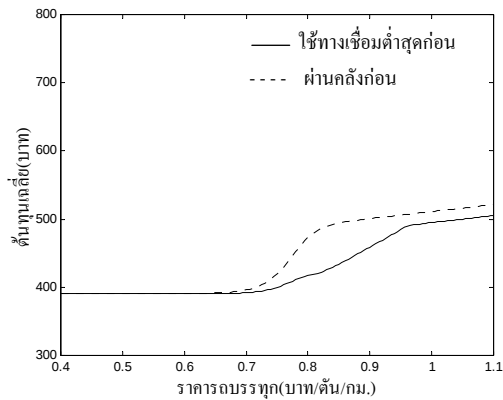
ต้นทุนการผ่านคลังและจัดส่งให้ลูกค้า 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

เมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทำการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่เลือกใช้ทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อนเสมอ และกรณีที่ 2 คือ กรณีที่เลือกใช้ทางเชื่อมที่ผ่านคลังก่อน ได้ผลการประเมินดังแสดงในรูปที่ 4.13 ก. ถึง จ. พบว่าในช่วงที่ราคาของรถบรรทุกมีค่าต่ำนั้น ต้นทุนเฉลี่ยในกรณีที่ใช้การขนส่งผ่านคลังสินค้าก่อน กับทางเลือกทางเชื่อมที่ราคาถูกก่อนนั้น มีค่าเท่ากันไม่ว่าต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้จะมีค่าเท่าใดก็ตาม เนื่องจากความน่าจะเป็นที่จะขนส่งด้วยรถบรรทุกมีค่าน้อยในช่วงราคานี้ การขนส่งส่วนใหญ่จึงต้องส่งด้วยรถไฟซึ่งเป็นการขนส่งผ่านคลังทำให้ต้นทุนเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อราคาค่าขนส่งมีค่าสูงมากขึ้น ความน่าจะเป็นในการขนส่งด้วยรถบรรทุกมีค่ามากขึ้นด้วย ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยในกรณีที่ผ่านคลังสินค้านี้มีค่าสูงกว่าเสมอ ไม่ว่าต้นทุนเฉลี่ยจะมีค่าเท่าไรก็ตาม เนื่องจากมีผลของค่าใช้จ่ายในการจัดการที่คลังเพิ่มขึ้นมา

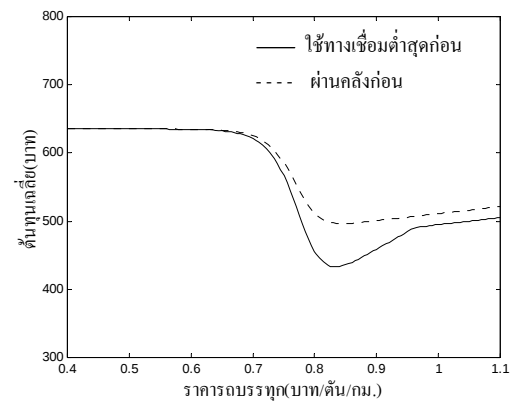
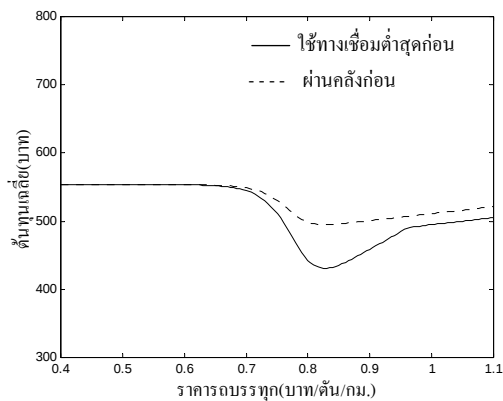
4.7 สรุป

จากการวิเคราะห์ระบบการขนส่งปูนซีเมนต์ลงในเขตภาคอีสาน ซึ่งเป็นระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอน อันเนื่องมาจากการรับขนส่งสินค้าของผู้ประกอบการขนส่งด้วยราคาที่กำหนดให้นั้น ไม่ได้มีเพียงผลมาจากราคาน้ำมันเพียงอย่างเดียวแต่จะมีผลมาจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งได้แก่ รูปแบบการว่าจ้าง การมีสินค้าที่ยกกลับ และช่วงฤดูในการขนส่ง ดังนั้นในการกำหนดราคาค่าขนส่งให้กับผู้ประกอบการนั้นควรพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ประกอบด้วย โดยสามารถสร้างความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก

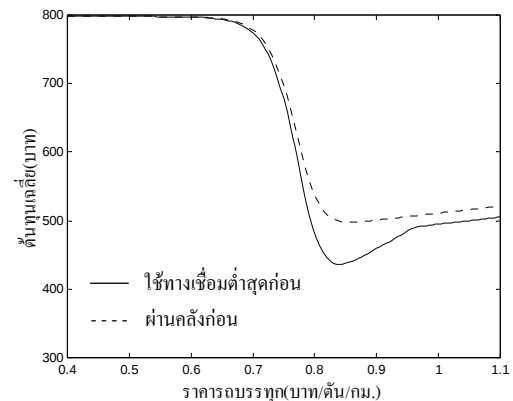
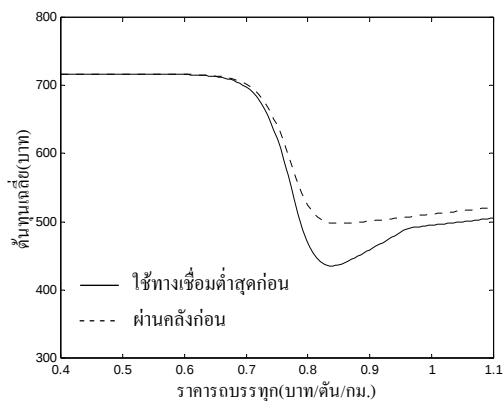
นอกจากนี้ในการกำหนดราคาค่าขนส่งนั้น หากพิจารณาแต่ต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งเพียงอย่างเดียว อาจทำให้ระบบการขนส่งนั้นมีต้นทุนการขนส่งที่ต่ำแต่อาจเกิดต้นทุนอันเนื่องมาจากการส่งสินค้าไม่ได้ขึ้นมาแทน ดังนั้นจึงควรพิจารณาการขนส่งผ่านต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่ง ซึ่งเป็นการคิดต้นทุนจากการขนส่งและต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งไม่ได้เข้าด้วยกันแล้ว



ก. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=0 บาท ข. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=400 บาท



ค. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=800 บาท ง. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=1200 บาท



จ. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=1600 บาท

ฉ. ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้=2000 บาท

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบผลของราคาส่งต่อต้นทุนเฉลี่ยในกรณีที่ส่งผ่านคลังกับกรณีที่เลือกทางเชื่อมที่มีต้นทุนต่ำสุดก่อน

บทที่ 5

สรุปรายงานความก้าวหน้า

5.1 สรุปผล

การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนในปัจจุบัน นิยมใช้การประเมินผ่านค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของระบบโครงข่าย โดยมีผู้ทำการศึกษาการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายในรูปแบบและเงื่อนไขที่แตกต่างกันออกไปมากมาย แต่การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนด้วยความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว อาจไม่สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการตัดสินใจประเมินระบบโครงข่ายดังกล่าวที่ดีพอ เนื่องจากยังขาดการพิจารณาต้นทุนที่เกิดจากการใช้ระบบโครงข่ายที่ไม่แน่นอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนโดยการใช้ต้นทุนในการใช้เส้นทางร่วมกับความน่าเชื่อถือของเส้นทางมาประเมินเป็นต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย ผ่านการคำนวณหาค่าคาดหวัง (Expected Value) ซึ่งได้นำเสนอวิธีการในการประเมิน 2 วิธี ได้แก่ การประเมินโดยการคำนวณโดยตรง และการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

วิธีการคำนวณโดยตรงมีพื้นฐานมาจากการหาค่าคาดหวังของต้นทุนที่เกิดขึ้นในการใช้ระบบโครงข่ายรวมกับการใช้มินิมัลพาตและทฤษฎีของ Sum of Disjoint Products ซึ่งจะได้สมการในการหาค่าคาดหวังของต้นทุนเป็น

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \left[\Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \left[\Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \right] \right] + C_u(1-R) \quad (5.1)$$

โดยที่

Y_i	=	มินิมัลพาตลำดับที่ i
$C(Y_i)$	=	ต้นทุนที่เกิดจากการใช้เส้นทางมินิมัลพาต Y_i โดยเรียงลำดับตามต้นทุนที่น้อยสุดไปถึงมากที่สุด
$\Pr(Y_i)$	=	ความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จากการใช้มินิมัลพาต เมื่อไม่สามารถใช้มินิมัลพาต $Y_1, Y_2, \dots, Y_{i-1}$ ได้
C_u	=	ต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้เช่น ค่าปรับต่างๆ
R	=	ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นการอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสุ่มผ่านแบบจำลองที่จำลองพฤติกรรมของระบบจริง โดยการสุ่มนั้นจะถูกกระทำซ้ำหลายๆ ครั้งจนกว่าค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจเข้าสู่ค่าหนึ่ง โดยต้นทุนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{C}_t = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t C(Z_i) \quad (5.2)$$

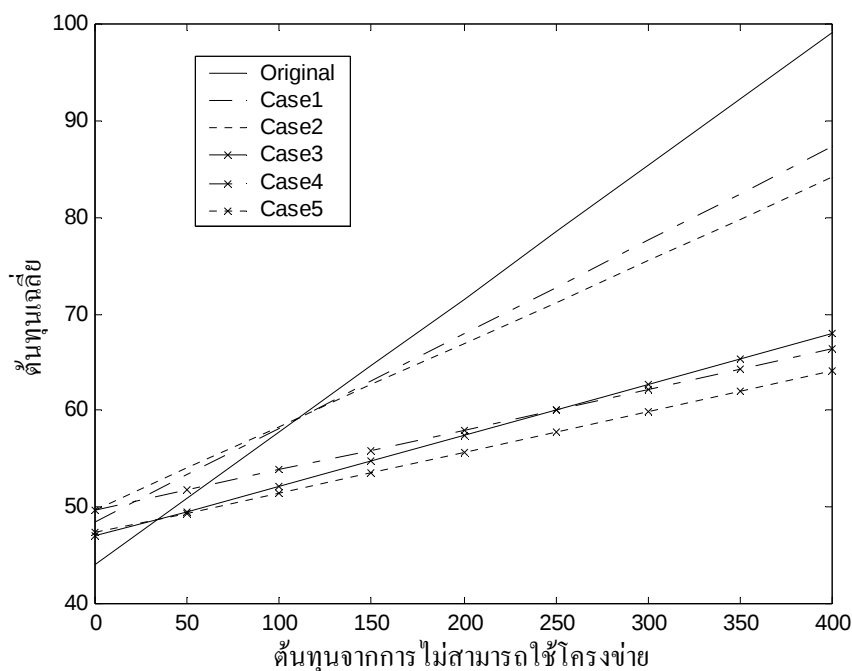
โดยที่

Z_i = มินิมัลพาที่ไ้จากการสุ่มเหตุการณ์ครั้งที่ i
 $C(Z_i)$ = ต้นทุนของการใช้มินิมัลพา
 t = จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทำการสุ่มเหตุการณ์

ทั้งวิธีการคำนวณโดยตรง และการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันจากการทดลองผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างในลักษณะต่างๆ จำนวน 16 ตัวอย่าง พบว่าวิธีการคำนวณโดยตรงนั้น เป็นวิธีที่ซับซ้อนและยุ่งยากในการคำนวณ แต่ให้ผลที่ถูกต้อง นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะแปรตามความซับซ้อนและขนาดของระบบโครงข่าย โดยระบบโครงข่ายที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นก็จะใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นด้วย ในขณะที่การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณ นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะไม่ได้แปรตามขนาดระบบโครงข่าย แต่จะแปรตามความแปรปรวนของต้นทุนที่เกิดขึ้นในระบบโครงข่าย

หลังจากได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายแล้ว ถัดมาได้นำเสนอตัวอย่างในการนำต้นทุนเฉลี่ยไปใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจผ่านระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 2 ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายผ่านทางเลือกทั้งหมด 5 ทางเลือก ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งจากตัวอย่างแสดงให้เห็นว่า ทางเลือกในการปรับปรุงโครงข่ายที่ดีที่สุดนั้น ไม่ได้พิจารณาจากความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่มีค่าสูงขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับต้นทุนอันเนื่องมาจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ว่ามีค่าน้อยเท่าไรด้วย

ในการประยุกต์ใช้งานต้นทุนเฉลี่ยกับระบบขนส่งจริงนั้น ได้นำเสนอตัวอย่างโดยใช้ระบบโครงข่ายการขนส่งปูนซีเมนต์ในเขตภาคอีสาน ซึ่งการขนส่งปูนซีเมนต์นี้จะทำการว่าจ้างผู้ประกอบการขนส่งเป็นผู้ขนส่งปูนซีเมนต์จากโรงงานที่สระบุรี ในระบบการส่งนี้จะมีการขนส่ง 2 รูปแบบ คือการขนส่งด้วยรถบรรทุกซึ่งเป็นการว่าจ้างผู้รับขนส่งสินค้า และการขนส่งโดยรถไฟ ซึ่งในบางครั้งจะมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของต้นทุนเฉลี่ยกับต้นทุนที่เกิดจากการไม่สามารถใช้ระบบโครงข่าย

ในขั้นตอนแรกก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ระบบการขนส่งโดยใช้ต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งนี้ จะต้องทำการประเมินความน่าจะเป็นของทางเชื่อมในระบบการขนส่งก่อน โดยใช้ทางเชื่อมในระบบการขนส่งในที่นี้แทนผู้ประกอบการขนส่งแต่ละราย ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้จะประเมินจากการที่ผู้ขนส่งเหล่านั้นสามารถขนส่งสินค้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยแบ่งทางเชื่อมในระบบโครงข่ายการขนส่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ทางเชื่อมที่เป็นรถไฟ ทางเชื่อมที่เป็นการขนส่งจากคลังไปยังลูกค้า และผู้ประกอบการขนส่งด้วยรถบรรทุกจากสระบุรี โดยความน่าจะเป็นของทางเชื่อม 2 ประเภทแรกคือ รถไฟและการขนส่งจากคลังสินค้านั้น จะทำการประเมินความน่าจะเป็นผ่านข้อมูลในอดีต แต่ในส่วนของผู้ประกอบการขนส่งสินค้าด้วยรถบรรทุกนั้นไม่สามารถหาข้อมูลในอดีตได้ จึงต้องทำการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นในการตัดสินใจรับส่งสินค้าของผู้ประกอบการขนส่งสินค้า

จากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งเบื้องต้น พบว่าปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจรับขนส่งสินค้าได้แก่ ราคาค่าขนส่งที่ได้รับ ค่าน้ำมัน ลักษณะการว่าจ้างขนส่ง การมีสินค้าที่ยกกลับ และฤดูกาลในการขนส่ง ดังนั้นจึงทำการออกแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลโดยการจำลองเหตุการณ์บนปัจจัยต่างๆ เพื่อสอบถามผู้ประกอบการขนส่งว่า ด้วยเหตุการณ์ดังกล่าวจะรับขนส่งสินค้าหรือไม่ หลังจากนั้น นำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่อไป

แต่เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เป็นลักษณะของการตอบว่า รับหรือไม่รับ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้ จึงต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกและได้แบบจำลองของผู้ประกอบการ 2 กลุ่มดังสมการที่ (5.3) และ (5.4)

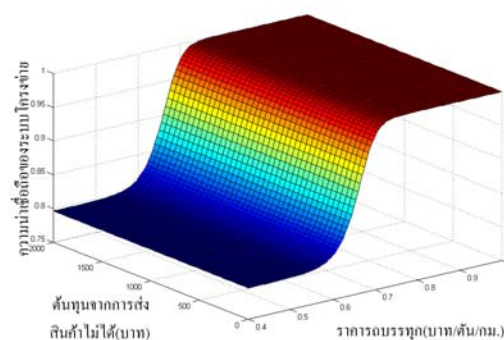
$$\hat{\pi}_1(\underline{x}) = \frac{\exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)}{1 + \exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)} \quad (5.3)$$

$$\hat{\pi}_2(\underline{x}) = \frac{\exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)}{1 + \exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)} \quad (5.4)$$

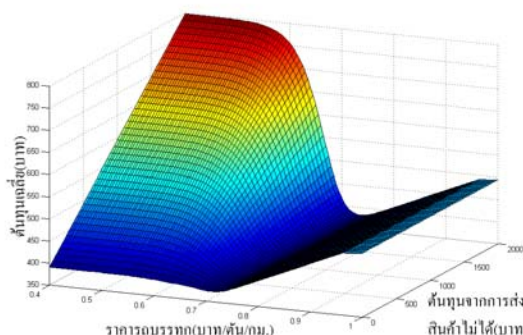
โดยที่

$\hat{\pi}_1(\underline{x}), \hat{\pi}_2(\underline{x}) =$	ความน่าจะเป็นในการรับขนส่งสินค้าจากเงื่อนไข
	$\underline{x} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ของผู้ประกอบการกลุ่มที่ 1 และ 2
$x_1 =$	ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)
$x_2 =$	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)
$x_3 =$	ลักษณะการว่าจ้าง (ต่อเนื่อง = 1, รายครั้ง = 0)
$x_4 =$	การมีสินค้าที่ยกกลับ (มี = 1, ไม่มี = 0)
$x_5 =$	ฤดูกาล (มีปริมาณการขนส่งมาก = 1, มีปริมาณการขนส่งน้อย = 0)

หลังจากได้ข้อมูลความน่าจะเป็นและต้นทุนของระบบการขนส่งแล้ว นำข้อมูลที่ได้นำมาสร้างแบบจำลองของระบบการขนส่งและทำการศึกษาดังผลของราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่มีต่อระบบโครงข่ายผ่านค่าความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยได้ผลดังรูปที่ 5.2 และ 5.3



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อความน่าเชื่อถือของระบบ



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ย

จากความสัมพันธ์พบว่าการกำหนดราคาค่าขนส่งรถบรรทุกจากการพิจารณาค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว นั้น จะทำให้ราคาค่าขนส่งที่ได้อาจมีค่าสูงเกินไป อีกทั้งยังไม่สะท้อนถึงผลของต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ จากรูปที่ 5.2 พบว่าราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ระบบโครงข่ายมีความน่าเชื่อถือมาก ควรมีค่าประมาณ 0.8 บาท/ตัน/กม. ช่วงราคาที่ต่ำกว่า 0.8 บาท/ตัน/กม. ถึง 0.6 บาท/ตัน/กม. จะมีการลดลงของความน่าเชื่อถือของระบบอย่างรวดเร็ว รูปที่ 5.2 ยังบอกด้วยว่า การเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่า 0.8 บาท/ตัน/กม. ก็ไม่ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเพิ่มมากขึ้นนัก

