

การประเมินประสิทธิภาพของห่วงโซ่อุปทานด้วย ตัวแบบการวิเคราะห์ความครอบคลุมข้อมูลภายใต้ความไม่แน่นอน

วราธร ปัญญางาม^{1*}, พัชรภรณ์ ญาณภีร์², พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล², เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

Email: v_pou@yahoo.com

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

Email: {fengppy, fengprc}@ku.ac.th

³ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

Email: aapsal@ku.ac.th

บทคัดย่อ

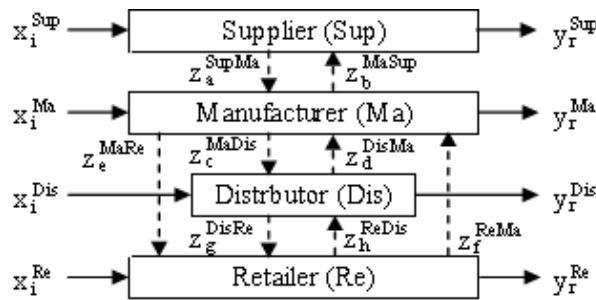
บทความนี้เสนอการนำตัวแบบการวิเคราะห์ความครอบคลุมข้อมูล (Data Envelopment Analysis; DEA) มาประยุกต์ใช้ในการวัดประสิทธิภาพแบบสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) ของห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งการใช้ตัวแบบดังกล่าวไม่เพียงแต่จะช่วยประเมินประสิทธิภาพรวมของห่วงโซ่อุปทาน (Overall Supply Chain) เท่านั้น แต่ยังประเมินประสิทธิภาพของแต่ละสมาชิกที่อยู่ในห่วงโซ่อุปทานอีกด้วย (Individual Members of Supply Chain) อย่างไรก็ตาม บ่อยครั้งที่การดำเนินธุรกิจภายใต้สภาวะการแข่งขันจริงมักมีความไม่แน่นอนของอินพุตทั้งอย่างสุ่มหรืออย่างคลุมเครือ ทำให้การประยุกต์ใช้ตัวแบบ DEA พื้นฐานซึ่งมีข้อกำหนดให้อินพุตและเอาต์พุตต้องมีความแน่นอน (คริป) และเป็นดิเทอร์มินิสติกไม่สามารถทำได้ ดังนั้นในบทความนี้จะเสนอวิธีการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส (Chance-Constrained Programming; CC) และวิธีเครดิตบิลิตี้ (Credibility Approach) มาใช้ในการจัดการกับความไม่แน่นอนอย่างสุ่ม (Randomness) และอย่างคลุมเครือ (Vagueness) ตามลำดับ ซึ่งผลจากการแปลงตัวแบบด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น จะได้ตัวแบบ DEA เทียบเท่าตัวแบบที่เป็นคริปและดิเทอร์มินิสติก โดยสมการที่ถูกแปลงเป็นคริปจะยังอยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ในขณะที่สมการที่ถูกแปลงเป็นดิเทอร์มินิสติกจะอยู่ในรูปสมการกำลังสอง

คำสำคัญ: การวัดประสิทธิภาพ; การจัดการห่วงโซ่อุปทาน; ตัวแบบการวิเคราะห์ความครอบคลุมข้อมูล; วิธีการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส; วิธีเครดิตบิลิตี้

1. บทนำ

โดยทั่วไปมีสาเหตุ 3 ประการที่ทำให้การวัดประสิทธิภาพของระบบห่วงโซ่อุปทานมีความจำเป็น ได้แก่ (i) การวัดประสิทธิภาพจะช่วยให้เข้าใจการปฏิบัติงานภายในระบบห่วงโซ่อุปทาน (ii) การวัดประสิทธิภาพจะช่วยให้สามารถตรวจสอบและจัดการระบบห่วงโซ่อุปทาน รวมทั้งการระบุวิธีการปฏิบัติงานที่ดีที่สุด และ (iii) การวัดประสิทธิภาพจะช่วยให้เกิดทิศทางการพัฒนาระบบห่วงโซ่อุปทาน สำหรับการนำตัวแบบ DEA มาใช้ประเมินประสิทธิภาพของระบบห่วงโซ่อุปทาน ไม่เพียงแต่จะมุ่งเน้นไปที่การวัดประสิทธิภาพรวมของห่วงโซ่อุปทาน (Overall Supply Chain) เท่านั้น แต่จะประเมินประสิทธิภาพของแต่ละสมาชิกที่เป็นส่วนประกอบในห่วงโซ่อุปทานอีกด้วย (Individual Members of Supply Chain) โดยตัวแบบ DEA สำหรับการประเมิน

ประสิทธิภาพ (DEA Model for Evaluating Supply Chain Performance; DEA-SC) ที่จะนำเสนอในบทความนี้จะสร้างจากระบบห่วงโซ่อุปทานพื้นฐาน (Typical Supply Chain System) ที่ประกอบด้วย 4 ส่วนประกอบ ได้แก่ ผู้ส่งมอบ (Supplier; Sup) ผู้ผลิต (Manufacturer; Ma) ผู้จัดจำหน่าย (Distributor; Dis) และผู้ค้าปลีก (Retailer; Re) ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1: ระบบห่วงโซ่อุปทานพื้นฐาน

จากรูป จะเห็นว่า ระบบห่วงโซ่อุปทานจะถูกมองในรูประบบรวมอินพุต-เอาต์พุต (Integrated Input-Output System View) ที่มีอินพุต-เอาต์พุตทางตรงที่เชื่อมกับภายนอกห่วงโซ่อุปทานและอินพุต-เอาต์พุตระหว่างแต่ละสมาชิกภายในห่วงโซ่อุปทานเอง ซึ่งจากการที่ห่วงโซ่อุปทานอยู่ในรูประบบรวมอินพุต-เอาต์พุตทำให้สามารถนำตัวแบบ DEA ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Charnes *et al.* [1] เป็นฐานความคิดในการสร้างตัวแบบ DEA-SC ได้

เพื่อให้บทความนี้สะดวกต่อการอ่านจึงได้วางโครงสร้างของบทความโดยเริ่มจาก การนำเสนอตัวแบบ DEA-SC ที่มีบางอินพุตและเอาต์พุตเป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variable; RV) และบางอินพุตและเอาต์พุตเป็นตัวแปรฟัซซี่ (Fuzzy Variable; FV) ในหัวข้อที่ 2 จากนั้นเสนอการแปลง RV และ FV ให้เป็นดิเทอร์มินิสติกและคริปโตยวิธีการโปรแกรมสมการข้อจำกัดตามโอกาส (Chance-Constrained Programming; CC) และวิธีเครดิบิลิตี (Credibility Approach) ในหัวข้อที่ 3 และ 4 ตามลำดับ สุดท้ายในหัวข้อที่ 5 จะสรุปและวิจารณ์ผลจากการแปลงตัวแบบด้วยวิธีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

2. ตัวแบบ DEA สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของห่วงโซ่อุปทานภายใต้ความไม่แน่นอน

