ขั้นตอนวิธีในพัฒนาคำตอบของปัญหาการกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าในห่วงโซ่อุปทานที่มีการแบ่งปัญหาออกเป็นสองระดับ

สุภาลิน ศรัณย์วงศ์[1] จูลิน ลิคะสิริ[*2]
ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัญหาการกระจายสินค้าในเครือข่ายห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดสรรสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าและเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้ามีค่าต่ำที่สุด ปัญหาดังกล่าวถูกนำเสนอด้วยแบบจำลองกำหนดการสองระดับ โดยที่แบบจำลองระดับบนและระดับล่างเป็นการหาค่าที่ดีที่สุดในการกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้า และจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าตามลำดับ เนื่องจากการลดค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ในปัญหาระดับหนึ่งเป็นผลให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ในปัญหาอีกระดับหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการพัฒนาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับเพื่อให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาทั้งสองระดับมีความสมดุล นอกจากนี้ได้มีการแสดงตัวอย่างอย่างง่ายเพื่ออธิบายการทำงานของขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ และมีการนำเสนอผลการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์และหาคำตอบที่ดีขึ้นจากขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอในบทความนี้อีกด้วย

คำสำคัญ: ปัญหาการกระจายสินค้า, ห่วงโซ่อุปทาน, กำหนดการสองระดับ

* Corresponding author. E-mail: chulin.l@cmu.ac.th
[1] นักศึกษาปริญญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Algorithm for Developing a Solution for Distribution Center Problems in the Supply Chain Using the Bi-level Programming Approach

Supalin Saranwong [1] Chulin Likasiri [*2]

Department of Mathematics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai 50200

Abstract

This study focuses on distribution center (DC) problems in the supply chain network. The purpose of this problem was to relocate the products from plants to customers in order to meet their needs and to minimize transportation cost. In this work, the model was written in a bi-level programming form where the This upper- and lower- models were to find the minimum cost of transportation from plants to DCs and DCs to customers. Decreasing the objective function value of the upper-level problem will increase the objective function value of the lower-level problem and vice versa. As a result, the algorithm developed to solve the bi-level programming problem was used to find the optimum balance between the objective function values of the two levels. A simple example to show how the algorithm developed the solution is provided. Moreover, the computational simulations obtained with the proposed algorithm are also presented.

Keywords: Distribution center problem, Supply chain, Bi-level programming

* Corresponding author. E-mail: chulin.l@cmu.ac.th

[1] Doctor of Philosophy Student in Department of Mathematics, Faculty of Science, Chiang Mai University

[2] Assistant Professor in Department of Mathematics, Faculty of Science, Chiang Mai University

1. บทนำ

การจัดการห่วงโซ่อุปทานเป็นการประยุกต์กระบวนการต่างๆหรือองค์กรต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อแปรเปลี่ยนวัตถุดิบให้กลายเป็นสินค้าส่งต่อไปยังลูกค้า ห่วงโซ่อุปทานสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ ห่วงโซ่อุปทานที่เข้าสู่กระบวนการผลิต และห่วงโซ่อุปทานที่เข้าสู่ลูกค้า ปัญหาการกระจายสินค้าหรือวัตถุดิบจากโรงงานไปยังลูกค้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการจัดการโลจิสติกส์ (logistic) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการจัดการห่วงโซ่อุทาน (supply chain management) เนื่องจากการเคลื่อนย้ายสินค้าไปยังลูกค้าที่มีประสิทธิภาพส่งผลให้ต้นทุนของสินค้ามีค่าลดลงอีกทั้งยังทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจอีกด้วย

ปัญหาการกระจายสินค้า (distribution center problem) มีจุดมุ่งหมายในการจัดหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าและจัดสรรความต้องการของลูกค้าให้แก่ศูนย์กระจายสินค้าโดยต้องการให้ค่าใช้จ่ายในระบบมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งปัญหาดังกล่าวมีผู้ให้ความสนใจอย่างกว้างขวางในการทำวิจัยทางด้านโลจิสติกส์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการกระจายสินค้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ งานวิจัยที่พิจารณาปัญหาเป็นปัญหาระดับเดียว (single level) และงานวิจัยที่แบ่งปัญหาออกเป็นหลายระดับ (multi-level) ปัญหาการกระจายสินค้าที่พิจารณาเป็นปัญหาระดับเดียวนั้นได้มีการนำเสนอวิธีการหาคำตอบหลากหลายวิธี เช่น การหาคำตอบด้วยการผ่อนปรนปัญหาแบบลากรานจ์ (Lagrangian relaxation) [1] การแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (branch and bound) [2] และการหาคำตอบซิมมูเลทเต็ดแอนแนลลิง (simulated annealing) [3] เป็นต้น ส่วนปัญหาการกระจายสินค้าที่พิจารณาเป็นปัญหาหลายระดับนั้นได้มีการนำเสนอวิธีการหาแบ่งปัญหาและการหาคำตอบด้วยวิธีต่างๆ เช่น การประยุกต์โปรแกรมเชิงจำนวนเต็มแบบผสมกับเทคนิคเบนเดอร์ ดีคอมโพสิชัน (Bender's decomposition) [4] และการหาคำตอบโดยการค้นหาแบบทาบู (tabu search) ร่วมกับการแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนๆ (decomposed optimization) [5] เป็นต้น

ปัญหากำหนดการสองระดับ (bi-level programming) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์เชิงลำดับขั้นที่ลักษณะเหมือนการเล่นเกมส์โดยผลัดกันทำการตัดสินใจเดินเกมส์ นั่นคือสถานการณ์ของปัญหาในระดับหนึ่งจะขึ้นอยู่กับผลการตัดสินใจของผู้ทำการตัดสินใจในปัญหาอีกระดับหนึ่ง ซึ่งปัญหาดังกล่าวยากต่อการหาคำตอบเพราะเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard problem) อีกทั้งยังมีลักษณะเป็นปัญหาไม่คอนเวกซ์ (non-convexity) [6,7] ผู้วิจัยมากมายได้เสนอแนวทางในการแก้ปัญหากำหนดการสองระดับหลากหลายวิธีดังที่ได้อธิบายอย่างละเอียดในการทบทวนบทความ [8] เช่น วิธีการแตกกิ่งและกำจัดขอบเขต (Branch and Bound) ขั้นตอนวิธีที่ดีที่สุดอันดับที่ k (*k*-th best algorithm) การค้นหาแบบตะแกรง (Grid search) วิธีการใช้ฟังก์ชันค่าปรับ (Penalty function method) วิธีบริเวณที่เชื่อถือได้ (Trust-region method) และวิธีการแจงนับ (Enumeration method) ถึงแม้ว่าปัญหาการจัดตั้งโรงงานและปัญหากำหนดการสองระดับจะมีผู้ทำการศึกษาอย่างกว้างขวาง แต่งานวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาศูนย์กระจายสินค้าโดยใช้วิธีกำหนดการสองระดับเพิ่งได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ในปี ค.ศ.2004 มีผู้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการสองระดับเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าในปัญหาระดับบนและหาค่าเหมาะสมที่สุดในการสมดุลปริมาณงานหรือสินค้าที่จัดสรรในแต่ละศูนย์กระจายสินค้าในปัญหาระดับล่าง โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ในการหาคำตอบ [9] ต่อมาปี ค.ศ. 2008 ปัญหาระดับบนของปัญหากำหนดการสองระดับคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้า และปัญหาระดับล่างเป็นการหาการกระจายสินค้าอย่างสมดุลเพื่อให้ค่าใช้จ่ายของลูกค้ามีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีการนำเสนอวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติกส์โดยเสนอรูปแบบเฉพาะของฟังก์ชันตอบสนอง (response function) ระหว่างปัญหาสองระดับ [10] นอกจากนี้วิธีการหาคำตอบของปัญหาการกระจายสินค้าโดยกำหนดการสองระดับได้มีการนำเสนออีกหลากหลายวิธี เช่น ขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (ant colony optimization) [11] ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) [12] งานวิจัย [13] นำเสนอวิธีการหาคำตอบของปัญหาระดับล่างของปัญหากำหนดการสองระดับโดยการเลือกวิธีการจัดสรรความต้องการของลูกค้าไปยังศูนย์กระจายสินค้าด้วยวิธีต่างๆกัน ซึ่งวิธีการหาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับที่ได้นำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมามีลักษณะการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาระดับล่างแล้วนำไปแทนเป็นเงื่อนไขข้อจำกัดในปัญหาระดับบนเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียงครั้งเดียว หรือมีการกำหนดค่าการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าเริ่มต้นในรูปแบบต่างๆเพื่อนำไปใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาระดับล่างจากนั้นนำคำตอบที่ได้ไปแก้ปัญหาระดับบนอีกครั้ง ในงานวิจัยนี้เป็น