แต่เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ของต้นทุนการขนส่งและค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย โดยใช้ค่าต้นทุนเฉลี่ยพบว่า ต้นทุนเฉลี่ยนั้นมีค่าแตกต่างกันไปตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ โดยจากรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า ต้นทุนราคาค่าขนส่งรถบรรทุกนั้น ควรมีค่าประมาณ 0.75 บาท/ตัน/กม. จึงจะทำให้ต้นทุนเฉลี่ยของระบบการขนส่งนี้มีค่าต่ำสุด หากราคาค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกน้อยกว่านี้ ระบบโครงข่ายอาจมีปัญหาด้านความน่าเชื่อถือ ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยแปรผันตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ ดังรูปที่ 5.3 แต่หากราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่า 0.75 บาท/ตัน/กม. การเพิ่มขึ้นของต้นทุนเฉลี่ยจะมีอิทธิพลจากการเพิ่มขึ้นของราคาค่าขนส่งเท่านั้น ซึ่งแสดงว่าระบบโครงข่ายมีความน่าเชื่อถือมากพอแล้ว (ดังรูปที่ 5.3 เช่นกัน)

จะเห็นได้ว่าค่าต้นทุนเฉลี่ยสามารถประเมินระบบโครงข่ายการขนส่ง ทั้งในเชิงต้นทุนค่าขนส่งและค่าความน่าเชื่อถือไปพร้อมๆ กัน อีกทั้งยังสามารถระบุค่าราคาที่เหมาะสมของการขนส่งสินค้าที่ทำให้ระบบไม่ไว (Sensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนของการส่งสินค้าไม่ได้อีกด้วย

จากการดำเนินงานวิจัยข้างต้น สามารถสรุปรายละเอียดและผลลัพธ์ของงานได้ดังตารางที่ 5.1



ตารางที่ 5.1 แผนการและผลลัพธ์ของการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ผลลัพธ์	ผลสำเร็จ	ด.ค. 49	พ.ย. 49	ธ.ค. 49	ม.ค. 50	ก.พ. 50	มี.ค. 50	เม.ย. 50	พ.ค. 50	มิ.ย. 50	ก.ค. 50	ส.ค. 50	ก.ย. 50
1. ทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎี ที่เกี่ยวข้อง	ทฤษฎีในการคำนวณความน่าจะเป็น	100%	←-----→	←-----→										
2. ออกแบบและพัฒนาคำนวณต้นทุนเฉลี่ย	วิธีการคำนวณต้นทุนเฉลี่ย	100%		←-----→										
3. ดำรวจข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้ในการออกแบบสอบถาม	ผลสำรวจเบื้องต้น	100%				←-----→								
4. เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณต้นทุนเฉลี่ย	ผลการทำแบบสอบถาม	100%					←-----→							
5. นำผลการสำรวจมาวิเคราะห์ตามวิธีการที่ได้พัฒนา	แบบจำลองระบบการขนส่ง	100%							←-----→					
6. วิเคราะห์สรุปผล	ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง	100%									←-----→			
7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์	รายงานฉบับสมบูรณ์	100%										←-----→		

←-----→ แผนงาน
 ←-----→ ปฏิบัติจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนตามที่ได้นำเสนอนี้ สามารถทำให้สมบูรณ์ขึ้นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้จริง ดังนี้

1. พิจารณานาความจุของทางเชื่อมเข้าในระบบโครงข่าย (Edge Capacity) เพิ่มเติมในระบบการขนส่งอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณการขนส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละทางเชื่อม ซึ่งจะส่งผลต่อการเลือกใช้ทางเชื่อมที่มีอยู่ในระบบ และอาจทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าเปลี่ยนแปลงไป
2. เพิ่มความไม่แน่นอนของจุดโหนด (Node Uncertainty) และความจุของจุดโหนด (Node Capacity) จุดโหนดในระบบการขนส่งอาจหมายถึง คลังสินค้าหรือจุดพักสินค้า ซึ่งในความเป็นจริงอาจมีข้อจำกัดในเรื่องของปริมาณที่จะรองรับได้ในแต่ละช่วงเวลา อีกทั้งยังมีความไม่แน่นอนในการที่จุดโหนดจะสามารถใช้งานได้หรือไม่ในตัวจุดโหนดเองด้วย

บรรณานุกรม

ราตรี จรัสมาธุสร, 2547, ช่วงความเชื่อมั่นสำหรับอัตราส่วนความน่าจะเป็นในตัวแบบการถดถอยโลจิสติก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติ, คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมหาวิทาลัย

Abraham, J.A., 1979, "An improved method for network reliability", **IEEE Transactions on Reliability**, Vol. 28, pp. 58-61.

Avella, P., D'Auria, B. and Salerno, S., 2006, "A LP-based heuristic for a time-constrained routing problem", **European Journal of Operational Research**, Vol. 173, Issue 1, pp. 120-124.

Balan, A.O., Traldi, L., 2003, "Preprocessing minpaths for sum of disjoint products" **IEEE Transactions on Reliability**, Vol. 52, Issue 3, pp. 289 – 295.

Billinton, R. and Allan, R.N., 1992, **Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques**, 2nd ed., Plenum Press, New York, pp.372-386

Billinton, R. and Tang, X., 2004, "Selected considerations in utilizing Monte Carlo simulation in quantitative reliability evaluation of composite power systems", **Electric Power Systems Research**, Vol. 69, Issue 2-3, pp. 205-211.

Gryna, F.M., Chua, R.H. and DeFeo, J.A., 2007, **Juran's Quality Planning & Analysis**, 5th ed., McGraw-Hill, Boston, pp. 12-14.

Horiguchi, T., Takahashi, H., Hayashi, K. and Yamaguchi, C., 2004, "Dynamic programming for optimal packet routing control using two neural networks", **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Vol. 339, Issues 3-4, pp. 653-664.

Hsieh, Y., 2003, "A linear approximation for redundant reliability problems with multiple component choices", **Computers & Industrial Engineering**, Vol. 44, Issue 1, pp. 91-103.

Hsieh, C.C. and Chen, Y.T., 2005, "Resource allocation decisions under various demands and cost requirements in an unreliable flow network", **Computers & Operations Research**, Vol. 32, Issue 13, pp. 2771-2784.

Hosmer, D.W. and Lemeshow, S., 2000, **Applied Logistic Regression**, 2nd ed., Wiley-Interscience Publication, New York.

Jin, T. and Coit, D.W., 2003, "Approximating network reliability estimates using linear and quadratic unreliability of minimal cuts", **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 82, Issue 1, pp. 41-48.

Levitin, G. and Lisnianski, A., 2003, "Optimizing survivability of vulnerable series-parallel multi-state systems", **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 79, Issue 3, pp. 319-331.

Lin, Y.K. , 2001, "A simple algorithm for reliability evaluation of a stochastic-flow network with node failure" **Computers & Operations Research**, Vol. 28, Issue 13, pp. 1277-1285.

Lin, Y.K., 2003, "Extend the quickest path problem to the system reliability evaluation for a stochastic-flow network", **Computers & Operations Research**, Vol. 30, Issue 4, pp. 567-575.

Lin, Y.K., 2004, "An algorithm to evaluate the system reliability for multicommodity case under cost constraint", **Computers & Mathematics with Applications**, Vol. 48, Issues 5-6, pp. 805-812.

Lin, Y. K., 2005, "System capacity for a two-commodity multistate flow network with unreliable nodes and capacity weight", **Computers & Operations Research**, Vol. 34, Issue 10, pp. 3043-3054.

Lin, Y.K., 2006, "Evaluate the performance of a stochastic-flow network with cost attribute in terms of minimal cuts", **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 91, Issue 5, pp. 539-545.

Mahdy, Y. B., Younes, A., Soliman, M. A. and Abdellha, M.H., 2005, "A modified algorithm for computing the upper-bound reliability of computer networks", **Applied Mathematics and Computation**, Vol. 160, Issue 2, pp. 523-538.

Marseguerra, M., Zio, E. and Podofilini, L., 2005, "First-order differential sensitivity analysis of a nuclear safety system by Monte Carlo simulation", **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 90, Issue 2-3, pp. 162-168.

Meziane, R., Massim, Y., Zeblah, A., Ghoraf, A. and Rahli, R., 2005, "Reliability optimization using ant colony algorithm under performance and cost constraints", **Electric Power Systems Research**, Vol. 76, Issues 1-3, pp. 1-8.

Misra, J., 2001, "Walk over the shortest path: Dijkstra's Algorithm viewed as fixed-point computation", **Short Communication Information Processing Letters**, Vol. 77, Issues 2-4, pp 197-200.

Papadimitriou, C.H. and Steiglitz, K., 1982, **Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity**, Dover Publications, INC, pp.128-129.

Papadrakakis, M. and Lagaros, N.D., 2002, "Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation", **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Vol. 191, Issue 32, pp. 3491-3507.

Patra, S. and Misra, R. B., 1996, "Evaluation of probability mass function of flow in a communication network considering a multistate model of network links", **Microelectronics and Reliability**, Vol. 36, Issue 3, pp. 415-421.

Ramirez-Marquez, J.E. and Coit, D.W., 2005, "A Monte-Carlo simulation approach for approximating multi-state two-terminal reliability", **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 87, Issue 2, pp. 253-264.

Rocco, C.M. and Muselli, M., 2004, “Empirical models based on machine learning techniques for determining approximate reliability expressions”, **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 83, Issue 3, pp. 301-309.

Rocco, C.M. and Muselli, M., 2005, “Approximate multi-state reliability expressions using a new machine learning technique”, **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 89, Issue 3, pp. 261-270.

Satitsatian, S. and Kapur, K.C., 2006, “An algorithm for lower reliability bounds of multistate two-terminal networks”, **IEEE Transactions on Reliability**, Vol. 55, Issue 2, pp. 199 – 206.

Soh, S. and Rai, S., 1993, “Experimental results on preprocessing of path/cut terms in sum of disjoint products technique”, **IEEE Transactions on Reliability**, Vol. 42, Issue 1, pp. 24 - 33

Yeh, W.C., 2001, “Search for MC in modified networks”, **Computers & Operations Research**, Vol. 28, Issue 2, pp. 177-184.

Yeh, W.C., 2002, “Search for minimal paths in modified networks”, **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 75, Issue 3, pp. 389-395.

Yeh, W.C., 2003, “Multistate-node acyclic networks reliability evaluation based on MC”, **Reliability Engineering & System Safety**, Vol. 81, Issue 2, pp. 225-231.

Yeh, W.C., 2004, “Multistate network reliability evaluation under the maintenance cost constraint”, **International Journal of Production Economics**, Vol. 88, Issue 1, pp. 73-83.

Yeh, W.C., 2005, “A new approach to evaluate reliability of multistate networks under the cost constraint”, **Omega**, Vol. 33, Issue 3, pp. 203-209.

Yoo, Y.B., Deo, N., 1988, “A comparison of algorithms for terminal pair reliability”, **IEEE Transactions Reliability**, Vol. 37, Issue. 2, pp. 210-215.

Zhao, Z., Cang, D., Wu, W., Li, Y. and Li, B. , 2006, “A new hybrid method—combined heat flux method with Monte-Carlo method to analyze thermal radiation”, **Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral**, Vol. 13, Issue 1, pp. 25-28.

Zhaohong, B. and Xifan, W., 2002, “Studies on variance reduction technique of Monte Carlo simulation in composite system reliability evaluation”, **Electric Power Systems Research**, Vol. 63, Issue 1, pp. 59-64.

ภาคผนวก ก. โปรแกรมในการคำนวณ

โปรแกรมในการจำลองเหตุการณ์โดยมอนติคาร์โล

Monte Carlo Algorithm

Input: A digraph $D = (V, E)$ with probability $P(y)$ on its edges; a node $s \in V$

Output: The reliability and cost index from S to all $v \in V$

```

begin
    set error,  $i = 1$ ;
    while  $\max(|\bar{C}(i) - \bar{C}(i-1)|, |\bar{R}(i) - \bar{R}(i-1)|) > \text{error}$ 
        generate random numbers vector  $N$  from a uniform (0,1) distribution;
        for all  $y \in E, j = 0 : n(E)$ , if  $P(y) > N(j)$ ,  $A = E - \{y\}$ ;
         $G_i = (V, A)$ ;
         $C(i) = \text{Shortest path}(G_i)$ ;
        if  $C(i) = 0$ ,  $R(i) = 0$  else  $R(i) = 1$ ;
         $i = i + 1$ 
    end
end
    
```

โปรแกรมในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

Dijkstra's Algorithm

In put: A digraph $D = (V, E)$ with costs $c_{uv} \geq 0$ on its edges; a node $s \in V$

Out put: The shortest distances from s to all $v \in V$ in array ρ .

```

begin
    set  $W := \{s\}$ ;  $\rho[s] := 0$ ;
    for all  $y \in V - \{s\}$  do  $\rho[y] := c_{sy}$  ;
    while  $W \neq V$  do
        begin
            find  $\min \{\rho[y] : y \notin W\}$ , say  $\rho[x]$ ;
            set  $W := W \cup \{x\}$ ;
            for all  $y \in V - W$  do
                 $\rho[y] := \min \{\rho[y], \rho[x] + c_{xy}\}$ 
            end
        end
    end
end
    
```

โปรแกรมในการค้นหาเส้นทาง

In put: A digraph $D = (V, E)$ star at S and terminal at T

Out put: The set of all minimal path

```

begin      set  $MPN := [S]$ ;   $j$  = first column of  $MPN$  ,
           while  $MP(:, j) \neq T$  do
           begin  find node connected with  $MPN(:, j)$  and put it in  $MPN(:, j + 1)$ 
                   duplicate that row to the end of  $MPN$ 
                   set  $j = j + 1$ 
           end
           convert  $MPN$  to  $MP$  by read the edge that connect the node
end
    
```

ภาคผนวก ข.
ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อม
ในระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 - 16

ตารางที่ ข.1 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 3

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.93	14
a_2	0.87	25
a_3	0.85	21
a_4	0.88	24
a_5	0.87	33
a_6	0.84	17
a_7	0.8	29
a_8	0.82	11
a_9	0.94	15
a_{10}	0.85	31
a_{11}	0.86	14
a_{12}	0.82	10
a_{13}	0.85	12
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		200

ตารางที่ ข.2 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 3 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_5, a_8, a_{11}\}$	72
$\{a_1, a_3, a_6, a_{12}, a_{13}\}$	74
$\{a_2, a_7, a_{12}, a_{13}\}$	76
$\{a_1, a_5, a_{10}\}$	78
$\{a_2, a_4, a_6, a_{12}, a_{13}\}$	88
$\{a_1, a_5, a_8, a_9, a_{12}, a_{13}\}$	95

ตารางที่ ข.3 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 4

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.81	41
a_2	0.74	28
a_3	0.89	39
a_4	0.75	46
a_5	0.86	42
a_6	0.82	24
a_7	0.78	37
a_8	0.84	32
a_9	0.87	48
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.4 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 4 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_2, a_6, a_9\}$	100
$\{a_2, a_5, a_8\}$	102
$\{a_1, a_4, a_8\}$	119
$\{a_2, a_6, a_7, a_8\}$	121
$\{a_2, a_3, a_4, a_8\}$	145
$\{a_1, a_3, a_6, a_9\}$	152
$\{a_1, a_3, a_5, a_8\}$	154
$\{a_2, a_5, a_7, a_9\}$	155
$\{a_1, a_4, a_7, a_9\}$	172
$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_8\}$	173
$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_9\}$	198
$\{a_1, a_4, a_5, a_6, a_9\}$	201
$\{a_1, a_3, a_5, a_7, a_9\}$	207

ตารางที่ ข.5 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 5

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.73	73
a_2	0.73	48
a_3	0.67	27
a_4	0.81	26
a_5	0.68	34
a_6	0.75	18
a_7	0.7	19
a_8	0.74	23
a_9	0.71	31
a_{10}	0.75	36
a_{11}	0.75	19
a_{12}	0.69	31
a_{13}	0.71	30
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.6 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 5 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_3, a_5\}$	96	$\{a_3, a_9, a_{10}, a_{13}\}$	124
$\{a_1, a_{12}\}$	99	$\{a_2, a_7, a_{10}, a_{13}\}$	133
$\{a_3, a_9, a_{14}\}$	99	$\{a_3, a_5, a_7, a_{10}, a_{13}\}$	146
$\{a_2, a_4, a_{12}\}$	105	$\{a_3, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	148
$\{a_2, a_7, a_{14}\}$	108	$\{a_2, a_7, a_8, a_{10}, a_{12}\}$	157
$\{a_3, a_4, a_5, a_{12}\}$	118	$\{a_3, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	167
$\{a_3, a_5, a_7, a_{14}\}$	121	$\{a_3, a_5, a_7, a_8, a_{10}, a_{12}\}$	170

ตารางที่ ข.7 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 6

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.79	25
a_2	0.72	40
a_3	0.73	46
a_4	0.81	39
a_5	0.72	25
a_6	0.78	22
a_7	0.77	30
a_8	0.72	28
a_9	0.82	31
a_{10}	0.77	29
a_{11}	0.74	31
a_{12}	0.68	28
a_{13}	0.72	38
a_{14}	0.79	24
a_{15}	0.78	39
a_{16}	0.71	25
a_{17}	0.75	26
a_{18}	0.82	29
a_{19}	0.69	21
a_{20}	0.78	26
a_{21}	0.71	41
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.8 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 6 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_3, a_{10}, a_{19}\}$	96	$\{a_4, a_{13}, a_{18}, a_{19}\}$	127
$\{a_2, a_{15}, a_{19}\}$	100	$\{a_3, a_6, a_{15}, a_{19}\}$	128
$\{a_1, a_8, a_{17}, a_{20}\}$	105	$\{a_1, a_7, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	138
$\{a_4, a_{12}, a_{14}, a_{19}\}$	112	$\{a_4, a_5, a_{11}, a_{14}, a_{19}\}$	140
$\{a_4, a_5, a_{10}, a_{19}\}$	114	$\{a_4, a_5, a_6, a_{15}, a_{19}\}$	146
$\{a_1, a_7, a_{15}, a_{19}\}$	115	$\{a_3, a_6, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	151
$\{a_4, a_{13}, a_{21}\}$	118	$\{a_1, a_8, a_{15}, a_{16}, a_{17}, a_{19}\}$	164
$\{a_3, a_{11}, a_{14}, a_{19}\}$	122	$\{a_4, a_5, a_6, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	169
$\{a_2, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	123		