ตัวแบบการวิเคราะห์ความครอบคลุมข้อมูล (Data Envelopment Analysis; DEA) ถูกนำเสนอโดย Charnes *et al.* [1] ในฐานะตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ไม่อาศัยพารามิเตอร์ (Non-Parametric Mathematical Programming Model) ที่ใช้ประมาณเส้นเขตแดนประสิทธิภาพ (Efficiency Frontier) และวัดประสิทธิภาพแบบสัมพัทธ์ (Relative Efficiencies) ของหน่วยตัดสินใจ (Decision Making Units; DMUs) ที่ใช้หลายอินพุตที่เหมือนกัน (Homogenous Multiple Inputs) ในการสร้างหลายเอาต์พุตที่เหมือนกัน (Homogenous Multiple Outputs) โดยอาศัยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming; LP) ซึ่งต่อมาได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้นำตัวแบบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในลักษณะต่างๆ จำนวนมาก อาทิ Chilingirian [2] ได้ใช้ตัวแบบ DEA และการวิเคราะห์แบบหลายปัจจัยแบบโทบิต (Multi-factor Tobit Analysis) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางคลินิกของแพทย์ในโรงพยาบาล Sueyoshi [3] เสนอวิธีการใช้ตัวแบบ DEA ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตโดยอาศัยการเปรียบเทียบช่วงเวลาที่แตกต่างกัน Nash and Sterna-Karwa [4] ได้ประยุกต์ตัวแบบ DEA ใน

การวัดประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเงิน 4 รายการแต่ละสาขาย่อยของธนาคาร Tofallist [5] ประยุกต์ตัวแบบ DEA เพื่อประเมินผลการดำเนินงานของบริษัทขนส่งข้ามชาติ 14 บริษัทในปี ค.ศ. 1990. Hong *et al.* [6] ได้ใช้ตัวแบบ DEA ในการประเมินโครงการวางระบบรวม (System Integration; SI) ร่วมกับการวิเคราะห์แนวโน้มสำหรับการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) Al-Shammari [7] ได้ประยุกต์ตัวแบบ DEA ที่ปรับปรุง (Modified DEA Model) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดำเนินงานขององค์กรการผลิต 55 องค์กรในประเทศจอร์แดน Zhu [8] ใช้ตัวแบบ DEA เพื่อระบุบริษัทปฏิบัติงานที่ดีที่สุด (Best Practice Companies) จากนิตยสารฟอร์จูน (Fortune Magazine) ปี ค.ศ. 1990 จำนวน 500 บริษัท Martin and Román [9] ได้ประยุกต์ตัวแบบ DEA เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางเทคนิค (Technical Efficiency) ของสนามบินส่วนตัวในประเทศสเปน Fukuyama and Weber [10] ใช้ตัวแบบ DEA แบบจัดสรร (Allocative DEA Model) เพื่อประเมินการทำงานของธนาคารในประเทศญี่ปุ่นช่วงปีค.ศ. 1992-1996 Façanha and Resende [11] ได้ประยุกต์ตัวแบบ DEA ที่สร้างขึ้นภายใต้แนวคิดแบบยืดหยุ่นในการประเมินระบบโทรศัพท์ท้องถิ่นช่วงปี ค.ศ. 1998-2002 Luo and Donthu [12] เปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์เส้นเขตแดนสโตคาสติก (Stochastic Frontier Analysis; SF) ซึ่งเป็นตัวแบบที่ใช้พารามิเตอร์กับตัวแบบ DEA ในการประเมินประสิทธิภาพของพนักงานขายที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างจากบริษัทชั้นนำ เป็นต้น ซึ่ง Seiford [13] ได้รวบรวมบทความที่มีการประยุกต์ใช้ตัวแบบ DEA ในกรณีต่างๆ กันไว้มากกว่า 800 บทความ

พิจารณารูปที่ 1 จะเห็นว่า แต่ละระบบห่วงโซ่อุปทานพื้นฐานจะใช้อินพุตที่เหมือนกัน m อินพุตในการผลิตเอาต์พุตที่เหมือนกัน s เอาต์พุต โดยกำหนดให้ DI^Δ สำหรับ $i = 1, \dots, m$ และ DR^Δ สำหรับ $r = 1, \dots, s$ เป็นเซตของอินพุตและเอาต์พุตทางตรง ตามลำดับ Δ แทน เซตของสมาชิกในระบบห่วงโซ่อุปทานพื้นฐาน และ x_{ij}^Δ สำหรับ $i \in DI^\Delta$ และ y_{rj}^Δ สำหรับ $r \in DR^\Delta$ แทน อินพุตและเอาต์พุตทางตรง ตามลำดับ และเนื่องจากเอาต์พุตระหว่างสมาชิกจะเป็นอินพุตระหว่างสมาชิกด้วย ดังนั้นบทความนี้จึงเรียกอินพุตเอาต์พุตในลักษณะดังกล่าวว่าเอาต์พุตระหว่างสมาชิก (Intermediate Outputs) โดยจะให้ z_a^{SupMa} สำหรับ $a = 1, \dots, A$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ส่งมอบป้อนให้ผู้ผลิต z_b^{MaSup} สำหรับ $b = 1, \dots, B$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ผลิตป้อนกลับมายังผู้ส่งมอบ z_c^{MaDis} สำหรับ $c = 1, \dots, C$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ผลิตป้อนให้ผู้จัดจำหน่าย z_d^{DisMa} สำหรับ $d = 1, \dots, D$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้จัดจำหน่ายป้อนกลับมายังผู้ส่งผลิต z_e^{MaRe} สำหรับ $e = 1, \dots, E$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ผลิตป้อนให้ผู้ค้าปลีก z_f^{ReMa} สำหรับ $f = 1, \dots, F$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ค้าปลีกป้อนกลับมายังผู้ส่งผลิต z_g^{DisRe} สำหรับ $g = 1, \dots, G$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้จัดจำหน่ายป้อนให้ผู้ค้าปลีก และ z_h^{ReDis} สำหรับ $h = 1, \dots, H$ แทน เอาต์พุตระหว่างสมาชิกจากผู้ค้าปลีกป้อนกลับมายังผู้จัดจำหน่าย ดังนั้นถ้าห่วงโซ่อุปทานจำนวน n ห่วงโซ่ แทนด้วย DMU_j สำหรับ $j = 1, \dots, n$ ใช้หลายอินพุตทางตรงและระหว่างสมาชิกแบบเดียวกันในการผลิตหลายเอาต์พุตทางตรงและระหว่างสมาชิกแบบเดียวกัน ถ้ากำหนดให้ x_{ij}^Δ และ y_{rj}^Δ เป็นอินพุตและเอาต์พุตทางตรงของ DMU_j ที่ประกอบด้วย $x_{i'j}^\Delta$ และ $y_{r'j}^\Delta$ สำหรับ $i' \leq i$ และ $r' \leq r$ เป็น อินพุตและเอาต์พุตทางตรงที่มีความเป็นคริปดิเทอร์มินิสติก $\hat{x}_{i'j}^\Delta$ และ $\hat{y}_{r'j}^\Delta$ สำหรับ $i'' \leq i$ และ $r'' \leq r$ เป็นอินพุตและเอาต์พุตทางตรงจากการสุ่มตัวอย่างที่เป็น RV และ $\tilde{x}_{i'j}^\Delta$ และ $\tilde{y}_{r'j}^\Delta$ สำหรับ $i''' \leq i$ และ $r''' \leq r$ เป็นอินพุตและเอาต์พุตทางตรงที่ได้จากความรู้สึกของผู้ตัดสินใจที่เป็น FV และ $z_{\{a', \dots, h\}j}^{\Delta\Delta}$ เป็นเอาต์พุตระหว่างสมาชิกของ DMU_j ที่ประกอบด้วย $z_{\{a', \dots, h\}j}^{\Delta\Delta}$ สำหรับ $a' \leq a, \dots, h' \leq h$ เป็นเอาต์พุตระหว่างสมาชิกที่มี