การศึกษาวิธีการส่งคำตอบระหว่างปัญหาระดับบนและปัญหาระดับล่างในกำหนดการสองระดับเพื่อให้การกระจายสินค้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการกำหนดวิธีสร้างผลเฉลยเริ่มต้น จากนั้นทำการพัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนและปัญหาระดับล่างอีก 2 ครั้งเพื่อให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมของทั้งระบบมีค่าลดลง

2. โครงสร้างปัญหา

2.1 การอธิบายปัญหาที่สนใจ

รูปแบบการกระจายสินค้าในห่วงโซ่อุปทานมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าโดยตรง การกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าโดยผ่านศูนย์กระจายสินค้าหรือตัวแทนจำหน่ายแห่งเดียวหรือหลายแห่ง เป็นต้น งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการกระจายสินค้าโดยผ่านศูนย์กระจายสินค้าหลายแห่งโดยที่ศูนย์กระจายสินค้ามีลักษณะแบบ Cross-Docking นั่นคือเป็นศูนย์กระจายสินค้าที่ไม่มีคลังเก็บสินค้า มีการเปลี่ยนถ่ายสินค้าจากรถบรรทุกคันหนึ่งไปยังอีกคันหนึ่งเท่านั้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอปัญหาดังกล่าวในรูปแบบกำหนดการสองระดับ โดยปัญหาระดับบนเป็นวิธีการขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด ในขณะที่ปัญหาระดับล่างเป็นวิธีการเลือกรับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าของลูกค้าแต่ละคนมีค่าต่ำที่สุด เห็นได้ชัดว่าในปัญหาที่สนใจนี้มีผู้ทำการตัดสินใจ 2 ฝ่าย ซึ่งแต่ละฝ่ายมีความต้องการที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายเฉพาะของตนมีค่าต่ำที่สุด โดยไม่สนใจค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบ

2.2 การอธิบายปัญหาในรูปแบบทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอในบทความนี้เป็นการพิจารณาปัญหาที่มีการกระจายสินค้าเพียงอย่างเดียว มีโรงงานและศูนย์กระจายสินค้าหลายแห่ง โดยมีข้อจำกัดด้านความจุสินค้าหรือความสามารถในการให้บริการของโรงงานและศูนย์กระจายสินค้า งานวิจัยนี้ได้แบ่งส่วนประกอบต่างๆของห่วงโซ่อุปทานเป็น 3 ส่วนหลักๆดังนี้ 1) โรงงานหรือผู้ผลิต 2) ศูนย์กระจายสินค้าหรือตัวแทนจำหน่าย และ 3) ลูกค้าหรือผู้ค้าปลีก ในบทความนี้จะแบ่งโครงสร้างของปัญหาเป็นสองระดับนั่นก็คือ ระดับที่ 1 คือปัญหาระหว่างโรงงานและศูนย์กระจายสินค้า และระดับที่ 2 คือปัญหาระหว่างศูนย์กระจายสินค้าและลูกค้า กำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองดังนี้

พารามิเตอร์ในแบบจำลอง ได้แก่

$I = \{1, 2, \ldots, m\}$ แทนเซตของโรงงาน

$J = \{1, 2, \ldots, n\}$ แทนเซตของศูนย์กระจายสินค้า(DC)

$K = \{1, 2, \ldots, p\}$ แทนเซตของลูกค้า

f_j = ค่าใช้จ่ายในการสร้างศูนย์กระจายสินค้าในพื้นที่ j

Ca_{ij} = ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าโรงงาน i ไปยังศูนย์กระจายสินค้า j

Cb_{jk} = ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า j ไปยังลูกค้า k

Pa_i = ความสามารถในการจุสินค้าของโรงงาน i

Pb_j = ความสามารถในการจุสินค้าของศูนย์กระจายสินค้า j

D_k = ปริมาณความต้องการของลูกค้าคนที่ k

ตัวแปรตัดสินใจในแบบจำลอง ได้แก่

z_j = ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ ตัดสินใจสร้างศูนย์กระจายสินค้าบนพื้นที่ j และมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีอื่นๆ

x_{ij} = ปริมาณสินค้าที่ถูกส่งจากโรงงาน i ไปยังศูนย์กระจายสินค้า j

y_{jk} = ปริมาณสินค้าที่ถูกส่งจากศูนย์กระจายสินค้า j ไปยังลูกค้า k

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาระดับที่ 1 และระดับที่ 2 เป็นตัวแบบกำหนดการเชิงเส้นที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการขนส่งสินค้าระหว่างโรงงานและศูนย์กระจายสินค้า และระหว่างศูนย์กระจายสินค้ากับลูกค้ามีค่าต่ำที่สุด ตามลำดับ ปัญหาทั้งสองระดับสามารถเขียนในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังต่อไปนี้