ตารางที่ ข.9 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 7

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.77	28
a_2	0.83	35
a_3	0.87	31
a_4	0.89	14
a_5	0.78	24
a_6	0.71	32
a_7	0.78	23
a_8	0.79	29
a_9	0.76	25
a_{10}	0.75	22
a_{11}	0.85	43
a_{12}	0.74	34
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.10 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 7 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_3, a_8, a_{12}\}$	94	$\{a_1, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	141
$\{a_1, a_6, a_{11}\}$	103	$\{a_3, a_4, a_5, a_6, a_{11}\}$	144
$\{a_2, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	114	$\{a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}\}$	146
$\{a_1, a_4, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	121	$\{a_3, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	150
$\{a_2, a_5, a_8, a_{12}\}$	122	$\{a_2, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	162
$\{a_2, a_4, a_6, a_{11}\}$	124	$\{a_2, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	178
$\{a_2, a_7, a_9, a_{11}\}$	126	$\{a_3, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	182
$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_{12}\}$	129	$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	185
$\{a_1, a_4, a_7, a_9, a_{11}\}$	133	$\{a_3, a_4, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	194
$\{a_3, a_5, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	134	$\{a_1, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{12}\}$	195

ตารางที่ ข.11 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 8

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.79	25
a_2	0.72	40
a_3	0.73	46
a_4	0.81	39
a_5	0.72	25
a_6	0.78	22
a_7	0.77	30
a_8	0.72	28
a_9	0.82	31
a_{10}	0.77	29
a_{11}	0.74	31
a_{12}	0.68	28
a_{13}	0.72	38
a_{14}	0.79	24
a_{15}	0.78	39
a_{16}	0.71	25
a_{17}	0.75	26
a_{18}	0.82	29
a_{19}	0.69	21
a_{20}	0.78	26
a_{21}	0.71	41
a_{22}	0.62	40
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.12 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 8 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_3, a_{10}, a_{19}\}$	96	$\{a_4, a_5, a_{11}, a_{14}, a_{19}\}$	140
$\{a_2, a_{15}, a_{19}\}$	100	$\{a_4, a_5, a_6, a_{15}, a_{19}\}$	146
$\{a_1, a_8, a_{17}, a_{20}\}$	105	$\{a_4, a_{12}, a_{21}, a_{22}\}$	148
$\{a_4, a_{12}, a_{14}, a_{19}\}$	112	$\{a_3, a_6, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	151
$\{a_4, a_5, a_{10}, a_{19}\}$	114	$\{a_4, a_{12}, a_{18}, a_{19}, a_{22}\}$	157
$\{a_1, a_7, a_{15}, a_{19}\}$	115	$\{a_3, a_{11}, a_{21}, a_{22}\}$	158
$\{a_4, a_{13}, a_{21}\}$	118	$\{a_1, a_8, a_{15}, a_{16}, a_{17}, a_{19}\}$	164
$\{a_3, a_{11}, a_{14}, a_{19}\}$	122	$\{a_3, a_{11}, a_{18}, a_{19}, a_{22}\}$	167
$\{a_2, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	123	$\{a_4, a_5, a_6, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	169
$\{a_4, a_{13}, a_{18}, a_{19}\}$	127	$\{a_4, a_5, a_{11}, a_{21}, a_{22}\}$	176
$\{a_3, a_6, a_{15}, a_{19}\}$	128	$\{a_4, a_5, a_{11}, a_{18}, a_{19}, a_{22}\}$	185
$\{a_1, a_7, a_9, a_{17}, a_{20}\}$	138		

ตารางที่ ข.13 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 9

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.83	18
a_2	0.84	27
a_3	0.82	31
a_4	0.82	23
a_5	0.81	21
a_6	0.77	29
a_7	0.78	23
a_8	0.83	39
a_9	0.86	27
a_{10}	0.80	19
a_{11}	0.78	23
a_{12}	0.85	28
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.14 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 9 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_4, a_6, a_{11}\}$	93	$\{a_1, a_3, a_5, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	140
$\{a_2, a_8, a_{12}\}$	94	$\{a_1, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}\}$	143
$\{a_2, a_5, a_6, a_{11}\}$	100	$\{a_1, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	144
$\{a_1, a_4, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	111	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	151
$\{a_1, a_4, a_7, a_9, a_{11}\}$	114	$\{a_2, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	151
$\{a_1, a_3, a_8, a_{12}\}$	116	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_9, a_{11}\}$	154
$\{a_2, a_5, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	118	$\{a_1, a_3, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	157
$\{a_2, a_5, a_7, a_9, a_{11}\}$	121	$\{a_2, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	160
$\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_{11}\}$	122	$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	170
$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_{12}\}$	129	$\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	173
$\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_{11}\}$	133	$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	182
$\{a_2, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	135	$\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	184

ตารางที่ ข.15 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 10

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.7	47
a_2	0.63	43
a_3	0.72	39
a_4	0.65	25
a_5	0.71	33
a_6	0.67	41
a_7	0.74	48
a_8	0.76	27
a_9	0.67	61
a_{10}	0.72	35
a_{11}	0.71	24
a_{12}	0.75	40
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		400

ตารางที่ ข.16 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 10 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_9\}$	108	$\{a_2, a_4, a_5, a_{10}, a_{11}\}$	160
$\{a_2, a_8, a_{12}\}$	110	$\{a_3, a_4, a_7, a_{11}, a_{12}\}$	176
$\{a_3, a_5, a_{12}\}$	112	$\{a_3, a_5, a_7, a_8, a_{10}\}$	182
$\{a_1, a_6, a_{10}\}$	123	$\{a_2, a_6, a_7, a_9\}$	193
$\{a_2, a_7, a_{10}\}$	126	$\{a_2, a_6, a_8, a_9, a_{11}\}$	196
$\{a_2, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	129	$\{a_3, a_5, a_6, a_9, a_{11}\}$	198
$\{a_3, a_5, a_{10}, a_{11}\}$	131	$\{a_1, a_6, a_7, a_8, a_{12}\}$	203
$\{a_3, a_4, a_8, a_{12}\}$	131	$\{a_3, a_4, a_6, a_7, a_9\}$	214
$\{a_2, a_4, a_5, a_{12}\}$	141	$\{a_3, a_4, a_6, a_8, a_9, a_{11}\}$	217
$\{a_3, a_4, a_7, a_{10}\}$	147	$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{11}\}$	227
$\{a_3, a_4, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	150	$\{a_1, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{12}\}$	234
$\{a_1, a_6, a_{11}, a_{12}\}$	152	$\{a_3, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\}$	249
$\{a_2, a_7, a_{11}, a_{12}\}$	155		

ตารางที่ ข.17 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 11

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.83	18
a_2	0.84	27
a_3	0.82	31
a_4	0.82	23
a_5	0.81	21
a_6	0.77	29
a_7	0.78	23
a_8	0.83	39
a_9	0.86	27
a_{10}	0.80	19
a_{11}	0.78	23
a_{12}	0.85	28
a_{13}	0.77	25
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.18 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 11 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_4, a_6, a_{11}\}$	93	$\{a_2, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	135
$\{a_2, a_8, a_{12}\}$	94	$\{a_1, a_4, a_5, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	137
$\{a_2, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	99	$\{a_1, a_3, a_5, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	140
$\{a_2, a_5, a_6, a_{11}\}$	100	$\{a_1, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}\}$	143
$\{a_2, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	102	$\{a_1, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	144
$\{a_1, a_4, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	111	$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_{11}, a_{13}\}$	149
$\{a_1, a_4, a_7, a_9, a_{11}\}$	114	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	151
$\{a_1, a_3, a_8, a_{12}\}$	116	$\{a_2, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	151
$\{a_2, a_5, a_7, a_{10}, a_{12}\}$	118	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_9, a_{11}\}$	154
$\{a_1, a_3, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	121	$\{a_1, a_4, a_7, a_8, a_{12}, a_{13}\}$	156
$\{a_2, a_5, a_7, a_9, a_{11}\}$	121	$\{a_1, a_3, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	157
$\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_{11}\}$	122	$\{a_2, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	160
$\{a_1, a_3, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	124	$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}\}$	170
$\{a_2, a_6, a_7, a_{11}, a_{13}\}$	127	$\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	173
$\{a_1, a_4, a_5, a_8, a_{12}\}$	129	$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	182
$\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_{11}\}$	133	$\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9, a_{10}, a_{12}\}$	184
$\{a_1, a_4, a_5, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	134	$\{a_1, a_4, a_6, a_8, a_9, a_{12}, a_{13}\}$	189

ตารางที่ ข.19 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 12

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.73	43
a_2	0.76	31
a_3	0.71	40
a_4	0.74	28
a_5	0.81	25
a_6	0.69	27
a_7	0.68	10
a_8	0.83	17
a_9	0.67	20
a_{10}	0.73	13
a_{11}	0.76	35
a_{12}	0.71	15
a_{13}	0.75	40
a_{14}	0.73	29
a_{15}	0.75	38
a_{16}	0.7	36
a_{17}	0.66	28
a_{18}	0.71	17
a_{19}	0.75	20
a_{20}	0.77	12
a_{21}	0.7	30
a_{22}	0.72	15
a_{23}	0.72	23
a_{24}	0.68	15
a_{25}	0.81	32
a_{26}	0.74	22
a_{27}	0.7	18

ตารางที่ ข.19 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 12 (ต่อ)

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_{28}	0.72	25
a_{29}	0.74	31
a_{30}	0.71	46
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.20 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 12 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
$\{a_4, a_{18}, a_{30}\}$	91	$\{a_4, a_{18}, a_{25}, a_{26}, a_{28}\}$	124
$\{a_3, a_{14}, a_{28}\}$	94	$\{a_5, a_9, a_{19}, a_{22}, a_{30}\}$	126
$\{a_1, a_{10}, a_{23}, a_{27}\}$	97	$\{a_3, a_7, a_{11}, a_{23}, a_{27}\}$	126
$\{a_4, a_8, a_{14}, a_{28}\}$	99	$\{a_3, a_7, a_{12}, a_3, a_{28}\}$	130
$\{a_4, a_{16}, a_{20}, a_{28}\}$	101	$\{a_3, a_6, a_7, a_{10}, a_{23}, a_{27}\}$	131
$\{a_4, a_{18}, a_{28}, a_{29}\}$	101	$\{a_4, a_7, a_8, a_{11}, a_{23}, a_{27}\}$	131
$\{a_2, a_{11}, a_{23}, a_{27}\}$	107	$\{a_4, a_7, a_8, a_{12}, a_{13}, a_{28}\}$	135
$\{a_5, a_9, a_{18}, a_{30}\}$	108	$\{a_4, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{23}, a_{27}\}$	136
$\{a_4, a_9, a_{22}, a_{30}\}$	109	$\{a_5, a_9, a_{19}, a_{22}, a_{28}, a_{29}\}$	136
$\{a_2, a_{12}, a_{13}, a_{28}\}$	111	$\{a_5, a_8, a_9, a_{15}, a_{20}, a_{28}\}$	137
$\{a_2, a_6, a_{10}, a_{23}, a_{27}\}$	112	$\{a_5, a_9, a_{17}, a_{20}, a_{21}, a_{28}\}$	140
$\{a_3, a_{15}, a_{20}, a_{28}\}$	115	$\{a_5, a_9, a_{18}, a_{25}, a_{26}, a_{28}\}$	141
$\{a_5, a_8, a_9, a_{14}, a_{28}\}$	116	$\{a_4, a_{19}, a_{22}, a_{25}, a_{26}, a_{28}\}$	142
$\{a_5, a_9, a_{16}, a_{20}, a_{28}\}$	118	$\{a_5, a_7, a_8, a_9, a_{11}, a_{23}, a_{27}\}$	148
$\{a_5, a_9, a_{18}, a_{28}, a_{29}\}$	118	$\{a_5, a_7, a_8, a_9, a_{12}, a_{13}, a_{28}\}$	152
$\{a_4, a_{19}, a_{22}, a_{28}, a_{29}\}$	119	$\{a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{23}, a_{27}\}$	153
$\{a_4, a_8, a_{15}, a_{20}, a_{28}\}$	120	$\{a_5, a_9, a_{19}, a_{22}, a_{25}, a_{26}, a_{28}\}$	159
$\{a_4, a_{17}, a_{20}, a_{21}, a_{28}\}$	123	$\{a_1, a_{10}, a_{13}, a_{23}, a_{24}, a_{28}\}$	174

ตารางที่ ข.21 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 13

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.7	47
a_2	0.63	43
a_3	0.72	39
a_4	0.65	25
a_5	0.71	33
a_6	0.67	41
a_7	0.74	48
a_8	0.76	27
a_9	0.67	61
a_{10}	0.72	35
a_{11}	0.71	24
a_{12}	0.75	40
a_{13}	0.62	51
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		400

ตารางที่ ข.22 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 13 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_9\}$	108	$\{a_3, a_5, a_7, a_8, a_{10}\}$	182
$\{a_2, a_8, a_{12}\}$	110	$\{a_1, a_8, a_{10}, a_{11}, a_{13}\}$	184
$\{a_3, a_5, a_{12}\}$	112	$\{a_3, a_4, a_6, a_{10}, a_{13}\}$	191
$\{a_1, a_6, a_{10}\}$	123	$\{a_2, a_6, a_7, a_9\}$	193
$\{a_2, a_7, a_{10}\}$	126	$\{a_1, a_4, a_5, a_{12}, a_{13}\}$	196
$\{a_2, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	129	$\{a_2, a_6, a_8, a_9, a_{11}\}$	196
$\{a_3, a_5, a_{10}, a_{11}\}$	131	$\{a_3, a_5, a_6, a_9, a_{11}\}$	198
$\{a_3, a_4, a_8, a_{12}\}$	131	$\{a_2, a_6, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	199
$\{a_2, a_4, a_5, a_{12}\}$	141	$\{a_1, a_6, a_7, a_8, a_{12}\}$	203
$\{a_3, a_4, a_7, a_{10}\}$	147	$\{a_1, a_7, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	210
$\{a_3, a_4, a_8, a_{10}, a_{11}\}$	150	$\{a_3, a_5, a_8, a_9, a_{13}\}$	211
$\{a_1, a_6, a_{11}, a_{12}\}$	152	$\{a_3, a_4, a_6, a_7, a_9\}$	214
$\{a_2, a_9, a_{13}\}$	155	$\{a_1, a_4, a_5, a_{10}, a_{11}, a_{13}\}$	215
$\{a_2, a_7, a_{11}, a_{12}\}$	155	$\{a_3, a_4, a_6, a_8, a_9, a_{11}\}$	217
$\{a_2, a_4, a_5, a_{10}, a_{11}\}$	160	$\{a_3, a_4, a_6, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	220
$\{a_1, a_8, a_{12}, a_{13}\}$	165	$\{a_3, a_5, a_6, a_8, a_{10}, a_{13}\}$	226
$\{a_2, a_6, a_{10}, a_{13}\}$	170	$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{11}\}$	227
$\{a_3, a_4, a_9, a_{13}\}$	176	$\{a_1, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{12}\}$	234
$\{a_3, a_4, a_7, a_{11}, a_{12}\}$	176	$\{a_3, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9\}$	249
$\{a_1, a_7, a_{10}, a_{13}\}$	181	$\{a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	256

ตารางที่ ข.23 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 14

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.81	43
a_2	0.82	39
a_3	0.83	25
a_4	0.82	21
a_5	0.81	44
a_6	0.84	18
a_7	0.81	37
a_8	0.82	29
a_9	0.85	14
a_{10}	0.92	36
a_{11}	0.84	19
a_{12}	0.91	14
a_{13}	0.78	29
a_{14}	0.84	31
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		400

ตารางที่ ข.24 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 14 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_4, a_8, a_{13}\}$	122	$\{a_2, a_5, a_7, a_8, a_{13}\}$	182
$\{a_1, a_4, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	123	$\{a_1, a_5, a_7, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	183
$\{a_2, a_6, a_{10}, a_{14}\}$	124	$\{a_1, a_3, a_6, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	184
$\{a_1, a_4, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	126	$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	184
$\{a_2, a_3, a_4, a_8, a_{13}\}$	143	$\{a_1, a_5, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	185
$\{a_2, a_3, a_4, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	144	$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	185
$\{a_2, a_3, a_4, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	147	$\{a_1, a_5, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	186
$\{a_2, a_6, a_7, a_8, a_{13}\}$	152	$\{a_2, a_6, a_7, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	187
$\{a_1, a_3, a_6, a_{10}, a_{14}\}$	153	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_{10}, a_{14}\}$	189
$\{a_2, a_6, a_7, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	153	$\{a_1, a_4, a_7, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	199
$\{a_1, a_5, a_{10}, a_{14}\}$	154	$\{a_2, a_3, a_5, a_7, a_8, a_{13}\}$	203
$\{a_2, a_6, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	155	$\{a_2, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	204
$\{a_2, a_6, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	156	$\{a_2, a_3, a_5, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	206
$\{a_1, a_4, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	157	$\{a_2, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}\}$	207
$\{a_1, a_4, a_7, a_{10}, a_{14}\}$	168	$\{a_1, a_6, a_6, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	208
$\{a_2, a_3, a_5, a_{10}, a_{14}\}$	175	$\{a_1, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	209
$\{a_2, a_3, a_4, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	178	$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	215
$\{a_2, a_6, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	179	$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	216
$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_8, a_{13}\}$	180	$\{a_1, a_5, a_7, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	217
$\{a_2, a_4, a_5, a_6, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	181	$\{a_2, a_3, a_4, a_7, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}\}$	220
$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_8, a_{13}\}$	181	$\{a_2, a_3, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}, a_{13}\}$	230
$\{a_1, a_3, a_6, a_7, a_9, a_{12}, a_{14}\}$	182	$\{a_2, a_3, a_5, a_7, a_8, a_{11}, a_{12}, a_{14}\}$	238