ความเป็น คริปดิเทอร์มินิสติก $\hat{z}_{\{a'' \dots h''\}j}^{\Delta\Delta}$ สำหรับ $a'' \subseteq a, \dots, h'' \subseteq h$ เป็นเอาท์พุทระหว่างสมาชิกจากการ
 สุ่มตัวอย่างที่เป็น RV และ $\tilde{z}_{\{a''' \dots h''' \}j}^{\Delta\Delta}$ สำหรับ $a''' \subseteq a, \dots, h''' \subseteq h$ เป็นเอาท์พุทระหว่างสมาชิกซึ่งได้จาก
 ความรู้สึกของผู้ตัดสินใจที่เป็น FV แล้วได้ตัวแบบ DEA-SC ซึ่งประกอบด้วยอินพุตและเอาท์พุททางตรง และ
 เอาท์พุทระหว่างสมาชิกที่เป็นคริปดิเทอร์มินิสติก เป็น RV และเป็น FV ดังนี้

$$(DEA-SC) \text{ Min } \Omega = \frac{w_{\text{Sup}} \Omega^{\text{Sup}} + w_{\text{Ma}} \Omega^{\text{Ma}} + w_{\text{Dis}} \Omega^{\text{Dis}} + w_{\text{Re}} \Omega^{\text{Re}}}{(w_{\text{Sup}} + w_{\text{Ma}} + w_{\text{Dis}} + w_{\text{Re}})} \quad (1)$$

Subject to

อินพุททางตรง สำหรับ $i=1, \dots, m$ และ $\Delta \in \{\text{Sup}, \text{Ma}, \text{Dis}, \text{Re}\}$ ที่มี $\lambda_j, \beta_j, \chi_j$ และ δ_j เป็นตัวแปรตัดสินใจของ
 แต่ละสมาชิก Δ ตามลำดับ;

$$\sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} x_{ij}^{\Delta} - \Omega^{\Delta} x_{i'o}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } i' \subseteq i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} \hat{x}_{i''j}^{\Delta} - \Omega^{\Delta} \hat{x}_{i''o}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } i'' \subseteq i \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} \tilde{x}_{i'''j}^{\Delta} - \Omega^{\Delta} \tilde{x}_{i'''o}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } i''' \subseteq i \quad (4)$$

เอาท์พุททางตรง สำหรับ $r=1, \dots, s$;

$$y_{r'o}^{\Delta} - \sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} y_{rj}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } r' \subseteq r \quad (5)$$

$$\hat{y}_{r''o}^{\Delta} - \sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} \hat{y}_{r''j}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } r'' \subseteq r \quad (6)$$

$$\tilde{y}_{r'''o}^{\Delta} - \sum_{j=1}^n \{\lambda_j, \beta_j, \chi_j, \delta_j\} \tilde{y}_{r'''j}^{\Delta} \leq 0 \text{ สำหรับ } r''' \subseteq r \quad (7)$$

พิจารณาอินพุต-เอาท์พุทระหว่างสมาชิกในขอบเขตของผู้ส่งมอบ สำหรับ $a = 1, \dots, A$ และ $b = 1, \dots, B$;

$$\bar{z}_{a'o}^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j z_{a'j}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a' \subseteq a \quad (8)$$

$$\bar{z}_{a''o}^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{z}_{a''j}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a'' \subseteq a \quad (9)$$

$$\bar{z}_{a'''o}^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{z}_{a'''j}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a''' \subseteq a \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j z_{b'j}^{\text{MaSup}} - \bar{z}_{b'o}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b' \subseteq b \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{z}_{b''j}^{\text{MaSup}} - \bar{z}_{b''o}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b'' \subseteq b \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{z}_{b'''j}^{\text{MaSup}} - \bar{z}_{b'''o}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b''' \subseteq b \quad (13)$$

พิจารณาอินพุต-เอาท์พุทระหว่างสมาชิกในขอบเขตของผู้ผลิต สำหรับ $a = 1, \dots, A$; $b = 1, \dots, B$; $c = 1, \dots,$
 C ; $d = 1, \dots, D$; $e = 1, \dots, E$ และ $f = 1, \dots, F$;

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \bar{z}_{a'j}^{\text{SupMa}} - \bar{z}_{a'o}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a' \subseteq a \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{a''j}^{\text{SupMa}} - \bar{z}_{a''o}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a'' \subseteq a \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{a'''j}^{\text{SupMa}} - \bar{z}_{a'''o}^{\text{SupMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } a''' \subseteq a \quad (16)$$

$$\bar{z}_{b'o}^{\text{MaSup}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \bar{z}_{b'j}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b' \subseteq b \quad (17)$$

$$\bar{z}_{b''o}^{\text{MaSup}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{b''j}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b'' \subseteq b \quad (18)$$

$$\bar{z}_{b'''o}^{\text{MaSup}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{b'''j}^{\text{MaSup}} \leq 0 \text{ สำหรับ } b''' \subseteq b \quad (19)$$

$$\bar{z}_{c'o}^{\text{MaDis}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \bar{z}_{c'j}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c' \subseteq c \quad (20)$$

$$\bar{z}_{c''o}^{\text{MaDis}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{c''j}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c'' \subseteq c \quad (21)$$

$$\bar{z}_{c'''o}^{\text{MaDis}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{c'''j}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c''' \subseteq c \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \bar{z}_{d'j}^{\text{DisMa}} - \bar{z}_{d'o}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d' \subseteq d \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{d''j}^{\text{DisMa}} - \bar{z}_{d''o}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d'' \subseteq d \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{d'''j}^{\text{DisMa}} - \bar{z}_{d'''o}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d''' \subseteq d \quad (25)$$

$$\bar{z}_{e'o}^{\text{MaRe}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \bar{z}_{e'j}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e' \subseteq e \quad (26)$$

$$\bar{z}_{e''o}^{\text{MaRe}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{e''j}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e'' \subseteq e \quad (27)$$

$$\bar{z}_{e'''o}^{\text{MaRe}} - \sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{e'''j}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e''' \subseteq e \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{z}_{f'j}^{\text{ReMa}} - \bar{z}_{f'o}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f' \subseteq f \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{z}}_{f''j}^{\text{ReMa}} - \bar{z}_{f''o}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f'' \subseteq f \quad (30)$$

$$\sum_{j=1}^n \beta_j \tilde{\tilde{\tilde{z}}}_{f'''j}^{\text{ReMa}} - \bar{z}_{f'''o}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f''' \subseteq f \quad (31)$$