ปัญหาระดับที่ 1:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^{n} f_j z_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} Ca_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{j=1}^{n} z_j \geq 1 \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \leq Pa_i \quad , \forall i \in I \qquad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} \leq Pb_j z_j \quad , \forall j \in J \qquad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{p} y_{jk} \leq \sum_{i=1}^{m} x_{ij} \quad , \forall j \in J \qquad (5)$$

$$z_j \in \{0,1\} \qquad x_{ij} \geq 0 \ .$$

ปัญหาระดับที่ 2:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{p} Cb_{jk} y_{jk} \qquad (6)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{j=1}^{n} y_{jk} \geq D_k \quad , \forall k \in K \qquad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{p} y_{jk} \leq (\sum_{i=1}^{m} x_{ij}) z_j \ , \forall j \in J \qquad (8)$$

$$y_{jk} \geq 0 \ .$$

แบบจำลองของปัญหาระดับที่ 1 เป็นการหาวิธีจัดสรรสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่ง และหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการสร้างศูนย์กระจายสินค้า สมการที่ (1) คือ สมการฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุด ข้อจำกัดที่ (2) เป็นการกำหนดว่าต้องมีการสร้างศูนย์กระจายสินค้าอย่างน้อย 1 แห่ง ข้อจำกัดที่ (3) และ (4) เป็นแสดงข้อจำกัดด้านการจุหรือการให้บริการของโรงงาน และศูนย์กระจายสินค้าแต่งละแห่ง ตามลำดับ ข้อจำกัดที่ (5) เป็นการกำหนดให้มีการส่งสินค้าจากโรงงานผ่านศูนย์กระจายสินค้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

แบบจำลองของปัญหาระดับที่ 2 แสดงถึงการเลือกรับสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าของลูกค้าแต่ละคนน้อยที่สุดซึ่งแสดงในสมการฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ (6) ข้อจำกัดที่ (7) ทำให้แน่ใจว่าลูกค้าได้รับบริการหรือสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าเพียงพอต่อความต้องการ และข้อจำกัดที่ (8) แสดงให้เห็นว่าลูกค้าสามารถรับบริการหรือสินค้าได้จากศูนย์กระจายสินค้า ก็ต่อเมื่อศูนย์กระจายสินค้านั้นได้ถูกสร้างขึ้น

ปัญหากำหนดการสองระดับประกอบด้วยปัญหาระดับบนและระดับล่าง โดยการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาระดับบนจะได้มาจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหาระดับล่างก่อน ซึ่งการกำหนดปัญหาระดับบนและระดับล่างในบทความนี้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการกำหนดผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาในหัวข้อต่อไป ถ้าผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาคือคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 กับคำตอบของปัญหาระดับที่ 1 ที่สอดคล้องกันแล้วปัญหากำหนดการสองระดับในกรณีนี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ Min {(1) subject to: (2)-(5) โดยที่ y∈ argmin {(6) subject to: (7),(8)}} โดยเรียกปัญหาระดับที่ 1 ว่าปัญหาระดับบน และ ปัญหาระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับล่าง นอกจากนี้ในการหาคำตอบของปัญหาระดับบนให้แทนค่าของ y ใน (5) ด้วยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากปัญหาระดับล่าง ในทำนองเดียวกันถ้าผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาคือคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 และคำตอบของปัญหาระดับที่ 2 ที่สอดคล้องกันแล้ว ปัญหากำหนดการสองระดับสามารถเขียนได้ดังนี้ Min {(6) subject to: (7),(8) โดยที่ (z,x)∈ argmin {(1) subject to: (2)-(5)}} โดยเรียกปัญหาระดับที่ 1 และระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับล่างและปัญหาระดับบน ตามลำดับ และในการหาคำตอบของปัญหาระดับบนให้กำหนดค่า (z, x) ใน (8) เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาระดับล่าง

3. ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบ

ปัญหากำหนดการสองระดับนั้นยากต่อการหาคำตอบเพราะเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยากซึ่งไม่สามารถแก้หาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในเวลาโพลิโนเมียล งานวิจัยนี้ได้พิจารณาปัญหาที่มีข้อจำกัดด้านการผลิตสินค้าในโรงงานและมีข้อจำกัดด้านความจุสินค้าในศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งในปัญหาระดับบนศูนย์กระจายสินค้าสามารถรับสินค้าได้จากโรงงานมากกว่าหนึ่งโรงงานเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าในปัญหาระดับล่าง เช่นเดียวกับปัญหาระดับล่างที่ลูกค้าสามารถรับสินค้าหรือบริการได้จากศูนย์กระจายสินค้ามากกว่าหนึ่งแห่งเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าเอง ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอแนวคิดในการแก้ปัญหากำหนดการสองระดับดังนี้ หาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบนและระดับล่างแยกกันโดยใช้วิธีการหาคำตอบหรือขั้นตอนวิธีที่มีอยู่แล้ว (existing method) โดยที่งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม AIMMS ช่วยในการสร้างแบบจำลองดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2 และใช้ CPLEX ในแก้ปัญหากำหนดการเชิงจำนวนเต็มข้างต้น จากนั้นกำหนดให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 และปัญหาระดับที่ 2 คือ (z^*_j, x^*_{ij}) และ y^*_{jk} ตามลำดับ เรียกค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่สอดคล้องกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 และปัญหาระดับที่ 2 ว่า g^* และ f^* ตามลำดับ จากนั้นนำคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 เข้าไปแทนในปัญหาระดับที่ 2 เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดที่สอดคล้องกับ (z^*_j, x^*_{ij}) เรียกคำตอบของปัญหาระดับที่ 2 และค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ได้ว่า $(\tilde{y}_{jk})$ และ $\tilde{f}$ ในทำนองเดียวกันนำคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 เข้าไปแทนในปัญหาระดับที่ 1 เพื่อหาคำตอบที่สอดคล้อง $(\tilde{z}_j, \tilde{x}_{ij})$ เรียกค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่สอดคล้องกับ f^* ว่า $\tilde{g}$ จากนั้นปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับโดยการ

ลดค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ในปัญหาระดับหนึ่ง และเพิ่มค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ในปัญหาอีกระดับหนึ่ง เพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมทั้งระบบ $(f+g)$ มีค่าลดลง

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบของกำหนดการสองระดับในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการพัฒนาคำตอบที่แตกต่างกัน 2 วิธี โดยแต่ละวิธีนั้นมีการใช้คำตอบเริ่มต้นที่แตกต่างกัน 2 คำตอบ โดยอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

3.1 การพัฒนาคำตอบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อย

การพัฒนาคำตอบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อยเป็นเลือกใช้คำตอบเริ่มต้นที่สอดคล้องกับผลรวมระหว่างค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของทั้งสองระบบที่มีค่าน้อยที่สุด โดยพิจารณาระหว่างผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 (g^*) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 2 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{f}$) และ ผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 (f^*) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 1 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{g}$) ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1: คำนวณขอบเขตล่างของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์รวมของปัญหาทั้งสองระดับโดยให้มีค่าเท่ากับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 และระดับที่ 2 รวมกัน และให้ขอบเขตบนของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมของปัญหาทั้งสองระดับมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 (g^*) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 2 ที่สอดคล้องกัน($\tilde{f}$) และ ผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 (f^*) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{g}$) นั่นคือคำนวณ $UB_1 = g^* + \tilde{f}$, $UB_2 = \tilde{g} + f^*$ กำหนดให้ขอบเขตล่าง $LB = f^* + g^*$ และขอบเขตบน $UB = \min\{UB_1, UB_2\}$