ตารางที่ ข.25 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 15

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.73	30
a_2	0.77	17
a_3	0.67	35
a_4	0.73	28
a_5	0.69	41
a_6	0.68	27
a_7	0.75	47
a_8	0.77	20
a_9	0.75	26
a_{10}	0.74	31
a_{11}	0.69	41
a_{12}	0.74	20
a_{13}	0.67	32
a_{14}	0.74	39
a_{15}	0.83	20
a_{16}	0.8	15
a_{17}	0.7	37
a_{18}	0.77	23
a_{19}	0.76	33
a_{20}	0.71	25
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.26 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 15 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_2, a_4, a_{12}, a_{18}\}$	88	$\{a_2, a_5, a_{16}, a_{19}, a_{20}\}$	131
$\{a_1, a_8, a_{12}, a_{18}\}$	93	$\{a_1, a_8, a_{11}, a_{15}, a_{18}\}$	134
$\{a_2, a_5, a_{18}, a_{20}\}$	106	$\{a_3, a_6, a_{16}, a_{19}, a_{20}\}$	135
$\{a_3, a_6, a_{18}, a_{20}\}$	110	$\{a_2, a_4, a_9, a_{13}, a_{19}\}$	136
$\{a_2, a_4, a_{12}, a_{16}, a_{19}\}$	113	$\{a_3, a_{10}, a_{16}, a_{19}, a_{20}\}$	139
$\{a_3, a_{10}, a_{18}, a_{20}\}$	114	$\{a_1, a_8, a_9, a_{13}, a_{19}\}$	141
$\{a_1, a_8, a_{12}, a_{16}, a_{19}\}$	118	$\{a_2, a_4, a_9, a_{16}, a_{19}, a_{20}\}$	144
$\{a_2, a_4, a_9, a_{18}, a_{20}\}$	119	$\{a_1, a_7, a_{15}, a_{16}, a_{19}\}$	145
$\{a_1, a_7, a_{15}, a_{18}\}$	120	$\{a_1, a_8, a_9, a_{16}, a_{19}, a_{20}\}$	149
$\{a_2, a_5, a_{13}, a_{19}\}$	123	$\{a_1, a_7, a_{14}, a_{17}\}$	153
$\{a_1, a_8, a_9, a_{18}, a_{20}\}$	124	$\{a_2, a_4, a_{11}, a_{15}, a_{16}, a_{19}\}$	154
$\{a_3, a_6, a_{13}, a_{19}\}$	127	$\{a_1, a_8, a_{11}, a_{15}, a_{16}, a_{19}\}$	159
$\{a_2, a_4, a_{11}, a_{15}, a_{18}\}$	129	$\{a_2, a_4, a_{11}, a_{14}, a_{17}\}$	162
$\{a_3, a_{10}, a_{13}, a_{19}\}$	131	$\{a_1, a_8, a_{11}, a_{14}, a_{17}\}$	167

ตารางที่ ข.27 ความน่าจะเป็นและต้นทุนของทางเชื่อมในระบบโครงข่ายตัวอย่าง 16

ทางเชื่อม	ความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมสามารถทำงานได้	ต้นทุนการใช้เส้นทาง
a_1	0.75	18
a_2	0.62	45
a_3	0.63	41
a_4	0.69	21
a_5	0.71	21
a_6	0.67	34
a_7	0.61	16
a_8	0.61	23
a_9	0.69	27
a_{10}	0.63	14
a_{11}	0.63	35
a_{12}	0.69	15
a_{13}	0.73	43
a_{14}	0.68	27
a_{15}	0.74	38
a_{16}	0.69	40
a_{17}	0.75	41
a_{18}	0.65	23
a_{19}	0.68	23
a_{20}	0.60	11
a_{21}	0.70	24
a_{22}	0.72	23
a_{23}	0.62	25
a_{24}	0.69	37
a_{25}	0.75	29
a_{26}	0.70	42
a_{27}	0.66	23
a_{28}	0.69	28
กรณีที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้		300

ตารางที่ ข.28 ต้นทุนในการใช้มินิมัลพาทของระบบโครงข่ายตัวอย่างที่ 16 เรียงลำดับจากน้อยไปมาก

มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง	มินิมัลพาท	ต้นทุนการ ใช้เส้นทาง
$\{a_1, a_5, a_{10}, a_{24}\}$	90	$\{a_3, a_8, a_{13}, a_{25}\}$	136
$\{a_1, a_6, a_{12}, a_{20}, a_{25}\}$	107	$\{a_4, a_9, a_{15}, a_{21}, a_{25}\}$	139
$\{a_3, a_{17}, a_{28}\}$	110	$\{a_3, a_{18}, a_{19}, a_{25}, a_{27}\}$	139
$\{a_3, a_{18}, a_{19}, a_{28}\}$	115	$\{a_4, a_9, a_{16}, a_{23}, a_{28}\}$	141
$\{a_2, a_7, a_{12}, a_{20}, a_{25}\}$	116	$\{a_4, a_9, a_{17}, a_{25}, a_{27}\}$	141
$\{a_2, a_{13}, a_{25}\}$	117	$\{a_4, a_7, a_8, a_9, a_{12}, a_{20}, a_{25}\}$	142
$\{a_4, a_9, a_{17}, a_{28}\}$	117	$\{a_4, a_8, a_9, a_{13}, a_{25}\}$	143
$\{a_4, a_9, a_{18}, a_{19}, a_{28}\}$	122	$\{a_3, a_8, a_{14}, a_{21}, a_{25}\}$	144
$\{a_3, a_{16}, a_{26}\}$	123	$\{a_4, a_9, a_{18}, a_{19}, a_{25}, a_{27}\}$	146
$\{a_1, a_6, a_{11}, a_{24}\}$	124	$\{a_4, a_8, a_9, a_{14}, a_{21}, a_{25}\}$	151
$\{a_2, a_{14}, a_{21}, a_{25}\}$	125	$\{a_3, a_7, a_8, a_{11}, a_{24}\}$	152
$\{a_4, a_9, a_{16}, a_{26}\}$	130	$\{a_3, a_{16}, a_{21}, a_{22}, a_{25}\}$	157
$\{a_3, a_{15}, a_{21}, a_{25}\}$	132	$\{a_3, a_{16}, a_{23}, a_{25}, a_{27}\}$	158
$\{a_2, a_7, a_{11}, a_{24}\}$	133	$\{a_4, a_7, a_8, a_9, a_{11}, a_{24}\}$	159
$\{a_3, a_{16}, a_{23}, a_{28}\}$	134	$\{a_4, a_9, a_{16}, a_{21}, a_{22}, a_{25}\}$	164
$\{a_3, a_{17}, a_{25}, a_{27}\}$	134	$\{a_4, a_9, a_{16}, a_{23}, a_{25}, a_{27}\}$	165
$\{a_3, a_7, a_8, a_{12}, a_{20}, a_{25}\}$	135		

ภาคผนวก ค.

ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่ง

ตาราง ค1. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1

ลักษณะการว่าจ้าง : 0 = รายครั้ง 1 = ต่อเนื่อง
 สิ้นค้าเที่ยวกลับ : 0 = ไม่มี 1 = มี
 ฤดูกาล : 0 = มีการขนส่งน้อย 1 = มีการขนส่งมาก
 ผลการตัดสินใจ : 0 = ไม่รับขนส่ง 1 = รับขนส่ง

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า เที่ยวกลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
0.8	22	0	0	0	0
0.9	22	0	0	0	0
1.0	22	0	0	0	1
1.1	22	0	0	0	1
1.2	22	0	0	0	1
0.8	22	0	0	1	0
0.9	22	0	0	1	0
1.0	22	0	0	1	1
1.1	22	0	0	1	1
1.2	22	0	0	1	1
0.8	22	0	1	0	0
0.9	22	0	1	0	1
1.0	22	0	1	0	1
1.1	22	0	1	0	1
1.2	22	0	1	0	1
0.8	22	0	1	1	0
0.9	22	0	1	1	0
1.0	22	0	1	1	1
1.1	22	0	1	1	1
1.2	22	0	1	1	1

ตาราง ก1. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1 (ต่อ)

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
0.8	22	1	0	0	0
0.9	22	1	0	0	0
1.0	22	1	0	0	1
1.1	22	1	0	0	1
1.2	22	1	0	0	1
0.8	22	1	0	1	0
0.9	22	1	0	1	0
1.0	22	1	0	1	1
1.1	22	1	0	1	1
1.2	22	1	0	1	1
0.8	22	1	1	0	1
0.9	22	1	1	0	1
1.0	22	1	1	0	1
1.1	22	1	1	0	1
1.2	22	1	1	0	1
0.8	22	1	1	1	1
0.9	22	1	1	1	1
1.0	22	1	1	1	1
1.1	22	1	1	1	1
1.2	22	1	1	1	1
0.8	25	0	0	0	0
0.9	25	0	0	0	0
1.0	25	0	0	0	0
1.1	25	0	0	0	1

ตาราง ก1. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1 (ต่อ)

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
1.2	25	0	0	0	1
0.8	25	0	0	1	0
0.9	25	0	0	1	0
1.0	25	0	0	1	0
1.1	25	0	0	1	0
1.2	25	0	0	1	0
0.8	25	0	1	0	0
0.9	25	0	1	0	0
1.0	25	0	1	0	1
1.1	25	0	1	0	1
1.2	25	0	1	0	1
0.8	25	0	1	1	0
0.9	25	0	1	1	0
1.0	25	0	1	1	1
1.1	25	0	1	1	1
1.2	25	0	1	1	1
0.8	25	1	0	0	0
0.9	25	1	0	0	0
1.0	25	1	0	0	0
1.1	25	1	0	0	1
1.2	25	1	0	0	1
0.8	25	1	0	1	0
0.9	25	1	0	1	0
1.0	25	1	0	1	0

ตาราง ค1. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 1 (ต่อ)

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
1.1	25	1	0	1	0
1.2	25	1	0	1	1
0.8	25	1	1	0	1
0.9	25	1	1	0	1
1.0	25	1	1	0	1
1.1	25	1	1	0	1
1.2	25	1	1	0	1
0.8	25	1	1	1	0
0.9	25	1	1	1	1
1.0	25	1	1	1	1
1.1	25	1	1	1	1
1.2	25	1	1	1	1

ตาราง ค2. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 2

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ยกกลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
0.7	22	0	0	0	0
0.8	22	0	0	0	0
0.9	22	0	0	0	0
1.0	22	0	0	0	0
1.1	22	0	0	0	0
1.2	22	0	0	0	0
1.3	22	0	0	0	0
0.7	22	0	0	1	0
0.8	22	0	0	1	0
0.9	22	0	0	1	0
1.0	22	0	0	1	0
1.1	22	0	0	1	0
1.2	22	0	0	1	0
1.3	22	0	0	1	0
0.7	22	0	1	0	0
0.8	22	0	1	0	0
0.9	22	0	1	0	1
1.0	22	0	1	0	1
1.1	22	0	1	0	1
1.2	22	0	1	0	1
1.3	22	0	1	0	1
0.7	22	0	1	1	0
0.8	22	0	1	1	0
0.9	22	0	1	1	0
1.0	22	0	1	1	1

ตาราง ก2. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 2 (ต่อ)

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
1.1	22	0	1	1	1
1.2	22	0	1	1	1
1.3	22	0	1	1	1
0.7	22	1	0	0	0
0.8	22	1	0	0	0
0.9	22	1	0	0	0
1.0	22	1	0	0	0
1.1	22	1	0	0	0
1.2	22	1	0	0	0
1.3	22	1	0	0	0
0.7	22	1	0	1	0
0.8	22	1	0	1	0
0.9	22	1	0	1	0
1.0	22	1	0	1	0
1.1	22	1	0	1	0
1.2	22	1	0	1	0
1.3	22	1	0	1	0
0.7	22	1	1	0	0
0.8	22	1	1	0	1
0.9	22	1	1	0	1
1.0	22	1	1	0	1
1.1	22	1	1	0	1
1.2	22	1	1	0	1
1.3	22	1	1	0	1

ตาราง ก2. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 2 (ต่อ)

ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
0.7	22	1	1	1	0
0.8	22	1	1	1	1
0.9	22	1	1	1	1
1.0	22	1	1	1	1
1.1	22	1	1	1	1
1.2	22	1	1	1	1
1.3	22	1	1	1	1
0.7	25	0	0	0	0
0.8	25	0	0	0	0
0.9	25	0	0	0	0
1.0	25	0	0	0	0
1.1	25	0	0	0	0
1.2	25	0	0	0	0
1.3	25	0	0	0	0
0.7	25	0	0	1	0
0.8	25	0	0	1	0
0.9	25	0	0	1	0
1.0	25	0	0	1	0
1.1	25	0	0	1	0
1.2	25	0	0	1	0
1.3	25	0	0	1	0
0.7	25	0	1	0	0
0.8	25	0	1	0	0
0.9	25	0	1	0	1

ตาราง ก2. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 2 (ต่อ)

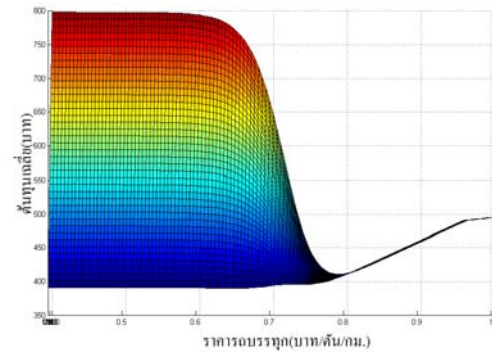
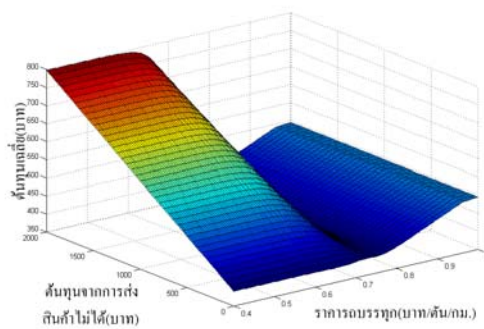
ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ยกกลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
1.0	25	0	1	0	1
1.1	25	0	1	0	1
1.2	25	0	1	0	1
1.3	25	0	1	0	1
0.7	25	0	1	1	0
0.8	25	0	1	1	0
0.9	25	0	1	1	0
1.0	25	0	1	1	1
1.1	25	0	1	1	1
1.2	25	0	1	1	1
1.3	25	0	1	1	1
0.7	25	1	0	0	0
0.8	25	1	0	0	0
0.9	25	1	0	0	0
1.0	25	1	0	0	0
1.1	25	1	0	0	0
1.2	25	1	0	0	0
1.3	25	1	0	0	0
0.7	25	1	0	1	0
0.8	25	1	0	1	0
0.9	25	1	0	1	0
1.0	25	1	0	1	0
1.1	25	1	0	1	0
1.2	25	1	0	1	0

ตาราง ค2. ผลการสอบถามผู้ประกอบการขนส่งกลุ่มที่ 2 (ต่อ)

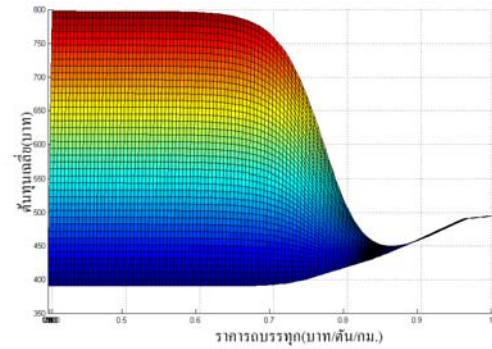
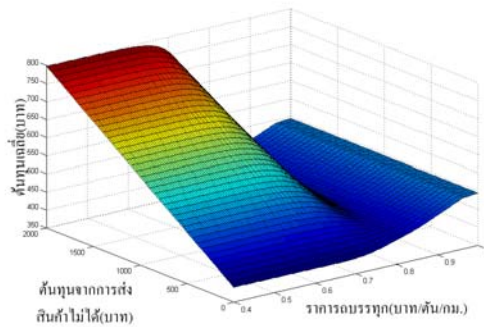
ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การ ว่าจ้าง	สินค้า ที่ขากลับ	ฤดูกาล	ผลการ ตัดสินใจ
1.3	25	1	0	1	0
0.7	25	1	1	0	0
0.8	25	1	1	0	1
0.9	25	1	1	0	1
1.0	25	1	1	0	1
1.1	25	1	1	0	1
1.2	25	1	1	0	1
1.3	25	1	1	0	1
0.7	25	1	1	1	0
0.8	25	1	1	1	0
0.9	25	1	1	1	1
1.0	25	1	1	1	1
1.1	25	1	1	1	1
1.2	25	1	1	1	1
1.3	25	1	1	1	1

ภาคผนวก ง

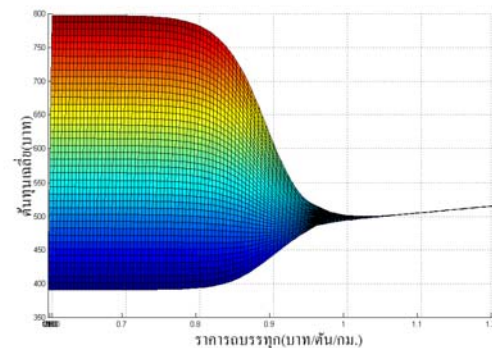
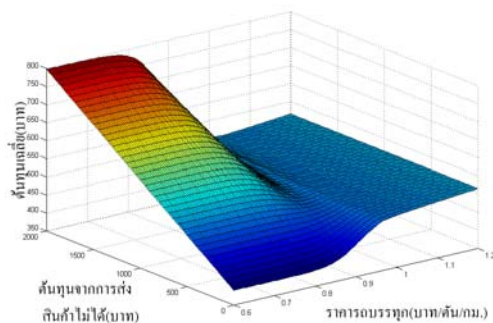
ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุน
จากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณีต่างๆ



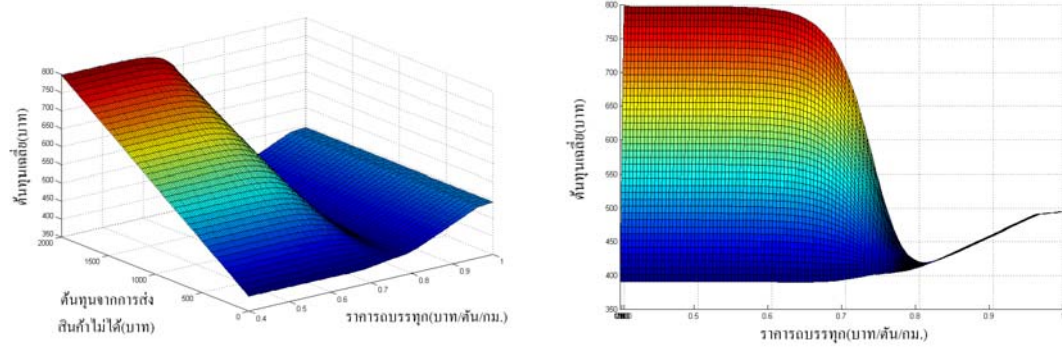
รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณีที่ 1



รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณีที่ 2



รูปที่ ง.3 ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณีที่ 3



รูปที่ ๔.๔ ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยกรณี 4

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

“Evaluation of Stochastic-Flow Networks using a Reliability Cost Index”

The 7th Asian Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2006)

December 17-20, 2006 Intercontinental Hotel Bangkok

“การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนด้วยต้นทุนเฉลี่ย”

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการประจำปีด้าน การจัดการ โลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (GTT) ครั้งที่ 7

15-16 พฤศจิกายน 2550 โรงแรมเจ้าพระยาปาร์ค กรุงเทพฯ

Evaluation of Stochastic-Flow Networks using a Reliability Cost Index

Viboon Pongpornsup and Charoenchai Khompatraporn[†]

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140 THAILAND

+662-470-9172, Emails: {viboon, ckhomp}@gmail.com

Abstract. The performance of an unreliable network is usually measured using a reliability index. The index is useful for certain situations such as when a business wants to design and control the network. There are, however, some other aspects of business management that cannot be answered by the reliability index alone. For instance, the path that one chooses to traverse may depend on both the reliability and the associated transportation cost. We propose here a reliability cost index that simultaneously considers the reliability of the network and its transportation cost to assist business planning and decision making. This reliability cost index is calculated based on the minimal paths of the network. Numerical examples are used to illustrate the procedure.