พิจารณาอินพุต-เอาต์พุตระหว่างสมาชิกในขอบเขตของผู้จัดจำหน่าย สำหรับ $c = 1, \dots, C$; $d = 1, \dots, D$; $g = 1, \dots, G$ และ $h = 1, \dots, H$;

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \bar{z}_{c'j}^{\text{MaDis}} - \bar{z}_{c'o}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c' \subseteq c \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{c''j}^{\text{MaDis}} - \bar{z}_{c''o}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c'' \subseteq c \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \tilde{z}_{c'''j}^{\text{MaDis}} - \bar{z}_{c'''o}^{\text{MaDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } c''' \subseteq c \quad (34)$$

$$\bar{z}_{d'o}^{\text{DisMa}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{d'j}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d' \subseteq d \quad (35)$$

$$\bar{z}_{d''o}^{\text{DisMa}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \tilde{z}_{d''j}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d'' \subseteq d \quad (36)$$

$$\bar{z}_{d'''o}^{\text{DisMa}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{d'''j}^{\text{DisMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } d''' \subseteq d \quad (37)$$

$$\bar{z}_{g'o}^{\text{DisRe}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{g'j}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g' \subseteq g \quad (38)$$

$$\bar{z}_{g''o}^{\text{DisRe}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \tilde{z}_{g''j}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g'' \subseteq g \quad (39)$$

$$\bar{z}_{g'''o}^{\text{DisRe}} - \sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{g'''j}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g''' \subseteq g \quad (40)$$

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{h'j}^{\text{ReDis}} - \bar{z}_{h'o}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h' \subseteq h \quad (41)$$

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \tilde{z}_{h''j}^{\text{ReDis}} - \bar{z}_{h''o}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h'' \subseteq h \quad (42)$$

$$\sum_{j=1}^n \chi_j \hat{z}_{h'''j}^{\text{ReDis}} - \bar{z}_{h'''o}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h''' \subseteq h \quad (43)$$

พิจารณาอินพุต-เอาต์พุตระหว่างสมาชิกในขอบเขตของผู้ค้าปลีก สำหรับ $e = 1, \dots, E; f = 1, \dots, F; g = 1, \dots, G$ และ $h = 1, \dots, H$;

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \hat{z}_{e'j}^{\text{MaRe}} - \bar{z}_{e'o}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e' \subseteq e \quad (44)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{e''j}^{\text{MaRe}} - \bar{z}_{e''o}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e'' \subseteq e \quad (45)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \hat{z}_{e'''j}^{\text{MaRe}} - \bar{z}_{e'''o}^{\text{MaRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } e''' \subseteq e \quad (46)$$

$$\bar{z}_{f'o}^{\text{ReMa}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \hat{z}_{f'j}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f' \subseteq f \quad (47)$$

$$\bar{z}_{f''o}^{\text{ReMa}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{f''j}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f'' \subseteq f \quad (48)$$

$$\bar{z}_{f'''o}^{\text{ReMa}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \hat{z}_{f'''j}^{\text{ReMa}} \leq 0 \text{ สำหรับ } f''' \subseteq f \quad (49)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \hat{z}_{g'j}^{\text{DisRe}} - \bar{z}_{g'o}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g' \subseteq g \quad (50)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{g''j}^{\text{DisRe}} - \bar{z}_{g''o}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g'' \subseteq g \quad (51)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{g''_j}^{\text{DisRe}} - \tilde{z}_{g''_o}^{\text{DisRe}} \leq 0 \text{ สำหรับ } g'' \subseteq g \quad (52)$$

$$\tilde{z}_{h''_o}^{\text{ReDis}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{h''_j}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h' \subseteq h \quad (53)$$

$$\tilde{z}_{h''_o}^{\text{ReDis}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{h''_j}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h'' \subseteq h \quad (54)$$

$$\tilde{z}_{h''_o}^{\text{ReDis}} - \sum_{j=1}^n \delta_j \tilde{z}_{h''_j}^{\text{ReDis}} \leq 0 \text{ สำหรับ } h''' \subseteq h \quad (55)$$

$$\Omega^\Delta \geq 0, \lambda_j \geq 0, \beta_j \geq 0, \chi_j \geq 0, \delta_j \geq 0 \quad (56)$$

เมื่อ Ω แทน ประสิทธิภาพรวมของห่วงโซ่อุปทาน Ω^Δ แทน ประสิทธิภาพของสมาชิก Δ ในห่วงโซ่อุปทาน w_Δ แทน น้ำหนักของสมาชิก Δ ที่กำหนดไว้ และ $\lambda_j, \beta_j, \chi_j$ and δ_j สำหรับ $j = 1, \dots, n$ แทน ตัวแปรตัดสินใจ และ \bullet แทน ตัวแปรตัดสินใจที่ไม่ทราบค่า

3. การแปลงสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตหรือเอาต์พุตเป็น RV

เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนอย่างสุ่มดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทความนี้จะอาศัยวิธี CC ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับตัวแบบที่เป็นสโตคาสติก (Stochastic Optimization) วิธีหนึ่งที่ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Charnes and Cooper [14] มาประยุกต์ใช้ในการแปลงสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตหรือเอาต์พุตเป็น RV โดยวิธีการดังกล่าวจะสร้างสมการข้อจำกัดที่ถูกรับประกันว่าจะเป็นจริงภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่ได้กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็น RV จะถูกแยกตามสมาชิกของห่วงโซ่อุปทานในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเสนอเฉพาะขอบเขตของผู้ส่งมอบเพื่อเป็นตัวอย่าง จะได้

$$\text{อินพุตทางตรง; } \Pr \left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{x}_{i''_j}^{\text{Sup}} - \Omega^{\text{Sup}} \tilde{x}_{i''_o}^{\text{Sup}} \leq 0 \right\} \geq 1 - \rho_{i''}^{\text{Sup}} \quad (57)$$

$$\text{เอาต์พุตทางตรง; } \Pr \left\{ \tilde{y}_{r''_o}^{\text{Sup}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{y}_{r''_j}^{\text{Sup}} \leq 0 \right\} \geq 1 - \tau_{r''}^{\text{Sup}} \quad (58)$$

$$\text{เอาต์พุตระหว่างสมาชิก; } \Pr \left\{ \tilde{z}_{a''_o}^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{z}_{a''_j}^{\text{SupMa}} \leq 0 \right\} \geq 1 - \theta_{a''}^{\text{SupMa}} \quad (59)$$

$$\text{อินพุตระหว่างสมาชิก; } \Pr \left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{z}_{b''_j}^{\text{MaSup}} - \tilde{z}_{b''_o}^{\text{MaSup}} \leq 0 \right\} \geq 1 - \theta_{b''}^{\text{MaSup}} \quad (60)$$