ขั้นที่ 2 (ผลเฉลยเริ่มต้น): ถ้า $UB = UB_1$ แล้ว ไปยังขั้นตอนที่ 3 ถ้า $UB = UB_2$ ไปยังขั้นตอนที่ 4

ขั้นที่ 3: เรียกปัญหาระดับที่ 1 ว่าปัญหาระดับล่าง และ ปัญหาระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับบน กำหนดให้ผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับล่างคือ $(z_j^{(0)}, x_{ij}^{(0)}) = (z^*{}_j, x^*{}_{ij})$ และผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับบนคือ $y_{jk}^{(0)} = \tilde{y}_{jk}$ คำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบโดยกำหนดให้ $F^{(0)} = UB_1 = g^* + \tilde{f}$

ขั้นที่ 3.1 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาแยกกันสองระดับ) พัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลง โดยพิจารณาจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีการเลือกใช้บริการจากผู้ตัดสินใจทั้งสองฝ่ายในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระดับ ถ้าศูนย์กระจายสินค้าที่ได้รับการเลือกใช้บริการจากผู้ตัดสินใจทั้งสองฝ่ายแห่งใดมีการให้บริการไม่เต็มความจุหรือความสามารถในการให้บริการ ขั้นตอนวิธีนี้จะเพิ่มความสามารถในการจุของศูนย์กระจายสินค้าแล้วแก้ปัญหาระดับบนเพื่อให้ได้คำตอบใหม่ $y_{jk}^{(1)}$ แล้วนำตอบนั้นไปแทนในปัญหาระดับล่างเพื่อหาคำตอบใหม่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลเฉลยที่ดีที่สุด $(z_j^{(1)}, x_{ij}^{(1)})$ จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบใหม่อีกครั้ง $F^{(1)} = g^{(1)} + f^{(1)}$

ขั้นที่ 3.2 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาควบคู่กันสองระดับ) พัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงด้วย โดยพิจารณาจากผลต่างของค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบที่มีการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาระดับบนกับค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีก่อนหน้านี้ $\Delta f = f^{(2)} - f^{(1)} = f^{(2)} - \tilde{f}$ เปรียบเทียบกับผลต่างของค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบของปัญหาระดับล่างเมื่อมีการปรับเปลี่ยนคำตอบอย่างที่ต้องการกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับล่าง $\Delta g = g^{(2)} - g^{(1)} = g^{(2)} - g^*$ ถ้าการลดค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาระดับบนมีค่ามากกว่าการเพิ่มค่าใช้จ่ายในปัญหาระดับล่าง $(\Delta f + \Delta g \le 0)$ แล้วปรับเปลี่ยนไปยังคำตอบใหม่จะได้คำตอบของปัญหาระดับล่าง ระดับบน และค่าของฟังก์ชันโดยรวมหรือค่าใช้จ่ายโดยรวม คือ $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ จากนั้นไปยังขั้นที่ 5

ขั้นที่ 4: เรียกปัญหาระดับที่ 1 ว่าปัญหาระดับบน และ ปัญหาระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับล่าง กำหนดให้ผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับบนคือ $(z_j^{(0)}, x_{ij}^{(0)}) = (\tilde{z}_j, \tilde{x}_{ij})$ และผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับล่างคือ $y_{jk}^{(0)} = y_{jk}^*$ ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบคือ $F^{(0)} = UB_2 = \tilde{g} + f^*$

ขั้นที่ 4.1 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาแยกกันสองระดับ) วิธีการพัฒนาคำตอบนี้เป็นวิธีเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1 ซึ่งแตกต่างกันที่ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนมีค่าลดลงโดยพิจารณาเพิ่มความสามารถในการจุสินค้าของศูนย์กระจายสินค้าเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1 หลังจากได้คำตอบใหม่ $(z_j^{(1)}, x_{ij}^{(1)})$ แล้วนำคำตอบนั้นไปแทนในปัญหาระดับล่างเพื่อหาคำตอบใหม่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากผล

เฉลยเริ่มต้น ($y_{jk}^{(1)}$) จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบใหม่อีกครั้ง $F^{(1)} = g^{(1)} + f^{(1)}$

ขั้นที่ 4.2 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาควบคู่กันสองระดับ) การพัฒนาคำตอบในวิธีนี้มีขั้นตอนการพิจารณาเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.2 แตกต่างกันที่ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาคำตอบของปัญหาโดยให้ความสำคัญกับการลดค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนเป็นหลัก โดยการปรับเปลี่ยนคำตอบในวิธีนี้จะทำให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ทั้งระบบมีค่าลดลง การปรับเปลี่ยนหรือพัฒนาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $\Delta g = g^{(2)} - g^{(1)} = g^{(2)} - \tilde{g}$ มีค่าลดลงมากกว่า $\Delta f = f^{(2)} - f^{(1)} = f^{(2)} - f^{*}$ นั่นคือ $\Delta f + \Delta g \le 0$ เรียกคำตอบของปัญหาระดับบน ระดับล่าง และค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมทั้งระบบที่ปรับเปลี่ยนด้วยวิธีนี้แล้วว่า $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ จากนั้นไปยังขั้นตอนที่ 5

ขั้นที่ 5: แสดงผลเฉลยสุดท้ายที่ได้หลังจากการพัฒนาคำตอบทั้งสองวิธีแล้ว นั่นคือ $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ

3.2 วิธีการพัฒนาคำตอบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามาก

การพัฒนาคำตอบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามากเป็นเลือกใช้คำตอบเริ่มต้นที่สอดคล้องกับผลรวมระหว่างค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของทั้งสองระบบที่มีค่ามากที่สุด โดยพิจารณาระหว่างผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 (g^{*}) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 2 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{f}$) และ ผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 (f^{*}) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 1 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{g}$) ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