Keywords: Unreliable Network Evaluation, Monte Carlo Simulation, Reliability Index, Cost of Network

1. INTRODUCTION

An assumption often imposed in network analysis is that the network's components (nodes and arcs) can properly function to their full capacities. In reality, this assumption does not always hold. The capacity of each of the arcs in many real flow networks such as computer systems, telecommunication systems, urban traffic systems and logistics systems, is stochastic due to failure. Such network is called a stochastic-flow network. Most research studies regarding stochastic-flow networks evaluate the probability that the networks can send data or goods from the source to the sink under some criteria (Lin 2006, Ramirez-Marquez *et al* 2005). This probability is called the network reliability.

From the business management and decision making view point, merely the reliability of the network is often not sufficient to make a decision, but the cost of transmission must also be addressed. Some studies on stochastic-flow networks considered the transmission cost by treating it as the upper limit to evaluate the network reliability (Lin 2006, Yeh 2005). Under this treatment, any paths with the transmission cost exceeding the given cost limit are excluded from the calculation of the network reliability. In certain network evaluation such as when we want to decide whether to improve the reliability of sections of or the entire network, we would like to consider all possible paths, and then determine if the additional investment is worth the improvement. Unfortunately, there is no formal means to

address this type of situations. Hence, we present a reliability cost index to assess the stochastic-flow networks when they are not constrained by the transmission cost, and thus their reliabilities are evaluated from all the paths in their corresponding networks. The possible paths in the networks here refer to the minimal paths which are the paths connecting the sources to the sinks with the minimal number of arcs.

This paper is organized as follows. The next section contains some background of unreliable network analysis. Section 3 details the procedure to obtain the reliability cost index of a network. Numerical examples illustrating the calculation procedure are given in Section 4. Section 5 concludes the paper.

2. PRELIMINARIES

Network reliability theory has been extensively applied to many real-world systems such as transportation systems, oil and gas production systems, computer and communication systems, power transmission and distribution systems, and so on. The reliability of a network is defined as the probability that the source s can connect with the sink t .

If we assume that all nodes in the network are perfectly reliable, then the arcs become the elements that introduce unreliability in the network. This assumption is

applicable in many real-world cases such as in distribution systems that the nodes represent production plants, warehouses, and customers, and the arcs represent sections of roads or modes of transportation.

The simplest network is the network with binary states: working or fails. Specifically, we assume that the capacity of each of the arcs has binary states. One method used to obtain the network reliability is enumeration (Lin 2006, Yeh 2005, Jin *et al* 2003). The method basically lists all possible combinations of the component states to determine the state of the system (working or fails) through the minimal cuts (MCs) or minimal paths (MPs), and the reliability of the system is computed using the inclusion-exclusion principle (detailed in the appendix).

Unfortunately, enumeration is not efficient to compute the exact reliability for a large network, so some authors (Ramirez-Marquez *et al* 2005, Marseguerra *et al* 2005, Mello *et al* 1997) proposed Monte Carlo simulation as another approach to evaluate the network reliability. The following section describes the enumeration method and Monte Carlo simulation in more details.

2.1. Enumeration Method

The enumeration method begins with a mathematical model, which is often simplified, and evaluates the reliability based on the MCs or MPs. If we remove some arcs from the network until the source s disconnects with the sink t , then the set of such arcs is called a cut. A MC is a specific cut that will not longer be a cut after removing any arc from it. A MP is a minimum number of arcs that can serially connect the source s disconnects with the sink t . We focus our analysis based on the MP calculation since it can be applied to directly calculate the reliability cost index.

To demonstrate MPs in the network, let's consider a simple network in Fig. 1 below. In this network, there are totally 4 MPs, $\{a_1, a_2\}$, $\{a_1, a_3, a_6\}$, $\{a_5, a_6\}$ and $\{a_2, a_4, a_5\}$, and each path comprises of 2 to 3 arcs out of the 6 available arcs. The source s can connect with the sink t if at least one of these 4 MPs functions. Notice that there is no cost consideration associating with the MPs here.

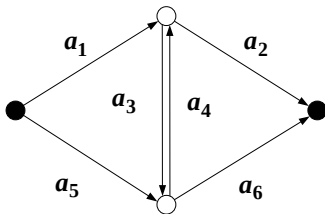


Figure 1: Sample 1 Network.

Some of these MPs may not function due to failure of some arcs. The reliability of the network is the

probability that data or goods can be transmitted using at least one of the MPs. Let $N = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ be the set of MPs, and n be the totally number of MPs, then the reliability R of the network can be obtained using Eqn. (1).

$$R = \Pr(X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_n) \quad (1)$$

Applying the inclusive-exclusive principle to Eqn. (1), we obtain:

$$R = \sum_{i=1}^n \Pr(X_i) - \sum_{i < j} \Pr(X_i \cap X_j) + \sum_{i < j < k} \Pr(X_i \cap X_j \cap X_k) - \dots \quad (2)$$

2.2. Monte Carlo Simulation

Simulation is a technique to estimate the system performance by trying to imitate the actual process which often involves randomness in the system. The method therefore treats the problem as a series of experiments conducted in the simulated time. The simulation process can be used to estimate various reliability parameters, and to obtain, if required, the probability distributions of the parameters. Monte Carlo simulation is applicable to a wide variety of problems where statistical sampling is employed to approximate solutions to quantitative problems such as structure analysis (Papadarakakis *et al* 2002), sensitivity analysis of a nuclear safety system (Marseguerra *et al* 2005), thermal radiation analysis (Zhao *et al* 2006) and performance evaluation of a power system (Billinton *et al* 2004, Zhaohong *et al* 2002).

Monte Carlo simulation depends heavily on random number generation to model the stochastic nature of the system. Through random number generation, inputs are randomly generated from some probability distributions that reflect the distributions of the actual population. At the end of the simulation, the generated points is statistically analyzed to obtain information of the system performance.

Let 1 represent the "working" status of a component (or an arc here) in the system, and 0 if not, z_i be a vector containing statuses of all components of the i^{th} sampling, and $F : z_i \rightarrow \{0,1\}$ be the function determining the status of the network (working = 1 or fails = 0). The average system performance from M the number of samplings is denoted by $\bar{F}$.

Then the steps in the Monte Carlo simulation to evaluate the performance (reliability) of a network can be summarized as follows:

1. Generate a random number from a distribution such as a uniform distribution for each of the components in the network.
2. For each of the components, compare the

generated number against a criterion to determine if the component is working or fails. Record 1 if the component is “working”, and 0 otherwise in z_i vector.

3. Evaluate z_i against a criterion to determine the overall network status $F(x_i)$.
4. Calculate the network performance (reliability) from the following expression:

$$\bar{F} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F(z_i). \quad (3)$$

5. Repeat step 1 to 4 until the value of the network performance converges or a stopping criterion is met.

In the next section, we apply the steps above to evaluate the reliability cost index, with an additional step to determine the cost. The details are discussed in section 3.2.

Let us now apply the Monte Carlo simulation to the network in Fig. 1. Suppose that after the first sampling, the arcs a_1 to a_6 have the following statuses $z_1 = \{1,1,1,0,1,1\}$. As a result, the goods or data can be sent from s to t , hence the network is “working”. Suppose that the second sampling yields $z_2 = \{1,0,1,0,1,0\}$, which consequently results in a “failed” network. Table 1 shows some examples of the sampling results of the network in Fig. 1.

Next calculate the reliability of the network by counting the number of “working” and dividing by the number of total samplings. Keep on sampling until the reliability values of two consecutive samplings converge or the stopping criterion is satisfied.

Table 1: Examples of Sampling Results from Monte Carlo Simulation

i^{th} sampling	Arc statuses	Network Status
1	$\{1,1,1,0,1,1\}$	Working
2	$\{1,0,1,0,1,0\}$	Fails
3	$\{1,0,0,0,0,1\}$	Fails
4	$\{0,0,0,0,1,1\}$	Working
...		...

3. RELIABILITY COST INDEX EVALUATION

In the pervious section, we show that the reliability of a network can be evaluated in two different methods, but the network cost has not yet been considered. In this section, we discuss how to address the network cost and its reliability simultaneously, based on the enumeration

method and the Monte Carlo simulation.

3.1. Enumeration-Based Method

In the enumeration method, the reliability of a network is purely evaluated from the probability of being able to use the MPs. Suppose that using each of the MPs incurs the cost C . Naturally, we would like to use the cheapest MP unless it is not functional.

Let $C(X_p)$ be the cost of using minimal path p ordered according to its associated cost from the cheapest to the most expensive one. Hence, the MP X_p is equally or more expensive than MP X_{p-1} , or $C(X_{p-1}) \leq C(X_p)$. The probability $\Pr(C(X_p))$ is the probability of incurring $C(X_p)$ from using the MP X_p because the MPs $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$ cannot be used. If none of the MPs is functional due to failure (unreliability), this incurs the cost (probably a fine) $C(u)$. Therefore the system expected cost calculated based on the MPs, their associated costs, and the probability of using these MPs is:

$$E(\text{Cost}) = \sum_{p=1}^n C(X_p) \Pr(C(X_p)) + C(u)(1-R). \quad (4)$$

We call this expected cost the “reliability cost index” since it relates the network reliability with the cost.

The probability $\Pr(C(X_p))$ can be written in terms of condition probability as follows:

$$\begin{aligned} \Pr(C(X_p)) &= \Pr(X_p = \text{work} \mid X_1, X_2, \dots, X_{p-1} = \text{fail}) \\ &\quad \times \Pr(X_1, X_2, \dots, X_{p-1} = \text{fail}) \\ &= \Pr(X_p \mid (X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_{p-1})') \\ &\quad \times \Pr(X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_{p-1})', \end{aligned}$$

Using set algebra, we get:

$$\Pr(C(X_p)) = \Pr(X_p) - \Pr(X_p \cap (X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_{p-1})). \quad (5)$$

Substituting Eqn. (5) into Eqn. (4), we have:

$$\begin{aligned} E(\text{Cost}) &= \sum_{p=1}^n C(X_p) [\Pr(X_p) \\ &\quad - \Pr(X_p \cap (X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_{p-1}))] \\ &\quad + C(u)(1-R), \end{aligned} \quad (6)$$

Applying the inclusion-exclusion principle to Eqn. (6), we obtain:

$$\begin{aligned}
 E(Cost) = & \sum_{p=1}^n C(X_p) \left[\Pr(X_p) - \sum_{q=1}^{p-1} \Pr(X_p \cap X_q) \right. \\
 & + \sum_{q=1}^{p-1} \sum_{r=q+1}^{p-1} \Pr(X_p \cap X_q \cap X_r) \\
 & \left. - \sum_{q=1}^{p-1} \sum_{r=q+1}^{p-1} \sum_{s=r+1}^{p-1} \Pr(X_p \cap X_q \cap X_r \cap X_s) + \dots \right] \\
 & + C(u)(1-R). \quad (7)
 \end{aligned}$$

3.2 Monte Carlo Simulation-Based Method

An alternative to estimate the reliability cost index $E(Cost)$ is through Monte Carlo simulation. The procedure is similar to that mentioned in section 2.2, with one modification in Step 3. The method starts with generating random numbers to determine the statuses (1 or 0) of the arcs and store the values in the vector z_i . Then, instead of determining the status of the network from z_i , we first search for all MPs from z_i using Dijkstra's algorithm. If there is no functional path connecting s to t , then we say that the network fails.

To demonstrate how the procedure can be implemented, let us revisit the network in Fig. 1. Suppose that the first sampling results in $z_1 = \{1,1,1,0,1,1\}$ which contains 2 MPs, $\{a_1, a_2\}$ and $\{a_1, a_3, a_6\}$. Suppose that the second sampling gives $z_2 = \{1,0,1,0,1,0\}$. Since there exists no path connecting s to t given the statuses of the arcs in z_2 , we say that the network fails in this case.

Next, select the MP with the cheapest cost, otherwise the cost equals to the fine (if the network fails). Specifically, the cost $C(z_i)$ equals to either the cheapest cost to connect s to t , or the cost of network failure. Then, the value of the reliability cost index can be estimated from the following equation:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C(z_i). \quad (8)$$

In the next section, we demonstrate how the two methods can be applied.

4. NUMERICAL EXAMPLES

Example 1

Let us now assign the probability of being able to use each of the arcs in the network in the Fig 1 and its associated cost as shown in Table 2. If the network fails, then it incurs the cost of 100.

Table 2: Probabilities and costs of the network in Fig.1

Arc	Status	Probability	Cost
a_1	Working	0.8	10
	Fails	0.2	
a_2	Working	0.8	25
	Fails	0.2	
a_3	Working	0.9	10
	Fails	0.1	
a_4	Working	0.9	20
	Fails	0.1	
a_5	Working	0.8	30
	Fails	0.2	
a_6	Working	0.8	25
	Fails	0.2	

After finding all MPs of this network, we obtain the reliability to be equaled to 0.91648. The associated costs of the MPs are shown in Table 3.

Table 3: The Minimum Paths and Costs

MP (X_i)	Set	Cost
X_1	$\{a_1, a_2\}$	35
X_2	$\{a_1, a_3, a_6\}$	45
X_3	$\{a_5, a_6\}$	55
X_4	$\{a_2, a_4, a_5\}$	75

Using Eqn. (7), the reliability cost index of this network is:

$$\begin{aligned}
 E(Cost) = & C(X_1) \times [\Pr(X_1) - 0] \\
 & + C(X_2) \times [\Pr(X_2) - \Pr(X_2 \cap X_1) + 0] \\
 & + C(X_3) \times [\Pr(X_3) - \Pr(X_3 \cap X_1) - \Pr(X_3 \cap X_2) \\
 & + \Pr(X_3 \cap X_1 \cap X_2)] + C(X_4) \times [\Pr(X_4) \\
 & - \Pr(X_4 \cap X_1) - \Pr(X_4 \cap X_2) - \Pr(X_4 \cap X_3) \\
 & + \Pr(X_4 \cap X_1 \cap X_2) + \Pr(X_4 \cap X_1 \cap X_3) \\
 & + \Pr(X_4 \cap X_2 \cap X_3) - \Pr(X_4 \cap X_1 \cap X_2 \cap X_3)] \\
 & + C(u) \times (1 - R). \\
 E(Cost) = & 35 \times [0.64] + 45 \times [0.576 - 0.4608]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 55 \times [0.64 - 0.4096 - 0.4608 + 0.36864] \\
 &+ 75 \times [0.576 - 0.4608 - 0.331776 - 0.4608 \\
 &+ 0.331776 + 0.36864 + 0.331776 - 0.331776] \\
 &+ 100 \times [1 - 0.91648] \\
 &= 22.4 + 5.184 + 7.6032 + 1.728 + 100 \times 8.352 \\
 &= 36.9152 + 100 \times 0.08352 \\
 &= 45.2672.
 \end{aligned}$$

Applying Monte Carlo simulation with 4,000 replications and the same parameters to this network, we obtain the network reliability $\bar{F}$ and the reliability cost index $\bar{C}$ to be equaled to 0.9132 and 45.2312, respectively. The results from the Monte Carlo simulation are shown in Figure 2 below.

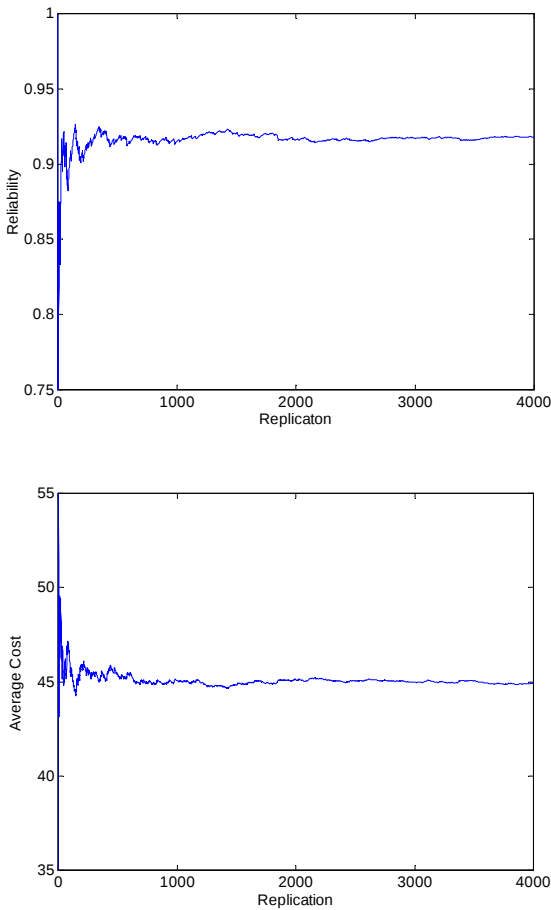


Figure 2: Result of Monte Carlo Simulation

Notice that the value of $E(\text{Cost}) = 45.2672$ obtained from the enumeration-based method is very close to $\bar{C} = 45.2312$ from Monte Carlo simulation-based method, as expected.

If we can improve the reliability of both arcs a_1 and a_2 to 0.9 and are willing to pay the increased costs of 15 and 30, respectively, the corresponding reliability of the network is going to increase to 0.9575 with the price of an increase in the reliability cost index to 44.5636.

The reliability cost index can also be used to evaluate the network when there is a new arc in the network due to a new road construction, new mode of transportation, or a new available service. The index is useful such as when a company needs to determine if the new route is worth negotiating for a new contract with a transportation service provider.

Example 2

Let us consider the network in Fig. 2 with the cost of the arcs as shown in Table 4 and the fine of 100 if the network fails. In this network, there are 4 MPs: $\{a_1, a_4\}$, $\{a_1, a_5, a_7\}$, $\{a_3, a_6, a_7\}$, and $\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$. By the enumeration-based method, the reliability of network is found to be 0.862198, and the corresponding reliability cost index is $44.012 + 100 \times 0.137802 = 57.7922$. Again, these results are similar to those from the Monte Carlo simulation-based method shown in Fig. 4.

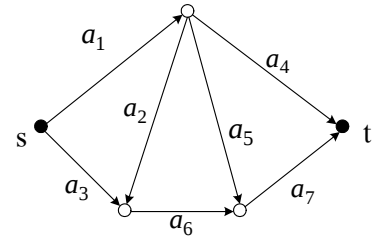


Figure 3: Sample 2 Network

If we add the new arc a_8 that has probability of working = 0.9 and cost = 28 to the network in the Fig 4, there are 2 additional MPs, $\{a_3, a_8\}$ and $\{a_1, a_2, a_8\}$, to connect s to t . The reliability of this modified network is increased to 0.9582, while the reliability cost index is surprisingly decreased to 51.5009. The decrease in the reliability cost index is due to a significant increase in the network reliability, which implies that chance of network failure has been decreased. This consequently decreases the value of the $C(u)(1-R)$ term.