เมื่อ "Pr" หมายถึง ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ $1 - \rho_{i''}^{\text{Sup}}, 1 - \tau_{r''}^{\text{Sup}}, 1 - \theta_{a''}^{\text{SupMa}}$ and $1 - \theta_{b''}^{\text{MaSup}}$ แทน ความน่าจะเป็นขั้นต่ำที่ถูกกำหนดไว้ (Pre-Specified Minimum Probability) สำหรับอินพุตทางตรง เอาต์พุตทางตรง เอาต์พุตระหว่างสมาชิก และอินพุตระหว่างสมาชิก ตามลำดับ ถ้ากำหนดให้ $\kappa_{i''}^{\text{Sup}}, \kappa_{r''}^{\text{Sup}}, \kappa_{a''}^{\text{SupMa}}, \kappa_{b''}^{\text{MaSup}}$ เป็นตัวแปรขาดภายนอก (External Slack) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปสมการ จะได้ว่า

$$\Pr \left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j \tilde{x}_{i''_j}^{\text{Sup}} - \Omega^{\text{Sup}} \tilde{x}_{i''_o}^{\text{Sup}} \leq 0 \right\} = (1 - \rho_{i''}^{\text{Sup}}) + \kappa_{i''}^{\text{Sup}} \quad (61)$$

$$\Pr\left\{\hat{y}_{r'o}^{\text{Sup}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{y}_{r'j}^{\text{Sup}} \leq 0\right\} = (1 - \tau_{r'}^{\text{Sup}}) + \kappa_{r'}^{\text{Sup}} \quad (62)$$

$$\Pr\left\{\hat{z}_{a'o}^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{z}_{a'j}^{\text{SupMa}} \leq 0\right\} = (1 - \theta_{a'}^{\text{SupMa}}) + \kappa_{a'}^{\text{SupMa}} \quad (63)$$

$$\Pr\left\{\sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{z}_{b'j}^{\text{MaSup}} - \hat{z}_{b'o}^{\text{MaSup}} \leq 0\right\} = (1 - \theta_{b'}^{\text{MaSup}}) + \kappa_{b'}^{\text{MaSup}} \quad (64)$$

เนื่องจากการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ของข้อมูลเป็นข้อกำหนดพื้นฐานที่สำคัญข้อหนึ่งสำหรับการใช้เครื่องมือทางสถิติที่อาศัยพารามิเตอร์ (Parametric Statistic) ทำให้มีวิธีการทางคณิตศาสตร์จำนวนมากที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อแปลงข้อมูลที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบต่างๆ ให้มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ ดังนั้นสำหรับในบทความนี้จึงได้กำหนดให้อินพุตและเอาต์พุตเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ และจาก $\Pr\{\bullet \leq \Xi\} = (1 - \vartheta) + \Gamma$ จะเทียบเท่ากับ $\Pr\{\bullet \leq \Xi - S\} = 1 - \vartheta$ เมื่อ \bullet เป็น RV, Ξ เป็นค่าคงที่, $1 - \vartheta$ เป็นความน่าจะเป็นที่กำหนดไว้, Γ เป็นตัวแปรขาดภายนอก และ S เป็นตัวแปรขาดภายในที่เกิดจากตัวแปรขาดภายนอก ดังนั้นถ้ากำหนดให้ \bullet เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติแล้ว จะได้ว่า

$$\Pr\left\{\frac{\bullet - E(\bullet)}{\sqrt{\sigma(\bullet)}} \leq \frac{\Xi - S - E(\bullet)}{\sqrt{\sigma(\bullet)}}\right\} = 1 - \vartheta \text{ or } -\Xi + S + E(\bullet) = \Phi^{-1}(\vartheta) \sqrt{\sigma(\bullet)} \quad (65)$$

เมื่อ $E(\bullet)$ แทน ค่าคาดคะเนของ RV, $\sqrt{\sigma(\bullet)}$ แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ RV และ Φ แทน ฟังก์ชันความน่าจะเป็นแบบสะสมของตัวแปรสุ่มแบบปกติและ Φ^{-1} เป็นอินเวอร์สของฟังก์ชัน ดังนั้นจะสามารถเขียน (61)-(64) ได้ใหม่ ดังนี้

$$\Omega^{\text{Sup}} E(\hat{x}_{i'o}^{\text{Sup}}) - \sum_{j=1}^n \lambda_j E(\hat{x}_{i'j}^{\text{Sup}}) \geq \Phi^{-1}(1 - \rho_{i'}^{\text{Sup}}) \sqrt{[-\Omega^{\text{Sup}}, \lambda]^T \text{Cov}_{i'}[-\Omega^{\text{Sup}}, \lambda]} \quad (66)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j E(\hat{y}_{r'j}^{\text{Sup}}) - E(\hat{y}_{r'o}^{\text{Sup}}) \geq \Phi^{-1}(1 - \tau_{r'}^{\text{Sup}}) \sqrt{[1, -\lambda]^T \text{Cov}_{r'}[1, -\lambda]} \quad (67)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j E(\hat{z}_{a'j}^{\text{SupMa}}) - \hat{z}_{a'o}^{\text{SupMa}} \geq \Phi^{-1}(1 - \theta_{a'}^{\text{SupMa}}) \sqrt{[\lambda]^T \text{Cov}_{a'}[\lambda]} \quad (68)$$

$$\hat{z}_{b'o}^{\text{MaSup}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j E(\hat{z}_{b'j}^{\text{MaSup}}) \geq \Phi^{-1}(1 - \theta_{b'}^{\text{MaSup}}) \sqrt{[\lambda]^T \text{Cov}_{b'}[\lambda]} \quad (69)$$

เมื่อ $[-\Omega^{\text{Sup}}, \lambda] = (-\Omega^{\text{Sup}}, \lambda_1, \dots, \lambda_n)^T$, $[1, -\lambda] = (1, -\lambda_1, \dots, -\lambda_n)^T$, $[\lambda] = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T$, $\text{Cov}_{i'}$, $\text{Cov}_{r'}$, $\text{Cov}_{a'}$ และ $\text{Cov}_{b'}$ เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วม ดังนี้

$$\text{Cov}_{i'} = \begin{pmatrix} V(\hat{x}_{i'o}) & \cdots & \text{Cov}(\hat{x}_{i'o}, \hat{x}_{i'n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(\hat{x}_{i'o}, \hat{x}_{i'n}) & \cdots & V(\hat{x}_{i'n}) \end{pmatrix} \quad (70)$$

$$\text{Cov}_{r^n} = \begin{pmatrix} V(\hat{y}_{r^n o}) & \cdots & \text{Cov}(\hat{y}_{r^n o}, \hat{y}_{r^n n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(\hat{y}_{r^n o}, \hat{y}_{r^n n}) & \cdots & V(\hat{y}_{r^n n}) \end{pmatrix} \quad (71)$$

$$\text{Cov}_{a^n} = \begin{pmatrix} V(\hat{z}_{a^n 1}) & \cdots & \text{Cov}(\hat{z}_{a^n 1}, \hat{z}_{a^n n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(\hat{z}_{a^n 1}, \hat{z}_{a^n n}) & \cdots & V(\hat{z}_{a^n n}) \end{pmatrix} \quad (72)$$

$$\text{Cov}_{b^n} = \begin{pmatrix} V(\hat{z}_{b^n 1}) & \cdots & \text{Cov}(\hat{z}_{b^n 1}, \hat{z}_{b^n n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(\hat{z}_{b^n 1}, \hat{z}_{b^n n}) & \cdots & V(\hat{z}_{b^n n}) \end{pmatrix} \quad (73)$$