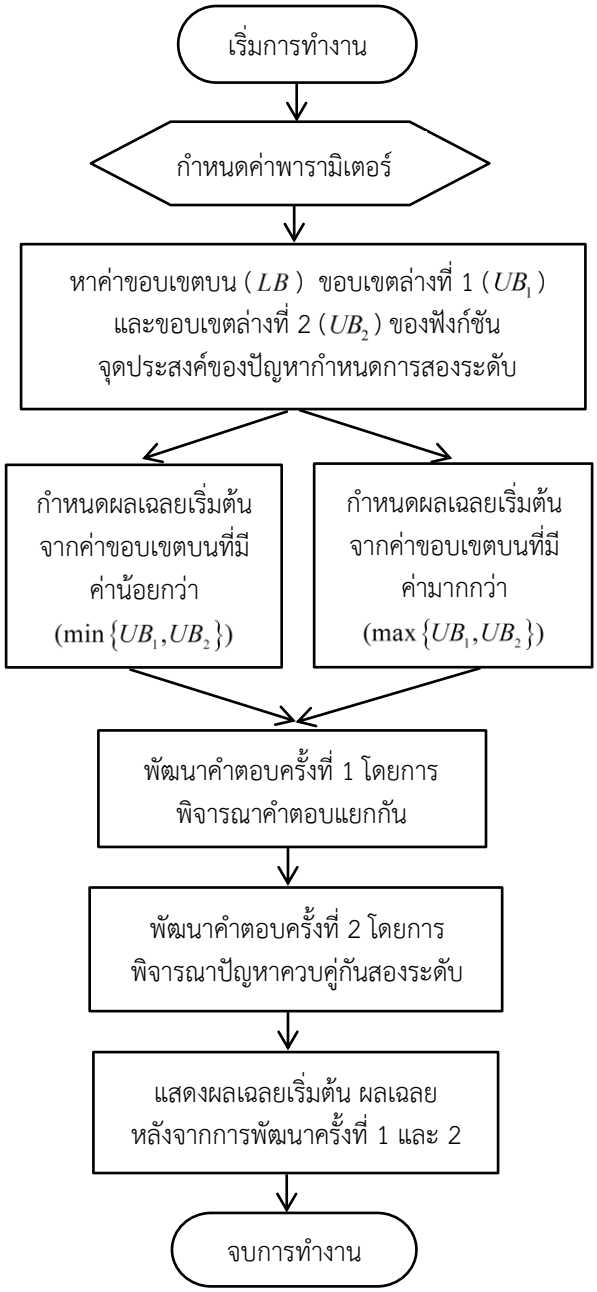
ขั้นที่ 1: คำนวณขอบเขตล่างของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์รวมของปัญหาทั้งสองระดับโดยให้มีค่าเท่ากับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 และระดับที่ 2 รวมกัน และให้ขอบเขตบนของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์รวมของปัญหาทั้งสองระดับมีค่าเท่ากับค่าที่มากที่สุดระหว่างผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 1 (g^{*}) กับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ระดับที่ 2 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{f}$) และ ผลรวมของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับที่ 2 (f^{*}) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 ที่สอดคล้องกัน ($\tilde{g}$) นั่นคือคำนวณ $UB_1 = g^{*} + \tilde{f}$, $UB_2 = \tilde{g} + f^{*}$ กำหนดให้ขอบเขตล่าง $LB = f^{*} + g^{*}$ และขอบเขตบน $UB = \max\{UB_1, UB_2\}$

ขั้นที่ 2 (ผลเฉลยเริ่มต้น): ถ้า $UB = UB_1$ แล้ว ไปยังขั้นตอนที่ 3 ถ้า $UB = UB_2$ ไปยังขั้นตอนที่ 4

ขั้นที่ 3: เรียกปัญหาระดับที่ 1 ว่าปัญหาระดับล่าง และ ปัญหาระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับบน กำหนดให้ผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับล่างคือ $(z_j^{(0)}, x_{ij}^{(0)}) = (z^{*}{}_j, x^{*}{}_{ij})$ และผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับบนคือ $y_{jk}^{(0)} = \tilde{y}_{jk}$ คำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบโดยกำหนดให้ $F^{(0)} = UB_1 = g^{*} + \tilde{f}$

ขั้นที่ 3.1 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาแยกกันสองระดับ) พัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลง โดยพิจารณาจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีการเลือกใช้บริการจากผู้ตัดสินใจทั้งสองฝ่ายในคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละระดับ ถ้าศูนย์กระจายสินค้าที่ได้รับการเลือกใช้บริการจากผู้ตัดสินใจทั้งสองฝ่ายแห่งใดมีการให้บริการไม่เต็มความจุหรือความสามารถในการให้บริการ ขั้นตอนวิธีนี้จะเพิ่มความสามารถในการจุของศูนย์กระจายสินค้าแล้วแก้ปัญหาระดับบนเพื่อให้ได้คำตอบใหม่ $y_{jk}^{(1)}$ แล้วนำตอบนั้นไปแทนในปัญหาระดับล่างเพื่อหาคำตอบใหม่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลเฉลยที่ดีที่สุด $(z_j^{(1)}, x_{ij}^{(1)})$ จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบใหม่อีกครั้ง $F^{(1)} = g^{(1)} + f^{(1)}$

ขั้นที่ 3.2 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาควบคู่กันสองระดับ) พัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงด้วย โดยพิจารณาจากผลต่างของค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบที่มีการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาระดับบนกับค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีก่อนหน้านี้ $\Delta f = f^{(2)} - f^{(1)} = f^{(2)} - \tilde{f}$ เปรียบเทียบกับผลต่างของค่าใช้จ่ายสำหรับคำตอบของปัญหาระดับล่างเมื่อมีการปรับเปลี่ยนคำตอบอย่างที่ต้องการกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับล่าง $\Delta g = g^{(2)} - g^{(1)} = g^{(2)} - g^{*}$ ถ้าการลดค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาระดับบนมีค่ามากกว่าการเพิ่มค่าใช้จ่ายในปัญหาระดับล่าง $(\Delta f + \Delta g \le 0)$ แล้วปรับเปลี่ยนไปยังคำตอบใหม่จะได้คำตอบของปัญหาระดับล่าง ระดับบน และค่าของฟังก์ชันโดยรวมหรือค่าใช้จ่ายโดยรวม คือ $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ จากนั้นไปยังขั้นที่ 5



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีการพัฒนาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับ

ขั้นที่ 4: เรียกปัญหาระดับที่ 1 ว่าปัญหาระดับบน และ ปัญหาระดับที่ 2 ว่าปัญหาระดับล่าง กำหนดให้ผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับบนคือ $(z_j^{(0)}, x_{ij}^{(0)}) = (\tilde{z}_j, \tilde{x}_{ij})$ และผลเฉลยเริ่มต้นของปัญหาระดับล่างคือ $y_{jk}^{(0)} = y_{jk}^{*}$ ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบคือ $F^{(0)} = UB_2 = \tilde{g} + f^{*}$

ขั้นที่ 4.1 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาแยกกันสองระดับ) วิธีการพัฒนาคำตอบนี้เป็นวิธีเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1 ซึ่งแตกต่างกันที่ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาคำตอบของปัญหาระดับบนเพื่อให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนมีค่าลดลงโดยพิจารณาเพิ่มความสามารถในการจุสินค้าของศูนย์กระจายสินค้าเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.1 หลังจากได้คำตอบใหม่ $(z_j^{(1)}, x_{ij}^{(1)})$ แล้วนำคำตอบนั้นไปแทนในปัญหาระดับล่างเพื่อหาคำตอบใหม่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจากผลเฉลยเริ่มต้น ($y_{jk}^{(1)}$) จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบใหม่อีกครั้ง $F^{(1)} = g^{(1)} + f^{(1)}$