The change in the reliability cost index is an indicator signaling that it is probably worth negotiating for a new term of contract. If the company is investing in the additional service route, resulting in an increase in the network reliability, it may want to increase the fine if the transportation service provider cannot deliver goods under the improved network.

Table 4: Probabilities and costs of the network in Fig.3

Arc	Status	Probability	Cost
a_1	Working	0.80	10
	Fails	0.20	
a_2	Working	0.80	12
	Fails	0.20	
a_3	Working	0.85	24
	Fails	0.15	
a_4	Working	0.90	46
	Fails	0.10	
a_5	Working	0.80	30
	Fails	0.20	
a_6	Working	0.75	10
	Fails	0.25	
a_7	Working	0.70	15
	Fails	0.30	

From the numerical examples, the enumeration-based method and the Monte Carlo simulation-based method produce very similar results numerically, but there are advantages and disadvantages when implementing the two methods. The former method gives the exact value of the reliability cost index but the method can be intractable when the network is large, whereas the latter one utilizes computational algorithms that can be easily programmed, but the time the method takes to obtain the result can be seriously effected by the size of the network.

5. CONCLUSION

We presented a methodology called the reliability cost index that addresses both the cost and the reliability of the network simultaneously. The index is calculated based upon the minimal paths of the network and their associated costs. Moreover, the reliability cost index can be obtained in two ways: one based on the enumeration method and the other on Monte Carlo simulation. The enumeration-based method gives an exact value but can be intractable when the network is large. The Monte Carlo simulation-based method can be easily programmed but the time it takes to obtain the results can also be greatly effected by the size of the network. Finally, we demonstrated how the reliability cost index can be applied using two network examples.

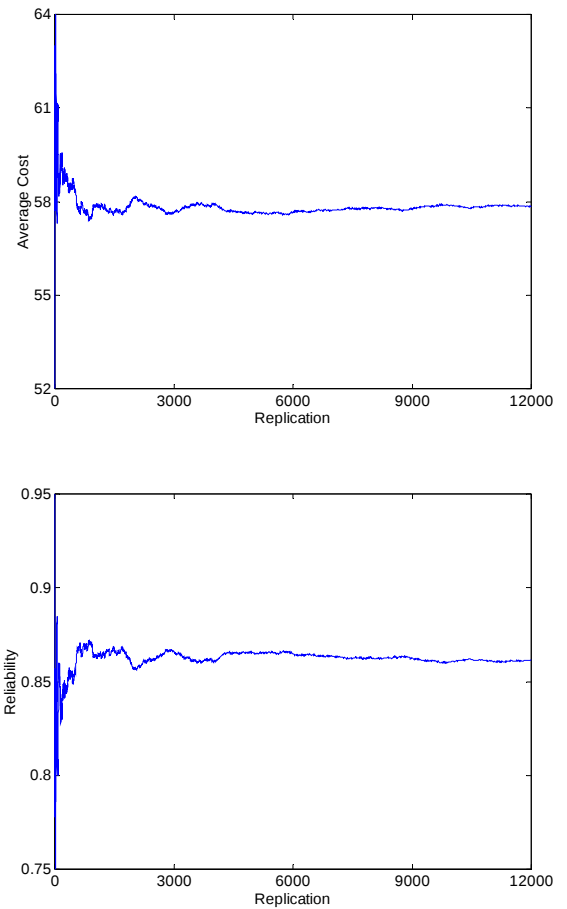


Figure 4: Result of Monte Carlo Simulation

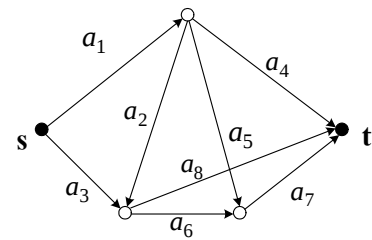


Figure 5: Modified Sample 2 Network

ACKNOWLEDGMENT

This research is partially supported by the Department of Production Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi, and Thailand Research Fund under grant RDG5050007.

APPENDIX

Inclusion-Exclusion Principle

$$\begin{aligned} \Pr(D_1 \cup D_2 \dots D_r) &= \sum_i \Pr(D_i) - (-1)^2 \sum_{i < j} \Pr(D_i \cap D_j) \\ &\quad - (-1)^3 \sum_{i < j < k} \Pr(D_i \cap D_j \cap D_k) - \dots \end{aligned}$$

Conditional Probability

$$\begin{aligned} \Pr(A|B') \times \Pr(B') &= \frac{\Pr(A \cap B')}{\Pr(B')} \times \Pr(B') \\ &= \Pr(A \cap B') \\ &= \Pr(A) - \Pr(A \cap B). \end{aligned}$$

REFERENCES

- Billinton, R. and Tang, X. (2004) Selected considerations in utilizing Monte Carlo simulation in quantitative reliability evaluation of composite power systems *Electric Power Systems Research*, **69**(2-3), 205-211.
- Jin, T. and Coit, D.W. (2003) Approximating network reliability estimates using linear and quadratic unreliability of minimal cuts *Reliability Engineering & System Safety*, **82**(1), 41-48.
- Goel, L. (2000) Monte Carlo simulation-based reliability studies of a distribution test system *Electric Power Systems Research*, **54**(1), 55-65.
- Lin, Y-K. (2006) Evaluate the performance of a stochastic-flow network with cost attribute in terms of minimal cuts *Reliability Engineering & System Safety*, **91**(5), 539-545.
- Marseguerra, M., Zio, E. and Podofillini, L. (2005) First-order differential sensitivity analysis of a nuclear safety system by Monte Carlo simulation *Reliability Engineering & System Safety*, **90**(2-3), 162-168.
- Mello, J.C.O., Pereira, M.V.F., Leite da Silva, A.M. and Melo, A.C.G. (1997) Application of chronological load modeling in composite reliability worth evaluation *Electric Power Systems Research*, **40**(3), 167-174.
- Papadrakakis, M. and Lagaros, N.D. (2002) Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **191**(32), 3491-3507.
- Ramirez-Marquez, J.E. and Coit, D.W. (2005) A Monte-Carlo simulation approach for approximating multi-state two-terminal reliability *Reliability Engineering & System Safety*, **87**(2), 253-264.
- Yeh, W-C. (2005) A new approach to evaluate reliability of multistate networks under the cost constraint *Omega* **33**(3), 203-209.
- Zhao, Z., Cang, D., Wu, W., Li, Y. and Li, B. (2006) A new hybrid method—combined heat flux method with Monte-Carlo method to analyze thermal radiation *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy*, **13**(1), 25-28.
- Zhaohong, B. and Xifan, W. (2002) Studies on variance reduction technique of Monte Carlo simulation in composite system reliability evaluation *Electric Power Systems Research*, **63**(1), 59-64.

AUTHOR BIOGRAPHIES

Viboon Pongpornsup is a graduate student in Quality Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. He received both bachelor and master degrees in Electrical Engineering from Chulalongkorn University. His email address is <viboon@gmail.com>.

Charoenchai Khompatraporn is a lecturer in the Department of Production Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. He received his bachelor and master degrees in Mechanical Engineering from Rensselaer Polytechnic Institute and Georgia Institute of Technology, respectively. He then obtained another master degree and a Ph.D. in Industrial Engineering, both from the University of Washington. His research interests include stochastic global optimization, applied operations research, and logistics and supply chain. His email address is <ckhomp@gmail.com>.

การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนด้วยต้นทุนเฉลี่ย และการประยุกต์ใช้

วิบูลย์ พงศ์พรทรัพย์, เจริญชัย โขมพัตรภรณ์*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

โทร 0-2470-9172 โทรสาร 0-2872-9081 E-mail {viboon,*ckhomp}@gmail.com

บทคัดย่อ

ในการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนั้น โดยส่วนมากจะทำการประเมินผ่านความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเป็นหลักและกำหนดให้ปัจจัยอื่นๆ เป็นเพียงข้อจำกัดของโครงข่าย ซึ่งในบางครั้งการประเมินระบบโครงข่ายด้วยวิธีการเช่นนี้ไม่เพียงพอที่จะนำไปตัดสินใจได้ว่าระบบโครงข่ายดังกล่าวดีมาน้อยเพียงใด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนผ่านต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) ซึ่งเป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดจากการใช้ระบบโครงข่ายด้วยเส้นทางต่างๆ ร่วมกับความน่าจะเป็นที่จะใช้เส้นทางนั้นๆ โดยต้นทุนที่นำมาพิจารณาสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ ต้นทุนจากการขนส่งสินค้าและต้นทุนจากการที่ไม่สามารถขนส่งสินค้าผ่านระบบโครงข่ายได้ ส่วนการหาความน่าจะเป็นของเส้นทางในระบบโครงข่ายได้ใช้การวิเคราะห์ด้วยการถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression) จากนั้นได้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีต้นทุนเฉลี่ยด้วยตัวอย่างจริงของระบบโครงข่ายการขนส่งที่มีความไม่แน่นอน

คำสำคัญ: ต้นทุนเฉลี่ย; ความน่าเชื่อถือ; ระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน; การถดถอยโลจิสติก; มินิมัลพาท

1. ที่มาและความสำคัญ

ธุรกิจและอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการแข่งขันที่สูงขึ้น การลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งสำคัญในการแข่งขันกับคู่แข่ง แต่องค์กรในธุรกิจประเภทเดียวกันมักใช้เทคโนโลยีในการผลิตสินค้าที่คล้ายคลึงกัน ส่งผลให้การลดต้นทุนการผลิตมีลักษณะที่คล้ายกันด้วย เมื่อทำการลดต้นทุนการผลิตจนถึงจุดจุดหนึ่งต้นทุนการผลิตขององค์กรในธุรกิจประเภทเดียวกันมักไม่มีความแตกต่างกันมาก หลายองค์กรจึงหันมาสนใจการลดต้นทุนในด้านการจัดส่งสินค้าต่อการลดต้นทุนการผลิตซึ่งถือว่าเป็นต้นทุนที่สำคัญอีกหมวดหนึ่ง เนื่องจากต้นทุนในการจัดส่งสินค้านั้นเป็นต้นทุนในเชิงการจัดการโดยแต่ละองค์กรอาจมีนโยบายที่แตกต่างกันไป บางองค์กรมีหน่วยงานขนส่งสินค้าเป็นของตนเองแต่บางองค์กรจะทำการจ้างบริษัทขนส่งภายนอกให้ทำการขนส่งสินค้าให้ส่งผลให้ต้นทุนในการขนส่งสินค้าของแต่ละองค์กรมีความแตกต่าง

เมื่อพิจารณาถึงระบบในการขนส่งสินค้าซึ่งรวมถึงตั้งแต่ โรงงาน โกดัง ศูนย์กระจายสินค้า จนถึงลูกค้าตลอดจนเส้นทางต่างๆ ในการขนส่งสินค้า พบว่าระบบดังกล่าวมีลักษณะเชื่อมโยงกันเป็นระบบโครงข่าย (Network) และงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่จะทำให้เกิดต้นทุน (หรือ ระยะเวลา) ในการขนส่งสินค้าที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไข (Constraints) ต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เหมาะสมกับระบบโครงข่ายนั้นๆ เช่น Dijkstra's Algorithm (Misra, 2001) Linear Programming (Avella, et al. 2006) และ Neural Network (Horiguchi, et al. 2004)

ในการศึกษาเพื่อค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำสุดในงานวิจัยเหล่านี้กำหนดให้เส้นทางต่างๆ ในระบบโครงข่ายที่ทำการศึกษาไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Deterministic Model) แต่ในความเป็นจริงนั้นระบบโครงข่ายมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้เช่น เส้นทางบางเส้นทางไม่สามารถใช้การได้ชั่วคราวอันเนื่องจากปัจจัยบางอย่าง ซึ่งจะส่งผลให้เส้นทางที่ทำการเลือกไว้ไม่สามารถใช้ขนส่งสินค้าได้ หรืออาจส่งผลให้ทั้งระบบโครงข่ายนี้ไม่สามารถขนส่งสินค้าได้เลย เนื่องจากไม่สามารถเชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้ ดังนั้นเมื่อระบบโครงข่ายเกิดความไม่แน่นอนขึ้น การค้นหาเส้นทางที่มีต้นทุนที่ต่ำที่สุดเพื่อนำมาใช้กำหนดต้นทุนในการขนส่งจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้

เมื่อทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การค้นหาจำนวนของระบบย่อยของระบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallels System) เพื่อให้มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด (Optimum Redundant System) และการประเมินหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย (Network Reliability) โดยค่าความน่าเชื่อถือที่ได้จากการประเมินระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอนนั้น จะถูกนำไปใช้ประเมินว่าระบบโครงข่ายการขนส่งที่มีอยู่นั้นมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร ถ้าระบบมีความน่าเชื่อถือต่ำแสดงว่ามีโอกาสที่ระบบจะไม่สามารถขนส่งสินค้าได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทำการปรับปรุงระบบโครงข่ายให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในการปรับปรุงระบบโครงข่ายนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนจะใช้วิธีใดในการปรับปรุงโครงข่ายนั้นอาจพิจารณาจากความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่ทำการปรับปรุงโดยเลือกวิธีที่ให้ค่าความน่าเชื่อถือที่ดีกว่า แต่การพิจารณาจากค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่ได้อะไรที่ดีที่สุดเสมอไป เนื่องจากระบบโครงข่ายที่มีความน่าเชื่อถือใกล้เคียงกันอาจมีต้นทุนในการใช้ระบบแตกต่างกันได้ ดังนั้นในการประเมินระบบโครงข่ายควรนำเอาต้นทุนในการขนส่งมาร่วมพิจารณาด้วยเพื่อให้สามารถเลือกวิธีในการปรับปรุงระบบโครงข่ายที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายชิ้น เช่น Lin (2006) หรือ Yeh (2004) ได้นำต้นทุนในการใช้เส้นทางขนส่งมาเป็นข้อจำกัดในการประเมินความน่าเชื่อถือ กล่าวคือเป็นการประเมินหาความน่าเชื่อถือของระบบโดยมีเงื่อนไขว่าเส้นทางที่จะใช้ในการขนส่งจะต้องมีต้นทุนไม่เกินที่กำหนดไว้ด้วย แต่ยังไม่มียานวิจัยที่นำต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายมาร่วมพิจารณากับความน่าเชื่อถือแต่อย่างใด

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงทำการพัฒนาตัวชี้วัดที่เรียกว่า “ต้นทุนเฉลี่ย” (Expected Cost) ซึ่งเป็นการนำต้นทุนในการใช้ระบบโครงข่ายมาร่วมพิจารณากับความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอนนี้ โดยมีพื้นฐานจากการหาค่าคาดหวัง (Expected Value) ซึ่งเกิดจากผลรวมของต้นทุนที่เกิดขึ้นคูณกับความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์นั้นจะเกิดขึ้น

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

ในการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยนี้นั้นมีแนวคิดพื้นฐานมาจากการหาค่าคาดหวัง ซึ่งจำเป็นต้องหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ก่อนจึงจะสามารถหาค่าคาดหวังได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงวิธีการประเมินค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งพบว่ามีอยู่ 2 วิธี (Billinton, 1992) ได้แก่ 1) การคำนวณโดยตรง (Analytical Calculation) และ 2) คือการจำลองเหตุการณ์โดยใช้หลักการของการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) โดยค่าความน่าเชื่อถือที่ได้จากการคำนวณโดยตรงจะเป็นค่าที่ถูกต้องแต่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการคำนวณเมื่อระบบโครงข่ายมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น มีจำนวนโหนด (Nodes) หรือ ทางเชื่อม (Edges) มากขึ้น ส่วนของการจำลองเหตุการณ์เป็นการประมาณค่าความน่าเชื่อถือได้ของระบบโดยการสุ่มจำลองเหตุการณ์ของแต่ละระบบย่อยว่าเป็นสถานการณ์ใด

แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดมาประเมินระบบโดยรวมเป็นเช่นไร การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกในการประมาณค่าผ่านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ค่าความน่าเชื่อถือของระบบที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์จะเป็นค่าโดยประมาณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการคำนวณโดยตรง

อย่างไรก็ตามการประเมินค่าความน่าจะเป็นของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนนี้ จำเป็นต้องทำการประเมินความน่าเชื่อถือของทางเชื่อมต่างๆ ในระบบโครงข่ายก่อน โดยสามารถทำการประเมินได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis) มาช่วยในการประเมินค่าความน่าจะเป็นของทางเชื่อม

2.1 การประเมินค่าความน่าเชื่อถือ

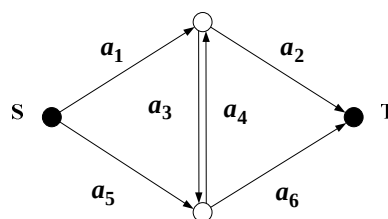
สำหรับวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณความน่าเชื่อถือของโครงข่ายมีหลายวิธีเช่น วิธีมินิมัลคัต (Minimal Cut) วิธีมินิมัลพาธ (Minimal Path) และวิธีการวิเคราะห์แผนภาพต้นไม้ของข้อผิดพลาด (Fault Tree Analysis) ฯลฯ ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะวิธีมินิมัลพาธ เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายต่อไป

การใช้วิธีมินิมัลพาธเพื่อทำการประเมินค่าความน่าเชื่อถือนั้นจะต้องเริ่มต้นจากการค้นหามินิมัลพาธก่อน ซึ่งจะมีนิยามดังนี้

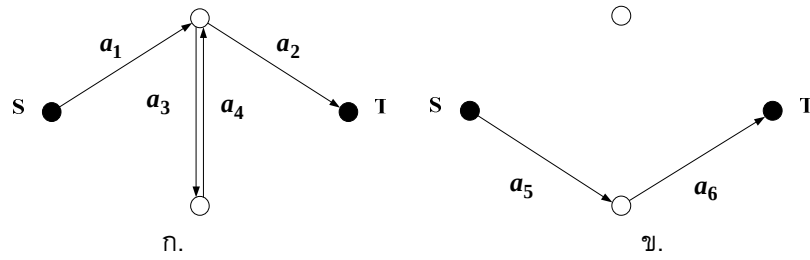
นิยาม

- พาธ (Path) คือ กลุ่มหรือเซตของทางเชื่อม (Edges) ใดๆ ในระบบโครงข่าย ซึ่งสามารถใช้เชื่อมโยงโครงข่ายจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายที่กำหนดได้
- มินิมัลพาธ (Minimal Path : MP) คือ พาธที่มีจำนวนสมาชิกน้อยที่สุด โดยที่หากมีทางเชื่อมใดทางเชื่อมหนึ่งในพาธนี้ไม่สามารถใช้งานได้แล้ว จะทำให้ไม่เป็นพาธอีกต่อไป ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถเชื่อมจุดเริ่มต้นและจุดปลายได้