เมื่อ V และ Cov หมายถึง ตัวดำเนินการสำหรับความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมตามลำดับ และเมื่อใช้วิธีการสร้างสมการเทียบเท่าสมการเชิงเส้นตรงที่ถูกนำเสนอโดย Cooper *et al.* [15] จะสามารถเขียนโครงสร้างข้อมูลของ RV ได้ ดังนี้

$$\hat{x}_{i^n o}^{\text{Sup}} = \bar{x}_{i^n o}^{\text{Sup}} + p_{i^n o}^{\text{Sup}} \zeta_{i^n o}^{\text{Sup}}; \quad \hat{x}_{i^n j}^{\text{Sup}} = \bar{x}_{i^n j}^{\text{Sup}} + p_{i^n j}^{\text{Sup}} \zeta_{i^n j}^{\text{Sup}}; \quad (74)$$

$$\hat{y}_{r^n o}^{\text{Sup}} = \bar{y}_{r^n o}^{\text{Sup}} + q_{r^n o}^{\text{Sup}} \zeta_{r^n o}^{\text{Sup}}; \quad \hat{y}_{r^n j}^{\text{Sup}} = \bar{y}_{r^n j}^{\text{Sup}} + q_{r^n j}^{\text{Sup}} \zeta_{r^n j}^{\text{Sup}} \quad (75)$$

$$\hat{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}} = \bar{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}} + k_{a^n j}^{\text{SupMa}} \zeta_{a^n j}^{\text{SupMa}}; \quad \hat{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}} = \bar{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}} + k_{b^n j}^{\text{SupMa}} \zeta_{b^n j}^{\text{SupMa}} \quad (76)$$

เมื่อ $\bar{x}_{i^n o}^{\text{Sup}}, \bar{x}_{i^n j}^{\text{Sup}}, \bar{y}_{r^n o}^{\text{Sup}}, \bar{y}_{r^n j}^{\text{Sup}}, \bar{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}}, \bar{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}}$ เป็น ค่าเฉลี่ยของสิ่งตัวอย่าง เทอม $p_{i^n o}^{\text{Sup}} \zeta_{i^n o}^{\text{Sup}}, p_{i^n j}^{\text{Sup}} \zeta_{i^n j}^{\text{Sup}}, q_{r^n o}^{\text{Sup}} \zeta_{r^n o}^{\text{Sup}}, q_{r^n j}^{\text{Sup}} \zeta_{r^n j}^{\text{Sup}}, k_{a^n j}^{\text{SupMa}} \zeta_{a^n j}^{\text{SupMa}}, k_{b^n j}^{\text{SupMa}} \zeta_{b^n j}^{\text{SupMa}}$ เป็น ความคลาดเคลื่อนของสิ่งตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ประมาณค่าคาดคะเนของ RV ได้จาก $E(\hat{x}_{i^n o}^{\text{Sup}}) = \bar{x}_{i^n o}^{\text{Sup}}, E(\hat{x}_{i^n j}^{\text{Sup}}) = \bar{x}_{i^n j}^{\text{Sup}}, E(\hat{y}_{r^n o}^{\text{Sup}}) = \bar{y}_{r^n o}^{\text{Sup}}, E(\hat{y}_{r^n j}^{\text{Sup}}) = \bar{y}_{r^n j}^{\text{Sup}}, E(\hat{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}}) = \bar{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}}, E(\hat{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}}) = \bar{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}}$ และจะประมาณความแปรปรวนของค่าคาดคะเนได้จาก $\text{Var}(\hat{x}_{i^n o}^{\text{Sup}}) = (p_{i^n o}^{\text{Sup}} \sigma)^2, \text{Var}(\hat{x}_{i^n j}^{\text{Sup}}) = (p_{i^n j}^{\text{Sup}} \sigma)^2, \text{Var}(\hat{y}_{r^n o}^{\text{Sup}}) = (q_{r^n o}^{\text{Sup}} \sigma)^2, \text{Var}(\hat{y}_{r^n j}^{\text{Sup}}) = (q_{r^n j}^{\text{Sup}} \sigma)^2, \text{Var}(\hat{z}_{a^n j}^{\text{SupMa}}) = (k_{a^n j}^{\text{SupMa}} \sigma)^2$ และ $\text{Var}(\hat{z}_{b^n j}^{\text{SupMa}}) = (k_{b^n j}^{\text{SupMa}} \sigma)^2$ ซึ่งเมื่อแทนเทอมดังที่ได้กล่าวข้างต้นจะทำให้ได้สมการข้อจำกัดที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็น RV กลายเป็นสมการเทียบเท่าที่อยู่ในเทอมกำลังสอง แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการแก้ปัญหาโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-Linear Programming) มีความยุ่งยากในการแก้ปัญหา ดังนั้นในบทความนี้จึงกำหนดให้สหสัมพันธ์ระหว่างแต่ละอินพุตและเอาต์พุตมีค่าเป็น 1 ซึ่งจะทำให้เทอมที่อยู่ภายใต้รากที่สองกลายเป็นรูปกำลังสองสมบูรณ์ และจะได้สมการข้อจำกัดอยู่ในรูปเชิงเส้น ดังนี้

$$\Omega \text{Sup} \bar{x}_{i^n o}^{\text{Sup}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{x}_{i^n j}^{\text{Sup}} \geq \Phi^{-1}(1 - \rho_{i^n}^{\text{Sup}}) \sum_{j=1}^n \lambda_j p_{i^n j}^{\text{Sup}} - \Omega \text{Sup} p_{i^n o}^{\text{Sup}} \quad (77)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{y}_{r^n j}^{\text{Sup}} - \bar{y}_{r^n o}^{\text{Sup}} \geq \Phi^{-1}(1 - \tau_{r^n}^{\text{Sup}}) \sum_{j=1}^n \lambda_j q_{r^n j}^{\text{Sup}} - q_{r^n o}^{\text{Sup}} \quad (78)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{z}_{a''j}^{\text{SupMa}} - \bar{z}_{a''o}^{\text{SupMa}} \geq \Phi^{-1}(1 - \theta_a^{\text{SupMa}}) \sum_{j=1}^n \lambda_j k_{a''j}^{\text{SupMa}} \quad (79)$$

$$\bar{z}_{b''o}^{\text{MaSup}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{z}_{b''j}^{\text{MaSup}} \geq \Phi^{-1}(1 - \theta_b^{\text{MaSup}}) \sum_{j=1}^n \lambda_j k_{b''j}^{\text{MaSup}} \quad (80)$$