ขั้นที่ 4.2 (วิธีพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาควบคู่กันสองระดับ) การพัฒนาคำตอบในวิธีนี้มีขั้นตอนการพิจารณาเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.2 แตกต่างกันที่ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาคำตอบของปัญหาโดยให้ความสำคัญกับการลดค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนเป็นหลัก โดยการปรับเปลี่ยนคำตอบในวิธีนี้จะทำให้ค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ทั้งระบบมีค่าลดลง การปรับเปลี่ยนหรือพัฒนาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $\Delta g = g^{(2)} - g^{(1)} = g^{(2)} - \tilde{g}$ มีค่าลดลงมากกว่า $\Delta f = f^{(2)} - f^{(1)} = f^{(2)} - f^{*}$ นั่นคือ $\Delta f + \Delta g \le 0$ เรียกคำตอบของปัญหาระดับบน ระดับล่าง และค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมทั้งระบบที่ปรับเปลี่ยนด้วยวิธีนี้แล้วว่า $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ จากนั้นไปยังขั้นตอนที่ 5

ขั้นที่ 5: แสดงผลเฉลยสุดท้ายที่ได้หลังจากการพัฒนาคำตอบทั้งสองวิธีแล้ว นั่นคือ $(z_j^{(2)}, x_{ij}^{(2)})$ $y_{jk}^{(2)}$ และ $F^{(2)} = g^{(2)} + f^{(2)}$ ตามลำดับ

กระบวนการทั้งหมดในการหาคำตอบของปัญหากำหนดการสองระดับที่ถูกนำเสนอในบทความนี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 1

4. ผลการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์และตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบที่ถูกนำเสนอ

หัวข้อนี้นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนที่ได้นำเสนอในบทความนี้ โดยจำลองปัญหากำหนดการสองระดับที่มีจำนวนโรงงาน(i) ศูนย์กระจายสินค้า(j) และลูกค้า(k) แตกต่างกันทั้งหมด 4 กรณี นั่นคือ $(i \times j \times k)$ = (3x10x30) (10x30x50) (25x70x100) และ (100x300x500) โดยมีการจำลองปัญหากรณีละ 10 ตัวอย่าง

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้จากการสุ่มตัวเลขจำนวนเต็มที่มีการแจกแจงแบบยูนิฟอร์มในช่วงที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1 โดยที่ช่วง [a,b] หมายถึงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของการสุ่มตัวเลขคือ a และ b ตามลำดับ กำหนดให้ความจุของโรงงานในแต่ละกรณีนั้นสุ่มจากช่วงที่ได้จากการคำนวณดังต่อไปนี้ นำปริมาณความต้องการของลูกค้าทั้งหมดหารด้วยจำนวนโรงงาน แล้วปัดขึ้นเพื่อให้เป็นจำนวนเต็ม นั่นคือ $q = \left\lceil \sum_{k=1}^{p} D_k / m \right\rceil$ ช่วงของการสุ่มพารามิเตอร์ความจุของโรงงานคือ $[c_1 \times q\ ,\ c_2 \times q]$ ในบทความนี้กำหนดให้ $c_1 = 0.7$ และ $c_2 = 2$ เนื่องจากต้องการให้มีการผ่อนปรนค่าความจุของโรงงานแทนที่จะกำหนดให้ความจุของโรงงานมีค่า q เท่ากันหมดทุกโรงงาน ในขณะเดียวกัน การกำหนดค่าขอบเขตบนของช่วงพารามิเตอร์นั้นไม่ควรมีค่ามากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดกรณีที่ไม่มีการรับบริการจากโรงงานใดโรงงานหนึ่งได้

ตารางที่ 1 ช่วงของการสุ่มพารามิเตอร์ในปัญหากำหนดการสองระดับ

จำนวนโรงงาน x ศูนย์กระจายสินค้า x ลูกค้า $(i \times j \times k)$	**ระยะทางระหว่างโรงงานและศูนย์กระจายสินค้า (กิโลเมตร)**	**ระยะทางระหว่างศูนย์กระจายสินค้าและลูกค้า (กิโลเมตร)**	**ปริมาณความต้องการสินค้าของลูกค้า (หน่วย)**	**ความจุของศูนย์กระจายสินค้า (หน่วย)**
3x10x30	[10 , 40]	[5 , 30]	[1 , 150]	[50 , 500]
10x30x50	[10 , 60]	[5 , 50]	[1 , 200]	[500 , 1,000]
25x70x100	[30 , 150]	[10 , 100]	[1 , 300]	[500 , 1,000]
100x300x500	[30 , 400]	[20 , 300]	[1 , 500]	[700 , 1200]

ผลการทดสอบขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อก่อนหน้านี้แสดงในรูปของค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าโดยรวมจากโรงงานไปยังลูกค้าในการจำลองปัญหาขนาดต่างๆที่กำหนดข้างต้น นั่นคือ (3x10x30) (10x30x50) (25x70x100) และ (100x300x500) จำนวน 10 ตัวอย่าง ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบที่มีการใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อย และการใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามาก ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดของปัญหากำหนดการสองระดับที่ใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อย

จำนวนโรงงาน x ศูนย์กระจายสินค้า x ลูกค้า $(i \times j \times k)$	**ขอบเขตล่างของค่าใช้จ่ายโดยรวม (** LB **)**	**ขอบเขตบนของค่าใช้จ่ายโดยรวม** $(UB = \min\{UB_1, UB_2\})$	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเริ่มต้น (** $F^{(0)}$ **)**	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเมื่อพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1 (** $F^{(1)}$ **)**	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเมื่อพัฒนาคำตอบครั้งที่ 2 (** $F^{(2)}$ **)**
3x10x30	49,188.67	51,435.00	51,435.00	52,803.44	51,822.00
10x30x50	81,956.30	103,823.50	103,823.50	103,823.50	100,466.30
25x70x100	639,284.40	689,052.60	689,052.60	692,490.00	690,339.80
100x300x500	6,341,053.00	6,534,524.00	6,534,524.00	6,535,993.00	6,533,999.00

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดของปัญหากำหนดการสองระดับที่ใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามาก

จำนวนโรงงาน x ศูนย์กระจายสินค้า x ลูกค้า ($i \times j \times k$)	**ขอบเขตล่างของค่าใช้จ่ายโดยรวม** (LB)	**ขอบเขตบนของค่าใช้จ่ายโดยรวม** ($UB = \max\{UB_1, UB_2\}$)	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเริ่มต้น** ($F^{(0)}$)	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเมื่อพัฒนาคำตอบครั้งที่** 1 ($F^{(1)}$)	**ค่าใช้จ่ายโดยรวมเมื่อพัฒนาคำตอบครั้งที่** 2 ($F^{(2)}$)
3x10x30	49,188.67	55,485.56	55,485.56	54,820.89	54,820.89
10x30x50	81,956.30	108,903.80	108,903.80	107,158.90	102,024.40
25x70x100	639,284.40	702,897.40	702,897.40	712,412.80	711,523.00
100x300x500	6,341,053.00	6,677,672.00	6,677,672.00	6,748,984.00	6,748,984.00