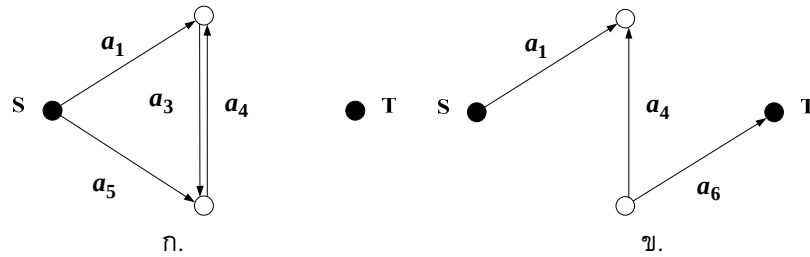
ยกตัวอย่างเช่นระบบโครงข่ายในรูปที่ 1 (Lin, 2001) ซึ่งเป็นระบบโครงข่ายที่มี 4 โหนด และ 6 ทางเชื่อม มีจุดเริ่มต้นที่ S และจุดปลายที่ T เราจะได้ว่า $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ และ $\{a_5, a_6\}$ เป็นพาธ เนื่องจากทางเชื่อมดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงระบบโครงข่ายจาก S ไปยัง T ได้ดังแสดงในรูปที่ 2ก. และ 2ข. ในขณะที่ $\{a_1, a_3, a_4, a_5\}$ และ $\{a_1, a_4, a_6\}$ ไม่ถือว่าเป็นพาธ เนื่องจากไม่สามารถเชื่อมโยงระบบโครงข่ายจาก S ไปยัง T ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3ก. และ 3ข. และเมื่อทำการพิจารณาพาธ $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ และ $\{a_5, a_6\}$ จะพบว่า $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ ไม่เป็นมินิมัลพาธ เนื่องจากเมื่อทำการตัดทางเชื่อม a_3 หรือ a_4 ทิ้งไป เซตของทางเชื่อมที่เหลือก็ยังคงเชื่อมโยง S กับ T ได้ ส่วน $\{a_5, a_6\}$ เป็นมินิมัลพาธเนื่องจากไม่ว่าตัดทางเชื่อมใดทิ้งไปก็ทำให้เซตของทางเชื่อมที่เหลือไม่สามารถเชื่อมโยง S กับ T ได้



รูปที่ 1: ตัวอย่างระบบโครงข่ายที่ 1



รูปที่ 2: ตัวอย่างของพาหนะในตัวอย่างระบบโครงข่ายที่ 1



รูปที่ 3: ตัวอย่างของกลุ่มทางเชื่อมที่ไม่ใช่พาหนะในตัวอย่างระบบโครงข่ายที่ 1

จากตัวอย่างโครงข่ายในรูปที่ 1 มีมินิมัลพาหนะทั้งหมด 4 มินิมัลพาหนะคือ $\{a_1, a_2\}$, $\{a_5, a_6\}$, $\{a_1, a_3, a_6\}$ และ $\{a_2, a_4, a_5\}$ และสามารถหาความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายได้เป็นดังสมการที่ (1)

$$R = \Pr(\{a_1, a_2\} \cup \{a_5, a_6\} \cup \{a_1, a_3, a_6\} \cup \{a_2, a_4, a_5\}) \quad (1)$$

โดยที่ R = ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่าย

$\Pr(\cdot)$ = ความน่าจะเป็น

ดังนั้นถ้าเรากำหนดให้ X_i แทนมินิมัลพาหนะที่ i ของระบบโครงข่ายและ n เป็นจำนวนมินิมัลพาหนะทั้งหมดที่มีในระบบโครงข่าย จะสามารถแสดงความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายที่จะสามารถเชื่อมโยงจุด S ไปยัง T ได้เป็น

$$R = \Pr(X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_i \cup \dots \cup X_n) \quad (2)$$

2.2 การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic Regression Analysis)

ในปัจจุบันการพยากรณ์ได้เข้ามามีบทบาทในการวิจัยสาขาต่างๆ โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งในการพยากรณ์คือ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งคือตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ซึ่งอาจเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Qualitative Variables) หรือตัวแปรเชิงคุณภาพ (Quantitative Variables) ก็ได้ และอีกกลุ่มหนึ่งคือ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ซึ่งต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น แต่ปัญหาที่พบในความเป็นจริงนั้นมีหลายปัญหาที่ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพเช่น ปัญหาทางการแพทย์ ปัญหาทาง

สังคมศาสตร์ และปัญหาทางเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ มักมีตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพที่มีค่าที่เป็นไปได้เพียง 2 ค่า (Dichotomous Dependent Variables) เช่น การเกิดโรค (เกิด-ไม่เกิด) ผลการสอบเข้ามหาวิทยาลัย (ได้-ไม่ได้) การตัดสินใจ (เลือก-ไม่เลือก) เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากตัวแปรตามมีค่าเป็นไปได้อีกเพียง 2 ค่าซึ่งไม่ใช้การแจกแจงปกติตรงตามข้อสมมติพื้นฐานทั่วไปของสมการถดถอยเชิงเส้น และทำให้ความคลาดเคลื่อนที่ได้ไม่มีการแจกแจงแบบปกติด้วย จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์อื่นแทน โดยวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันคือ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Hosmer and Lemeshow, 2000)

ในการวิเคราะห์การถดถอยเมื่อตัวแปรตาม Y มีการแจกแจงแบบ Bernoulli; $Y \sim b(1, \pi(x))$ โดย $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ คือกลุ่มของตัวแปรอิสระ ซึ่ง Y มีค่าเป็น 1 แทน “ใช่หรือสิ่งที่สนใจ” หรือ 0 แทน “ไม่ใช่หรือสิ่งที่ไม่สนใจ” ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{ด้วยความน่าจะเป็น } \pi(x) \\ 0 & \text{ด้วยความน่าจะเป็น } 1 - \pi(x) \end{cases}$$

โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการแจกแจงโลจิสติก มีรูปแบบดังนี้

$$\pi(x) = E(Y | x) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_l x_l)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_l x_l)} \quad (3)$$

โดยที่ $E(Y | x)$ = ค่าพยากรณ์ของ Y เมื่อกำหนดตัวแปรอิสระ x ซึ่งจะมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็น $\pi(x)$

$x_1, x_2, \dots, x_l$ = ตัวแปรอิสระที่ 1, 2, ..., l

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_l$ = สัมประสิทธิ์การถดถอย

3. การประเมินต้นทุนเฉลี่ย

ต้นทุนเฉลี่ย (Expected Cost) มีพื้นฐานมาจากการคำนวณค่าคาดหวัง ซึ่งเกิดจากผลคูณของต้นทุน C_i และความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุนดังกล่าว $\Pr(C_i)$ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^m C_i \Pr(C_i) \quad (4)$$

โดยที่ $E(Cost)$ = ต้นทุนเฉลี่ย

C_i = ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ i ใดๆ

$\Pr(C_i)$ = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน C_i

m = จำนวนเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดในระบบโครงข่าย

จากการประเมินต้นทุนเฉลี่ยด้วยการแจกแจง พบว่าต้นทุนที่ใช้ในการประเมินต้นทุนเฉลี่ยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ต้นทุนจากการใช้เส้นทางที่เลือก และต้นทุนอันเกิดจากการที่ไม่สามารถขนส่งโดยใช้ระบบโครงข่าย เช่น ค่าปรับอันเนื่องมาจากการที่ไม่สามารถส่งมอบสินค้าได้ตามเวลา หรือค่าเสียโอกาสในการขายสินค้า จึงกำหนดให้ $C(Y_i)$ แทนต้นทุนที่เกิดจากการใช้เส้นทางมินิลพาท Y_i โดยเรียงลำดับตาม

ต้นทุนที่น้อยสุดไปถึงมากที่สุด ดังนั้นจะได้ว่าต้นทุนมินิมัลพาต Y_i จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าต้นทุนของมินิมัลพาต Y_{i-1} หรือ $C(Y_{i-1}) \leq C(Y_i)$ เสมอ และกำหนดให้ $\Pr(C(Y_i))$ แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จากการใช้มินิมัลพาต Y_i เมื่อไม่สามารถใช้มินิมัลพาต $Y_1, Y_2, \dots, Y_{i-1}$ ได้ แต่ถ้าหากไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายดังกล่าวในการขนส่ง จะเกิดต้นทุน C_u ขึ้น โดยมีความน่าจะเป็นในการเกิดเท่ากับความน่าจะเป็นที่ไม่สามารถใช้ระบบโครงข่ายได้ $(1-R)$

ดังนั้น จากสมการต้นทุนเฉลี่ย (4) ซึ่งมีเหตุการณ์ทั้งหมดจำนวน m เหตุการณ์ เราสามารถเขียนสมการต้นทุนเฉลี่ยใหม่จากต้นทุนทั้ง 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกเกิดจากการใช้มินิมัลพาตในระบบโครงข่ายซึ่งมีจำนวน n มินิมัลพาต และส่วนที่ 2 เกิดจากการไม่สามารถใช้มินิมัลพาตในระบบโครงข่ายได้ อีก 1 พจน์ ได้เป็น

$$E(Cost) = \sum_{i=1}^n C(Y_i) \Pr(C(Y_i)) + C_u (1-R). \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) ความน่าจะเป็นในการเกิดต้นทุน $C(Y_i)$ จะต้องมีความน่าจะเป็นที่มินิมัลพาต Y_i สามารถใช้งานได้ ในขณะที่มินิมัลพาตอื่นๆ ที่มีต้นทุนที่ต่ำกว่า $C(Y_i)$ ไม่สามารถใช้งานได้ (นั่นคือมินิมัลพาต $Y_{i-1}, Y_{i-2}, \dots, Y_1$, ซึ่งมีต้นทุน $C(Y_i) \geq C(Y_{i-1}) \geq C(Y_{i-2}) \geq \dots \geq C(Y_1)$) จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถเขียน $\Pr(C(Y_i))$ ได้ใหม่ดังสมการที่ (6)

$$\Pr(C(Y_i)) = \Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \Pr(Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})'. \quad (6)$$

และจากวิธีการ “ผลบวกของผลคูณที่ไม่ซ้ำกันของสมาชิกย่อย” (Sum of Disjoint Products) (Abraham, 1979) จะได้ว่า

$$\Pr(Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})' = \Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \quad (7)$$

เมื่อนำสมการที่ (7) ไปแทนในสมการที่ (6) จะได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \Pr(C(Y_i)) &= \Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \left[\Pr(Y_1') + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \right] \end{aligned} \quad (8)$$

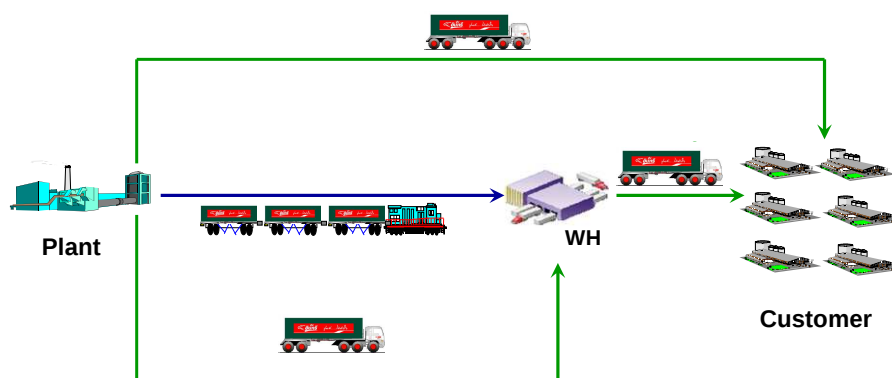
นำสมการที่ (8) ไปแทนลงในสมการที่ (5) จะได้สมการในการคำนวณค่าต้นทุนเฉลี่ยเป็น

$$\begin{aligned} E(Cost) &= \sum_{i=1}^n C(Y_i) \left[\Pr(Y_i | (Y_1 \cup Y_2 \cup \dots \cup Y_{i-1})') \times \left[\Pr(Y_1') + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2') + \dots + \Pr(Y_1) \times \Pr(Y_2) \times \dots \times \Pr(Y_{i-1}') \right] \right] + C_u (1-R). \end{aligned} \quad (9)$$

จากสมการที่ได้ดังกล่าวรวมถึงการวิเคราะห์การถดถอยในหัวข้อที่ 2 จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการขนส่งสินค้าของบริษัทหนึ่ง ข้อมูลทั้งหมดได้จากบริษัทที่เป็นกรณีศึกษาและผู้ประกอบการที่ให้บริการขนส่งสินค้าแก่บริษัท

4. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ต้นทุนเฉลี่ยในการประเมินระบบการขนส่งที่มีความไม่แน่นอน

ตัวอย่างระบบการขนส่งสินค้าของบริษัทแห่งหนึ่งสู่ภาคอีสานสามารถเขียนเป็นแผนภูมิจำลองได้ดังแสดงในรูปที่ 4 บริษัทกรณีศึกษาใช้การว่าจ้างผู้ประกอบการการขนส่งสินค้าในการทำหน้าที่ขนส่งสินค้าจากโรงงานผลิตไปยังลูกค้าโดยอาจจะผ่านหรือไม่ผ่านคลังสินค้า (Warehouse: WH) รูปแบบการขนส่ง (Modes) มีทั้งทางรถบรรทุกและทางรถไฟ ซึ่งรูปแบบการขนส่งเหล่านี้เปรียบเสมือนทางเชื่อมในระบบโครงข่าย ซึ่งในบางช่วงอาจประสบกับปัญหาการว่าจ้างผู้ขนส่งเนื่องจากปริมาณการขนส่งสินค้าในเขตภาคอีสานจะมีความแตกต่างกันไปตามฤดูกาล ทำให้ผู้ประกอบการมักพิจารณาปริมาณขนส่งอื่นๆ ที่ให้ราคาดีกว่างานของบริษัท หรือในบางเส้นทางอาจสามารถใช้รูปแบบการขนส่งเพียงรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งได้เท่านั้น ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับทางเชื่อมเหล่านี้



รูปที่ 4: ระบบการขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้า

ในการประยุกต์ใช้วิธีการประเมินโดยวิธีต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน จำเป็นต้องมีข้อมูลเบื้องต้นของโครงข่ายก่อน นั่นคือต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละทางเชื่อมกับค่าความน่าจะเป็นที่ทางเชื่อมแต่ละทางเชื่อมจะสามารถทำงานได้ โดยในการหาความน่าจะเป็นของผู้ขนส่งแต่ละรายจะใช้วิธีการแตกต่างกันทั้งนี้เพราะข้อมูลของผู้ขนส่งแต่ละรายไม่เหมือนกัน ดังนี้

- การขนส่งด้วยรถไฟจากโรงงานไปยังคลังสินค้า จะใช้ข้อมูลการขนส่งในอดีตของแต่ละเดือนในการกำหนดต้นทุนการขนส่งและประมาณความน่าจะเป็นที่รถไฟจะสามารถขนส่งสินค้าได้
- การขนส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า จะใช้ข้อมูลการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าในอดีตของแต่ละเดือนในการกำหนดต้นทุนการจัดเก็บและการขนส่ง และประมาณความน่าจะเป็นที่สามารถส่งสินค้าให้ลูกค้าได้ตามเวลาที่ต้องการ
- การขนส่งด้วยรถบรรทุกจากโรงงานไปยังคลังสินค้าหรือไปยังลูกค้า จะใช้วิธีการประเมินผู้ขนส่งด้วยแบบสอบถามเนื่องจากไม่มีข้อมูลการขนส่งในอดีตที่สามารถนำมาใช้ประเมินหาความน่าเชื่อถือได้ ดังมีรายละเอียดดังนี้

จากการสัมภาษณ์ผู้ประกอบการขนส่งเบื้องต้นพบว่า ราคาค่าขนส่งสินค้าจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นอกเหนือจากราคาขนส่งและราคาน้ำมันเช่น ปริมาณการขนส่งที่ตกลงกัน (Committed Volume) การมีสินค้าเที่ยวกลับ (Back Hauling) หรือฤดูกาลในการขนส่ง เช่น ช่วงเดือนเมษายนและเดือนพฤษภาคมจะเป็น

ช่วงที่รถขนส่งส่วนใหญ่วิ่งรับส่งสินค้าเกษตร (เช่น ทำการรับอ้อยเข้าโรงงานและรับน้ำตาลส่งไปยังท่าเรือแหลมฉบัง) พร้อมกันนี้ยังเป็นช่วงที่เหมาะสมกับการก่อสร้างทำให้เกิดการแย่งรถในการขนส่งอ้อยขึ้นไปยังส่วนภูมิภาคอีกด้วย ทำให้ราคาค่าขนส่งมีค่าสูงในช่วงดังกล่าว แต่ในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ราคาค่าขนส่งจะถูกลงมากเนื่องจากเป็นฤดูฝน ไม่เหมาะสำหรับการก่อสร้าง อีกทั้งไม่ใช่ฤดูการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร จึงไม่มีความต้องการในการใช้รถขนส่ง ทำให้ผู้ให้บริการขนส่งยอมรับราคาที่ต่ำเพื่อให้มีงานถึงแม้ว่าบางครั้งจะไม่ได้กำไรก็ตาม จากการสอบถามเบื้องต้นดังกล่าวพบว่าผู้ประกอบการขนส่งพิจารณาปัจจัยหลายปัจจัยในการตัดสินใจรับงานขนส่งสินค้า แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญได้แก่ ราคาค่าขนส่ง ราคาน้ำมัน ลักษณะการว่าจ้างงานต่อเนื่องหรือรายครั้ง การมีสินค้าเที่ยวกลับ และ ฤดูกาลในการขนส่งสินค้า ดังนั้น จึงนำปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มาออกแบบแบบสอบถามและเก็บข้อมูลจากผู้ประกอบการขนส่ง 2 ราย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกส์รูปได้ดังแสดงในสมการที่ (10) และ (11)

$$\hat{\pi}_1(x) = \frac{\exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)}{1 + \exp(-8.4036 + 32.5125x_1 - 1.0908x_2 + 2.8733x_3 + 6.9236x_4 - 2.0917x_5)} \quad (10)$$

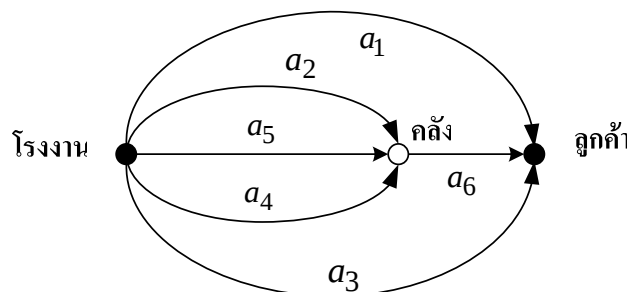
$$\hat{\pi}_2(x) = \frac{\exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)}{1 + \exp(-45.5173 + 42.9343x_1 - 0.4589x_2 + 8.3150x_3 + 17.39994x_4 - 3.4769x_5)} \quad (11)$$