โดยอาศัยหลักการเดียวกันกับการสร้างอสมการ (77)-(80) จะนำไปใช้กับอสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตหรือเอาต์พุตเป็น RV (หรือ อสมการที่มี "•") ใน (2)-(55) ด้วย

4. การแปลงอสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตหรือเอาต์พุตเป็น FV

ทฤษฎีเซตฟัซซี่ (Fuzzy Sets Theory) ถูกเสนอครั้งแรกโดย Zadeh [16] เพื่อใช้ในการตัดสินใจภายใต้สภาพแวดล้อมที่ข้อมูลมีความคลุมเครือหรือไม่แน่ชัด (Imprecise and Vague Data) ที่เรียกว่าสภาพแวดล้อมแบบฟัซซี่ (Fuzzy Environment) จากนั้นก็ถูกพัฒนามาใช้กับปัญหาโปรแกรมคณิตศาสตร์แบบฟัซซี่ (Fuzzy Mathematical Programming) โดย Zimmermann [17] สำหรับการแก้ปัญหาตัวแบบ DEA ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นตัวแปรฟัซซี่ในบทความนี้จะอาศัยวิธีเครดิตบิลิตี้ซึ่งถูกนำมาใช้กับตัวแบบ CCR-I ที่มีอินพุตและเอาต์พุตเป็นฟัซซี่ (Fuzzy CCR-I) โดย Lertworasirikul *et al.* [18] ซึ่งวิธีดังกล่าวจะจัดการกับความไม่แน่นอนในสมการเป้าหมายและสมการข้อจำกัดที่มีความไม่แน่นอนแบบฟัซซี่ด้วยตัวดำเนินการเครดิตที่คาดคะเน (Expected Credit Operator) ลงในเทอมที่มีความเป็นฟัซซี่ ภายใต้แนวคิดตัววัดเครดิตบิลิตี้ (Credibility Measure; Cr) ซึ่งถูกนิยามโดย Liu and Liu [19] ในฐานะค่าเฉลี่ยของตัววัดความเป็นไปได้ (Possibility Measures; π) กับตัววัดความแน่นอน (Necessity Measures; N) ดังนั้นถ้าให้ $\tilde{\Psi}$ เป็น FV ที่อยู่บนปริภูมิความเป็นไปได้ (Possibility Space) ซึ่งมี $\mu_{\tilde{\Psi}}(t)$ สำหรับ $t \in \mathfrak{R}$ เป็น ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ของ $\tilde{\Psi}$ โดยที่ $\tilde{\Psi}$ มีสมบัติทั้ง 3 ข้อร่วมกัน ดังต่อไปนี้

- (i) ตัวแปรฟัซซี่ $\tilde{\Psi}$ เป็นปกติ (Normal Fuzzy Variable) ถ้าความเป็นสมาชิกสูงสุดของ $\tilde{\Psi}$ เท่ากับ 1 แทนด้วย $\sup_{t \in \mathfrak{R}} \{\mu_{\tilde{\Psi}}(s)\} = 1$
- (ii) เซตระดับอัลฟา (α -Level Set) ของตัวแปรฟัซซี่ $\tilde{\Psi}$ ถูกนิยามตลอดช่วงจาก $\tilde{\Psi}$ ด้วยทุกระดับความเป็นสมาชิก α แทนด้วย $\tilde{\Psi}_\alpha = \{t \in \mathfrak{R} / \mu_{\tilde{\Psi}}(s) \geq \alpha\}$
- (iii) ตัวแปรฟัซซี่ $\tilde{\Psi}$ เป็นคอนเวกซ์ (Convex Fuzzy Variable) แทนด้วย $\mu_{\tilde{\Psi}}(\delta t_1 + (1 - \delta)t_2) \geq \min\{\mu_{\tilde{\Psi}}(t_1), \mu_{\tilde{\Psi}}(t_2)\}$ สำหรับทุกๆ $t_1, t_2 \in \mathfrak{R}$ และ $\delta \in [0, 1]$

แล้วจะเรียก $\tilde{\Psi}$ ว่าเป็น ตัวเลขฟัซซี่ (Fuzzy Number) และถ้าให้ $E[\tilde{\Psi}]$ เป็นตัวดำเนินการเครดิตที่คาดคะเนของ $\tilde{\Psi}$ แล้ว จะได้ว่า

$$E[\tilde{\Psi}] = \lim_{M \rightarrow \infty} \left(\int_0^{+M} \text{Cr}(\tilde{\Psi} \geq t) dt - \int_{-M}^0 \text{Cr}(\tilde{\Psi} \leq t) dt \right) \quad (81)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างตัววัดเครดิตบิลิตี้ ตัววัดความเป็นไปได้ และตัววัดความแน่นอน ดังนั้นจะสามารถเขียน (42) ได้ใหม่ ดังนี้

$$E[\tilde{\Psi}] = \frac{1}{2} \lim_{M \rightarrow \infty} \left(\int_0^{+M} 1 dt - \int_{-M}^0 1 dt + \int_0^{+M} \pi(\tilde{\Psi} \geq t) dt - \int_{-M}^0 \pi(\tilde{\Psi} > t) dt + \int_0^{+M} \pi(\tilde{\Psi} < t) dt - \int_{-M}^0 \pi(\tilde{\Psi} \leq t) dt \right) \quad (82)$$

เนื่องจากตัวเลขฟัซซี่ $\tilde{\Psi}$ แสดงว่า ค่า $\pi(\tilde{\Psi} < t)$ และ $\pi(\tilde{\Psi} > t)$ เทียบเท่า $\pi(\tilde{\Psi} \leq t)$ และ $\pi(\tilde{\Psi} \geq t)$ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อประมาณค่า $\pi(\tilde{\Psi} < t)$ และ $\pi(\tilde{\Psi} > t)$ ด้วย $\pi(\tilde{\Psi} \leq t)$ และ $\pi(\tilde{\Psi} \geq t)$ ตามลำดับ แล้วจะได้ $E[\tilde{\Psi}]$ ดังนี้

$$E[\tilde{\Psi}] = \frac{1}{2} \left((\tilde{\Psi})_1^U + (\tilde{\Psi})_1^L + \int_{(\tilde{\Psi})_1^U}^{(\tilde{\Psi})_0^U} \pi(\tilde{\Psi} \geq t) dt - \int_{(\tilde{\Psi})_1^L}^{(\tilde{\Psi})_0^L} \pi(\tilde{\Psi} \leq t) dt \right) \quad (83)$$