ตัวอย่างอย่างง่ายของปัญหาการกระจายสินค้าและวิธีการพัฒนาคำตอบของกำหนดการสองระดับที่จะแสดงในบทความนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ปัญหาศูนย์กระจายสินค้าที่สร้างขึ้นมานั้นประกอบไปด้วยโรงงาน 2 แห่ง ศูนย์กระจายสินค้า 10 แห่ง และลูกค้า 10 คน ในบทความนี้ได้แสดงการพัฒนาคำตอบของกำหนดการสองระดับโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อยเท่านั้น เนื่องจากการพัฒนาคำตอบที่ใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามากนั้นสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน ปัญหาระดับบนเป็นปัญหาการกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้ามีค่าต่ำที่สุด ซึ่งระยะทางระหว่างโรงงานกับศูนย์กระจายสินค้า ความจุของการให้บริการหรือสินค้าของโรงงานได้แสดงด้วยตารางที่ 4 และปัญหาระดับล่างเป็นการหาวิธีในการกระจายสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าและเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของลูกค้าแต่ละคนมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งระยะทางระหว่างศูนย์กระจายสินค้าและลูกค้า ความต้องการสินค้า และความจุสินค้าหรือความสามารถในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่งถูกแสดงในตารางที่ 5

หลังจากใช้โปรแกรม AIMMS หาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบนและระดับล่างแล้ว พบว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน (g^*) คือ 10,816 และค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องกัน ($\tilde{f}$) คือ 7,397 ในขณะที่ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ดีที่สุดของปัญหาระดับล่าง (f^*) มีค่าเท่ากับ 1,988 และค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนที่สอดคล้อง ($\tilde{g}$) คือ 17,783 จากนั้นคำนวณค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของฟังก์ชันจุดประสงค์รวมทั้งสองระดับ จะได้ว่า $LB = f^* + g^* = 1,988 + 7,397 = 9,385$ และ $UB = \min\{18213, 19771\} = 18,213$ กำหนดให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบนและผลเฉลยของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องเป็นคำตอบเริ่มต้นของปัญหานี้ ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

ตารางที่ 4 ตัวอย่างของปัญหาระดับบนของปัญหาการกระจายสินค้า

โรงงาน/ศูนย์กระจายสินค้า	**ระยะทาง (กิโลเมตร)**										**ความจุสินค้า (หน่วย)**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	
1	12	33	46	27	39	42	29	25	16	18	**500**
2	22	31	32	32	10	15	20	37	21	17	**500**

ตารางที่ 5 ตัวอย่างของปัญหาระดับล่างของปัญหาการกระจายสินค้า

ศูนย์กระจายสินค้า/ลูกค้า	ระยะทาง (กิโลเมตร)										ความจุสินค้า (หน่วย)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	18	15	19	5	1	7	4	2	4	5	226
2	16	7	2	7	2	14	16	12	10	8	207
3	7	6	12	3	17	20	4	19	11	15	143
4	10	18	6	14	10	2	20	4	20	12	213
5	16	19	17	12	8	12	17	9	18	16	230
6	3	13	4	4	16	9	9	15	20	20	136
7	3	6	9	3	8	7	15	1	14	20	117
8	6	2	8	10	11	6	10	19	9	11	169
9	11	17	17	19	15	16	17	16	19	20	231
10	20	12	14	12	18	20	8	12	10	3	191
ความต้องการสินค้า (หน่วย)	50	133	71	61	27	146	62	127	93	57	

ตารางที่ 6 ผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน

โรงงาน/ศูนย์กระจายสินค้า	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	226	0	0	0	0	0	0	0	231	0	457
2	0	0	0	0	230	136	0	0	0	4	370
รวม	226	0	0	0	230	136	0	0	231	4	

ตารางที่ 7 ผลเฉลยของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องกับผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน

ศูนย์กระจายสินค้า/ลูกค้า	คำตอบของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	0	0	0	62	18	93	53	226
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	27	94	0	109	0	0	230
6	4	0	71	61	0	0	0	0	0	0	136
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	46	133	0	0	0	52	0	0	0	0	231
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4
รวม	50	133	71	61	27	146	62	127	93	57	

จากผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบนและระดับล่างพบว่าปัญหาทั้งสองระดับมีความต้องการที่จะเปิดศูนย์กระจายสินค้าแห่งที่ 1, 6 และ 10 เหมือนกัน ซึ่งจากคำตอบเริ่มต้นที่แสดงในตาราง 6 และ 7 จะเห็นได้ว่าศูนย์กระจายสินค้าแห่งที่ 10 มีการใช้บริการไม่เต็มความจุ ดังนั้นทำการพัฒนาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีที่ 3.1 (วิธีการพัฒนาคำตอบโดยพิจารณาแยกกันสองระดับ) ในหัวข้อที่ 3 ด้วยการปรับเปลี่ยนคำตอบให้มีการใช้บริการศูนย์กระจายสินค้าแห่งที่ 10 จนเต็มความสามารถ ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9 ซึ่งหลังจากที่ทำการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการพิจารณาแยกกันสองระดับแล้วนั้น ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนเพิ่มขึ้นจาก 10,816 เป็น 11,060 ในขณะที่ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับล่างลดลงจาก 7,397 เหลือเพียง 6,044 ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมสองระดับมีค่าเท่ากับ 17,104 บาท .

ตารางที่ 8 ผลเฉลยของปัญหาระดับบนหลังจากพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1

โรงงาน/ศูนย์กระจายสินค้า	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	226	0	0	0	0	0	0	0	44	57	**327**
2	0	0	0	0	230	136	0	0	0	134	**500**
รวม	**226**	**0**	**0**	**0**	**230**	**136**	**0**	**0**	**44**	**191**	

ตารางที่ 9 ผลเฉลยของปัญหาระดับล่างหลังจากพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1

ศูนย์กระจายสินค้า/ลูกค้า	คำตอบของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	0	0	0	61	72	93	0	**226**
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
5	0	0	0	2	27	146	0	55	0	0	**230**
6	6	0	71	59	0	0	0	0	0	0	**136**
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
9	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**44**
10	0	133	0	0	0	0	1	0	0	57	**191**
รวม	50	133	71	61	27	146	62	127	93	57	

จากนั้นทำการพัฒนาคำตอบของกำหนดการสองระดับโดยการพิจารณาควบคู่กันไปสองระดับตามขั้นตอนที่ 3.2 ในหัวข้อที่ 3 พิจารณาคำตอบของปัญหาระดับล่าง ถ้าการปรับเปลี่ยนคำตอบเพื่อให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับล่างมีค่าลดลงมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนที่มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วทำการปรับเปลี่ยนคำตอบนั้น ตารางที่ 10 และ 11 แสดงคำตอบของปัญหาระดับบนและปัญหาระดับล่างหลังทำการพัฒนาคำตอบครั้งที่สองตามลำดับ ซึ่งหลังจากที่ทำการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการพิจารณาควบคู่กันไปสองระดับแล้วนั้น ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับบนเพิ่มขึ้นจาก 11,060 เป็น 12,067 ในขณะที่ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาระดับล่างลดลงจาก 6,044 เหลือเพียง 4,714 บาท ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมสองระดับมีค่าเท่ากับ 16,781 บาท

ตารางที่ 10 ผลเฉลยของปัญหาระดับบนหลังจากพัฒนาคำตอบครั้งที่ 2

โรงงาน/ศูนย์กระจายสินค้า	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	226	0	0	0	0	0	0	133	44	0	403
2	0	0	0	0	230	136	0	0	0	58	424
รวม	226	0	0	0	230	136	0	133	44	58	