โดยที่

$\hat{\pi}_1(x), \hat{\pi}_2(x)$ = ความน่าจะเป็นในการรับขนส่งสินค้าจากเงื่อนไข $x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ของผู้ประกอบการรายที่ 1 และ 2

- x_1 = ราคาค่าขนส่ง (บาท/ตัน/กม.)
- x_2 = ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)
- x_3 = ลักษณะการว่าจ้าง (ต่อเนื่อง = 1, รายครั้ง = 0)
- x_4 = การมีสินค้าเที่ยวกลับ (มี = 1, ไม่มี = 0)
- x_5 = ฤดูกาล (มีปริมาณการขนส่งมาก = 1, มีปริมาณการขนส่งน้อย = 0)

เมื่อได้ข้อมูลความน่าจะเป็นและต้นทุนในการใช้เส้นทางแล้ว นำมากำหนดโครงข่ายการขนส่งได้ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5: แผนภาพจำลองระบบโครงข่ายการขนส่งกรณีศึกษา

โดยที่

a_1, a_2 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกรายที่ 1 มีความน่าจะเป็นในการขนส่งเป็นไปตามสมการที่ (10)

- a_3, a_4 แทน ผู้ขนส่งด้วยรถบรรทุกทุกสายที่ 2 มีความน่าจะเป็นในการขนส่งเป็นไปตามสมการที่ 11
- a_5 แทน การขนส่งด้วยรถไฟจากโรงงานไปยังคลังสินค้า มีต้นทุนการขนส่ง 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864
- a_6 แทน คลังสินค้าและการส่งสินค้าไปจากคลังไปยังลูกค้า มีต้นทุนการผ่านคลังและจัดส่งให้ลูกค้า 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

เมื่อได้แบบจำลองโครงข่ายแล้ว ได้ทำการกำหนดเหตุการณ์หรือเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อทำการคำนวณต้นทุนเฉลี่ยดังนี้

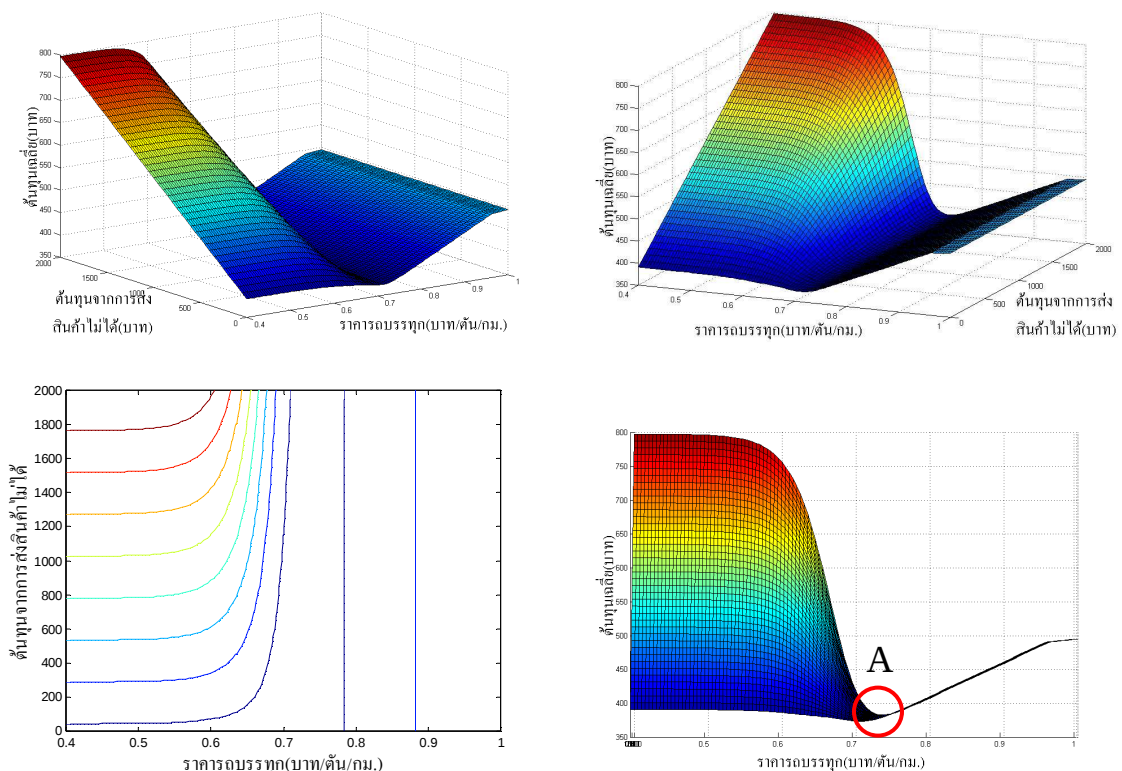
ต้นทุนการขนส่งด้วยรถบรรทุก = 0.4 ถึง 1.1 บาท/ตัน/กม.

ต้นทุนจากการไม่สามารถส่งสินค้าได้ = 0 ถึง 2,000 บาท

ราคาน้ำมัน 22.00 บาท/ลิตร

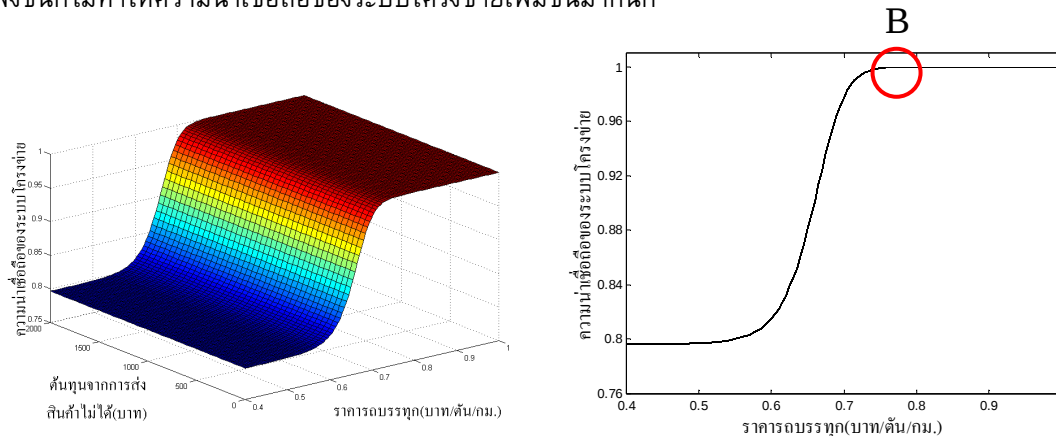
โดยเป็นการว่าจ้างแบบต่อเนื่องในช่วงที่มีการขนส่งต่ำและมีสินค้าเที่ยวกลับ

นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการประเมินต้นทุนเฉลี่ยตามสมการที่ (9) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย จะมีค่าที่แตกต่างกันไปตามราคาค่าขนส่งรถบรรทุกและต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ โดยในช่วงที่ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าต่ำ ต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายจะแปรผันตามต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ อย่างไรก็ตามเห็นได้ชัดมากกว่าการแปรผันตามราคาค่าขนส่ง แต่เมื่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าถึงจุดจุดหนึ่ง (จากรูปที่ 6 จุด A คือประมาณ 0.75 บาท/ตัน/กม.) จะพบว่าต้นทุนเฉลี่ยเกือบจะไม่แปรผันตามต้นทุนจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ต่อไป



รูปที่ 6: ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยต่อต้นทุนเฉลี่ย

และเมื่อพิจารณาค่าความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายตามสมการที่ (2) จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้นตามราคาค่าขนส่งรถบรรทุกแต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณค่าความน่าเชื่อถือตามสมการที่ (2) ไม่ได้คิดรวมต้นทุนอันเนื่องมาจากการขนส่งสินค้าไม่ได้ ดังนั้นหากพิจารณาสมรรถนะของระบบโครงข่ายตัวอย่างนี้ด้วยความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว จะได้ว่าค่าขนส่งทางรถบรรทุกควรมีค่าประมาณเกือบ 0.80 บาท/ตัน/กม. (จุด B ในรูปที่ 7) ค่าขนส่งที่สูงกว่านี้จะทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายลดลงอย่างมาก ในขณะที่ค่าขนส่งที่แพงขึ้นก็ไม่ได้ทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบโครงข่ายเพิ่มขึ้นมากนัก



รูปที่ 7: ความสัมพันธ์ของค่าขนส่งด้วยรถบรรทุกและต้นทุนจากการส่งสินค้าไม่ได้ต่อต้นทุนเฉลี่ยต่อความน่าเชื่อถือของระบบ

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาระบบโครงข่ายจากค่าความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียว อาจทำให้คิดว่าราคารถบรรทุกที่เหมาะสมกับระบบโครงข่ายนี้คือ 0.80 บาท/ตัน/กม. ซึ่งแท้จริงแล้วหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายของการที่ไม่สามารถขนส่งได้ประกอบกับความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์นี้จะเกิดขึ้นโดยผ่านการคำนวณความน่าเชื่อถือจะทำให้ทราบว่า ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกไม่จำเป็นต้องมีราคาสูงเช่นนั้น ราคาที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.75-0.80 บาท/ตัน/กม. แนนอวราราคาที่ต่ำกว่านี้จะทำให้ระบบมีโครงข่ายมีความเสี่ยงต่อการที่จะไม่มีผู้ขนส่งสินค้าให้และอาจเสียค่าใช้จ่ายสูงจากการที่ขนส่งสินค้าไม่ได้ แต่ราคาที่สูงกว่า 0.80 บาท/ตัน/กม. ก็ไม่ได้ทำให้ระบบโครงข่ายมีค่าความน่าเชื่อถือมากขึ้นเท่าไร หากบริษัทใช้ช่วงราคานี้ในการเจรจาราคาขนส่งกับผู้ขนส่งก็จะทำให้อาจสามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ เช่น ใช้ราคา 0.75 บาท/ตัน/กม. เป็นเกณฑ์ในการต่อรองทำสัญญาการขนส่ง ราคาขนส่งที่ต่างกันเพียง 0.05 บาท/ตัน/กม. นี้เมื่อประเมินเป็นต้นทุนการขนส่งของบริษัทก็คิดเป็นจำนวนเงินหลายล้านบาทต่อปีทีเดียว และนี่เป็นเพียงการประเมินเฉพาะระบบโครงข่ายการขนส่งโครงข่ายหนึ่งของบริษัทเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ในรูปที่ 6 และ 7 นี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการกำหนดความน่าจะเป็นและต้นทุนของการขนส่งด้วยรถไฟและการขนส่งจากคลังสินค้าไปยังลูกค้า รวมถึงการกำหนด ราคาน้ำมัน และปัจจัยอื่นๆ ตามที่ได้กล่าวไว้เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้ไป อาจส่งผลให้ราคาขนส่งรถบรรทุกที่ต่ำที่สุดนี้เปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่แม้ว่าปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนค่าไป สิ่งที่ยังสามารถปรับใช้ได้คือการพิจารณาจุดที่ค่าต้นทุนเฉลี่ยโดยรวมของระบบต่ำที่สุด (ดังตัวอย่างในรูปที่ 6) เพราะจุดนี้สามารถนำไปประกอบการตัดสินใจเกี่ยวกับการขนส่งได้ เช่น ในการเจรจาสัญญากับผู้ขนส่งดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ราคาขนส่งทางรถบรรทุกควรใกล้เคียงกับจุดที่ต่ำที่สุดนี้ เป็นต้น

นอกจากราคาค่าขนส่งรถบรรทุกกับต้นทุนที่เกิดจากการขนส่งไม่ได้ จะมีผลต่อต้นทุนเฉลี่ยดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่จะส่งผลต่อต้นทุนเฉลี่ยเช่นกัน ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อต้นทุนเฉลี่ย โดยทำการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ทีละปัจจัย โดยเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงราคาน้ำมันจาก 22 บาท/ลิตร เป็น 25 บาท/ลิตร เป็นกรณีที่ 2 และทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะการวิ่ง การมีสินค้าเที่ยวกลับและฤดูกาลขนส่งในกรณีที่ 3-5 ตามลำดับ เพื่อดูผลของต้นทุนเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปจากแต่ละปัจจัย โดยกำหนดให้ต้นทุนการขนส่งด้วยรถไฟเป็น 352 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.864 และต้นทุนการผ่านคลังและจัดส่งให้ลูกค้าเป็น 139 บาท/ตัน ด้วยความน่าจะเป็น 0.992

ตารางที่ 1 ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยมีค่าต่ำสุด

กรณีที่	การขนส่งด้วยรถบรรทุก				ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยต่ำสุด (บาท/ตัน/กม.)	เปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ 1 (%)
	ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)	การวิ่ง	สินค้าเที่ยวกลับ	ฤดูกาลขนส่ง		
1	22.00	ต่อเนื่อง	มี	น้อย	0.75	-
2	25.00	ต่อเนื่อง	มี	น้อย	0.78	+4.0
3	22.00	รายครั้ง	มี	น้อย	0.86	+14.6
4	22.00	ต่อเนื่อง	ไม่มี	น้อย	1.05	+40.0
5	22.00	ต่อเนื่อง	มี	มาก	0.80	+6.7

ตารางที่ 1 แสดงราคาค่าขนส่งรถบรรทุกที่ทำให้ต้นทุนเฉลี่ยต่ำสุด จากตารางสามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ จะส่งผลให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันดังนี้

- การมีสินค้าเที่ยวกลับ ส่งผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากที่สุด คือหากไม่มีสินค้าเที่ยวกลับจะทำให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกเพิ่มขึ้น 0.3 บาท/ตัน/กม.(เปรียบเทียบกับกรณีที่ 4 กับกรณีที่ 1) หรือคิดเป็น 40% ของราคาเดิม
- รูปแบบการวิ่งต่อเนื่องหรือรายครั้งนั้น จะมีผลรองลงมาคือ เมื่อไม่วิ่งแบบต่อเนื่อง แต่ใช้การวิ่งเป็นรายครั้ง จะทำให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกเพิ่มขึ้นประมาณ 14.6%
- ฤดูกาลขนส่ง จะมีผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุก โดยในช่วงที่มีการขนส่งมาก จะทำให้ราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมีค่าสูงขึ้นประมาณ 6.7 %
- ในส่วนของราคาน้ำมันนั้น เมื่อราคาน้ำมันเพิ่มขึ้นประมาณ 10% จะส่งผลให้ราคาค่าขนส่งปรับตัวขึ้น 4%

จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปัจจัยด้านการมีสินค้าเที่ยวกลับและลักษณะการวิ่ง จะส่งผลต่อราคาค่าขนส่งรถบรรทุกมากกว่าราคาน้ำมันและฤดูกาล

5. สรุปผล

การประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอนด้วยค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) เพียงอย่างเดียวนี้อาจไม่เพียงพอในการตัดสินใจได้ว่าระบบโครงข่ายดังกล่าวมีสมรรถนะดีเพียงใด เนื่องจากยังขาดการพิจารณาในส่วนของการเกิดจากการใช้ระบบโครงข่ายที่ไม่แน่นอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประเมินระบบโครงข่ายที่มีความไม่แน่นอน โดยใช้ต้นทุนในการใช้เส้นทางร่วมกับความน่าเชื่อถือของเส้นทางมาประเมินเป็นต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่าย ผ่านการคำนวณหาค่าคาดหวัง (Expected Value) และนำเสนอตัวอย่างในการประยุกต์ใช้งานต้นทุนเฉลี่ยกับระบบขนส่งจริงซึ่งเป็นระบบการขนส่งที่มีความไม่

แน่นอนอันเนื่องมาจากปัญหาในการว่าจ้างผู้ประกอบการขนส่ง โดยในขั้นตอนแรกก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ระบบการขนส่งโดยใช้ต้นทุนเฉลี่ย ต้องทำการประเมินความน่าจะเป็นของทางเชื่อมในระบบการขนส่งก่อน โดยทางเชื่อมในระบบการขนส่งนี้จะแทนผู้ประกอบการขนส่งแต่ละราย ในงานวิจัยนี้ทำการประเมินความน่าจะเป็นของทางเชื่อมผ่านวิธีการ 2 วิธี ได้แก่ 1) ใช้ข้อมูลการขนส่งในอดีตที่มีเพื่อประเมินความน่าจะเป็น 2) ใช้แบบสอบถามและประเมินผ่านการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (สำหรับผู้ประกอบการขนส่งที่ไม่มีข้อมูลในอดีต)

เมื่อได้ต้นทุนและความน่าจะเป็นของทางเชื่อมต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือและต้นทุนเฉลี่ยของระบบโครงข่ายการขนส่งตัวอย่างพบว่า หากทำการประเมินสมรรถนะของระบบที่มีความไม่แน่นอนด้วยความน่าเชื่อถือเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ต้นทุนโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเกินไป จึงควรมีการนำค่าต้นทุนเฉลี่ยที่มีการคิดถึงผลจากต้นทุนจากการขนส่ง และต้นทุนอันเนื่องมาจากการส่งสินค้าไม่ได้มาพิจารณา รวมกันเพื่อใช้ในการประเมินระบบโครงข่าย

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG - 5050007

บรรณานุกรม

- [1] Abraham, J.A., 1979, "An improved method for network reliability", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 28, pp. 58-61.
- [2] Avella, P., D'Auria, B. and Salerno, S., 2006, "A LP-based heuristic for a time-constrained routing problem", European Journal of Operational Research, Vol. 173, Issue 1, pp. 120-124.
- [3] Billinton, R. and Allan, R.N., 1992, Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, 2nd ed., Plenum Press, New York, pp. 372-386.
- [4] Horiguchi, T., Takahashi, H., Hayashi, K. and Yamaguchi, C., 2004, "Dynamic programming for optimal packet routing control using two neural networks", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 339, Issues 3-4, pp. 653-664.
- [5] Hosmer, D.W. and Lemeshow, S., 2000, Applied Logistic Regression, 2nd ed., Wiley-Interscience Publication, America.
- [6] Lin, Y.K. , 2001, "A simple algorithm for reliability evaluation of a stochastic-flow network with node failure", Computers & Operations Research, Vol 28, Issue 13, pp. 1277-1285.
- [7] Lin, Y.K., 2006, "Evaluate the performance of a stochastic-flow network with cost attribute in terms of minimal cuts", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, Issue 5, pp. 539-545.
- [8] Misra, J, 2001, "Walk over the shortest path: Dijkstra's Algorithm viewed as fixed-point computation", Short Communication Information Processing Letters, Vol. 77, Issues 2-4, pp. 197-200.
- [9] Yeh, W.C., 2004, "Multistate network reliability evaluation under the maintenance cost constraint", International Journal of Production Economics, Vol. 88, Issue 1, pp. 73-83.