เมื่อ $(\tilde{\Psi})_\alpha^L$ และ $(\tilde{\Psi})_\alpha^U$ แทน ขอบเขตล่างและบนของเซตระดับอัลฟา ตามลำดับ ส่วนเทอม $\pi(\tilde{\Psi} \leq t)$ และ $\pi(\tilde{\Psi} \geq t)$ จะสามารถหาได้จาก

$$\text{ขอบเขตบน; Max } \alpha, \text{ st. } (\tilde{\Psi})_\alpha^U \geq t \quad (84)$$

$$\text{ขอบเขตล่าง; Max } \alpha, \text{ st. } (\tilde{\Psi})_\alpha^L \leq t \quad (85)$$

และจาก $E[a\tilde{X} + b\tilde{Y}] = aE[\tilde{X}] + bE[\tilde{Y}]$ สำหรับทุกๆ จำนวนจริง [18] จะได้อสมการข้อจำกัดสำหรับขอบเขตของผู้ส่งมอบ ดังนี้

$$\text{อินพุตทางตรง; } \sum_{j=1}^n \lambda_j E[\tilde{x}_j^{\text{Sup}}] - \Omega^{\text{Sup}} E[\tilde{x}_1^{\text{Sup}}] \leq 0 \quad (86)$$

$$\text{เอาท์พุตทางตรง; } E[\tilde{y}_r^{\text{Sup}}] - \sum_{j=1}^n \lambda_j E[\tilde{y}_r^{\text{Sup}}] \leq 0 \quad (87)$$

$$\text{เอาท์พุตระหว่างสมาชิก; } \tilde{z}_a^{\text{SupMa}} - \sum_{j=1}^n \lambda_j E[\tilde{z}_a^{\text{SupMa}}] \leq 0 \quad (88)$$

$$\text{อินพุตระหว่างสมาชิก; } \sum_{j=1}^n \lambda_j E[\tilde{z}_b^{\text{MaSup}}] - \tilde{z}_b^{\text{MaSup}} \leq 0 \quad (89)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าจากเครดิตที่คาดคะเนที่ได้จาก (83)-(85) ซึ่งเป็นค่าคริปลงนอสมการข้างต้นจะได้พื้นที่คำตอบที่แน่นอนได้ (Crisp Feasible Region) และด้วยวิธีการเดียวกันนี้จะสามารถนำไปใช้กับอสมการข้อจำกัดอื่นๆ ที่มีอินพุตหรือเอาท์พุตเป็น FV (หรือ อสมการที่มี \bullet^m) ใน (2)-(55) จะได้เส้นเขตแดนประสิทธิภาพที่ไม่มี ความคลุมเครือแบบฟัซซี่

5. สรุป

โดยอาศัยวิธี CC และวิธีเครดิตบิลิตีจะช่วยให้สามารถแปลงอสมการข้อจำกัดที่มีอินพุตและเอาท์พุตเป็น RV และ FV ไปเป็นค่าเทียบเท่าดิเทอร์มินิสติก และเทียบเท่าคริป ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้วิธี CC จะทำให้ตัวแบบมีความยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นในบทความนี้จึงสร้างข้อกำหนดให้หสัมพันธ์ของอินพุตและเอาท์พุตเป็น 1 ซึ่งทำให้อสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นกลายเป็นอสมการเชิงเส้น อย่างไรก็ตามในบทความนี้

ไม่ได้เสนอกรณีฟัซซี่หรือเอ๊าท์พุทเป็นตัวแปรสุ่มที่มีความเป็นฟัซซี่ (Fuzzy Random Variable; FRV) ซึ่งมีความยุ่งยากกว่าแต่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะมุ่งไปที่การจัดการกับ FRV

บรรณานุกรม

- [1] Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E., 1978, "Measuring the efficiency of decision making units," *European Journal of Operational Research*, 2: 429-444.
- [2] Chilingirian, J.A., 1995, "Evaluating physician efficiency in hospitals: A multivariate analysis of best practices," *European Journal of Operational Research*, 80: 548-574.
- [3] Sueyoshi, T., 1995, "Production analysis in different time periods: An application of data envelopment analysis," *European Journal of Operational Research*, 86: 216-230.
- [4] Nash, D., and Sterna-Karwa, A., 1996, "An application of DEA to measure branch cross selling efficiency," *Computers Ops Res.*, 23(4): 385-392.
- [5] Tofallis, C., 1997, "Input efficiency profiling: An application to airlines," *Computers Ops Res.*, 24(3): 253-258.
- [6] Hong, H.K., Ha, S.H., Shin, C.K., Park, S.C., and Kim, S.H., 1999, "Evaluating the efficiency of system integration projects using data envelopment analysis (DEA) and machine learning," *Expert Systems with Applications*, 16: 283-296.
- [7] Al-Shammari, M., 1999, "Optimization modeling for estimating and enhancing relative efficiency with application to industrial companies," *European Journal of Operational Research*, 115: 488-496.
- [8] Zhu, J., 2000, "Multi-factor performance measure model with an application to Fortune 500 companies," *European Journal of Operational Research*, 123: 105-124.
- [9] Martin J.C., and Román, C., 2001, "An application of DEA to measure the efficiency of Spanish airports prior to privatization," *Journal of Air Transport Management*, 7: 149-157.
- [10] Fukuyama, H., and Weber, W. L., 2002, "Estimating output allocative efficiency and productivity change: Application to Japanese banks," *European Journal of Operational Research*, 137: 177-190.
- [11] Façanha, L. O., and Resende, M., 2004, "Price cap regulation, incentives and quality: The case of Brazilian telecommunications," *Int. J. Production Economics*, 92: 133-144.
- [12] Luo, X., and Donthu, N., 2005, "Assessing advertising media spending inefficiencies in generating sales," *Journal of Business Research*, 58: 28-36.
- [13] Seiford, L., 1996, "Data envelopment analysis: The evolution of the state of the art," *Journal of Productivity Analysis*, 7: 99-137.
- [14] Cooper, W.W., Huang, Z. M., Lelas, V., Li, S.X., and Olesen, O. B., 1998, "Chance constrained programming formulations for stochastic characterizations of efficiency and dominance in DEA," *Journal of Productivity Analysis*, 9: 53-79.
- [15] Charnes, A., and Cooper, W.W., 1959, "Chance constrained programming," *Management*

- Science, 6(1): 73-79.
- [16] Zadeh, L. A., 1978, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility," Fuzzy Sets and Systems, 1: 3-28.
- [17] Zimmermann, H. M., 1996, Fuzzy Set Theory and Its Application, Kluwer Academic Publishers, London.
- [18] Lertworasirikul, S., Fang, S. C., Joines, J. A., and Nuttle, H.L.W., 2003, "Fuzzy data envelopment analysis (DEA): A possibility approach," Fuzzy Sets and Systems, 139: 379-394.
- [19] Liu, Y.K., and Liu, B. 2003, "A class of fuzzy random optimization: expected value models. Information Sciences," 155: 89-102.