ตารางที่ 11 ผลเฉลยของปัญหาระดับล่างหลังจากพัฒนาคำตอบครั้งที่ 2

ศูนย์กระจายสินค้า/ลูกค้า	คำตอบของปัญหาระดับล่างที่สอดคล้องกับคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาระดับบน										รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	0	0	0	0	0	61	72	93	0	226
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	2	27	146	0	55	0	0	230
6	6	0	71	59	0	0	0	0	0	0	136
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	133	0	0	0	0	0	0	0	0	133
9	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	57	58
รวม	50	133	71	61	27	146	62	127	93	57	

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัญหาการกระจายสินค้าโดยการแบ่งระบบออกเป็นสองส่วน และนำเสนอปัญหาด้วยแบบจำลองกำหนดการสองระดับ โดยปัญหาระดับบนเป็นการหาวิธีการขนส่งสินค้าจากโรงงานไปยังศูนย์กระจายสินค้าและตำแหน่งที่เหมาะสมในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายของบริษัทมีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่ปัญหาระดับล่างเป็นการหาวิธีจัดสรรสินค้าให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าเพื่อให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าของลูกค้ามีค่าน้อยที่สุด บทความนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการพัฒนาคำตอบของปัญหาการกระจายสินค้าที่แบ่งระบบออกเป็นสองส่วนเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบมีค่าลดลงในขณะที่ยังสอดคล้องกับความต้องการของผู้ตัดสินใจทั้งสองฝ่าย

ผลของการพัฒนาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอในบทความนี้โดยเริ่มจากคำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อยและมากในตารางที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าหลังจากพัฒนาคำตอบของปัญหาด้วยวิธีทั้งสองวิธีแล้วนั้นการใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อยทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมทั้งระบบมีค่าน้อยกว่าการใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่ามาก จะสังเกตได้ว่าผลจากการพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1 โดยการพิจารณาจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีการเลือกใช้บริการทั้งสองฝ่ายนั้นทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งระบบมีค่ามากขึ้นกว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดการผลเฉลยเริ่มต้น เนื่องจากการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาระดับบนหรือระดับล่างเพื่อให้ค่าใช้จ่ายลดน้อยลง โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายของปัญหาอีกระดับหนึ่งนั้น อาจส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในระบบของปัญหาอีกระดับหนึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นมากกว่าค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการพัฒนาคำตอบจึงทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดของปัญหากำหนดการสองระดับมีค่าเพิ่มขึ้นในการพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1 จากตารางที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าหลังจากการพัฒนาคำตอบครั้งที่ 2 โดยการพิจารณาผลต่างของค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนคำตอบในปัญหาทั้งสองระดับไปควบคู่กันนั้นค่าใช้จ่ายโดยรวมของปัญหากำหนดการสองระดับมีค่าลดลง

จากการพัฒนาคำตอบครั้งที่ 1 เพราะการปรับเปลี่ยนคำตอบของปัญหาทั้งสองระดับในขั้นตอนนี้จะกระทำก็ต่อเมื่อผลรวมของค่าใช้จ่ายที่ลดลงในปัญหาระดับหนึ่งกับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในปัญหาอีกระดับหนึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่าการปรับเปลี่ยนคำตอบไปยังคำตอบใหม่นั้นจะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าใช้จ่ายโดยรวมของปัญหากำหนดการสองระดับมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าใช้จ่ายโดยรวมเดิมเท่านั้น

ตารางที่ 4 – 5 อธิบายตัวอย่างของปัญหาการกระจายสินค้าจากโรงงานไปยังลูกค้าโดยแบ่งระบบออกเป็นสองส่วน ซึ่งประกอบไปด้วยโรงงาน 2 แห่ง ศูนย์กระจายสินค้า 10 แห่ง และลูกค้า 10 ราย ซึ่งในบทความนี้ได้แสดงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบโดยใช้คำตอบเริ่มต้นที่มีค่าน้อยในตารางที่ 6 – 11 หลังจากทำการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีพิจารณาแยกกันสองระดับ (พัฒนาคำตอบครั้งที่ 1) พบว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์โดยรวมทั้งระบบมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น 1,109 บาทและลดลงอีก 323 บาท หลังจากพัฒนาคำตอบด้วยวิธีพิจารณาควบคู่กันสองระดับ (พัฒนาคำตอบครั้งที่ 2) ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของกำหนดการสองระดับมีค่าลดลงจากคำตอบเริ่มต้นถึง 1,432 บาท

6. เอกสารอ้างอิง

[1] H. Pikul and V. Jayaraman, “A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: Formulation and efficient heuristic solution,” *Computers & Operations research*., Vol. 25, pp. 869-878, 1998.

[2] K. S. Hindi, T. Basta and K. Pienkosz, “Efficient solution of a multi-commodity two-stage distribution problem with constraints on assignment of customers to distribution centers,” *International Transactions in Operations Research*., Vol. 5, pp. 519-528, 1998.

[3] V. Jayaraman and A. Ross, “A simulated annealing methodology to distribution network design and management,” *European Journal of Operational research*., Vol. 144, pp. 629-645, 2003.

[4] A. M. Geoffrion and G. W. Graves, “Multicommodity distribution system design by benders decomposition,” *Management Science*., Vol. 20, pp. 822-844, 1974.

[5] H. L. Young and G. K. Soon, “The hybrid planning algorithm for the distribution center operation using tabu search and decomposed optimization,” *Expert systems with applications*., Vol. 37, pp. 3094-3103, 2010.

[6] R. G. Jeroslow, “The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis,” *Mathematical Programming*., Vol. 32, pp. 146-164, 1985.

[7] W. F. Bialas and M. H. Karwan, “Two-level linear programming,” *Management science*., Vol. 30, pp. 1004-1020, 1984.

[8] B. Colson, P. Marcotte and G. Savard, “Bilevel programming: A survey,” *A Quarterly Journal of Operations Research*., Vol. 3, pp. 87-107, 2005.

[9] B. Huang and N. Liu, “Bilevel programming approach to optimizing a logistic distribution network with balancing requirements,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*., No. 1894, pp. 188–197, 2004.

[10] S. Huijun, G. Ziyou and W. Jianjun, “A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers,” *Applied Mathematical Modeling*., Vol. 32, pp. 610-616, 2008.

[11] H. I. Calvete, C. Gale and M. J. Oliveros, “Bilevel model for production-distribution planning solved by using ant colony optimization,” *Computers & Operations Research*., Vol. 38, pp. 320-327, 2011.

[12] J. F. Camacho-Vallejo, A. Edvardo-Franco and R. G. Gonzalez-Ramire, "Solving the bilevel facility location problem under preferences by a Stackelberg-Evolutionary algorithm," *Mathematical problems in Engineering*., Vol. 2014, Article ID 430243, 14 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2014/430243, 2014.

[13] สุภาลิน ศรัณย์วงศ์ และ จูลิน ลิคะสิริ. "ขั้นตอนการหาวิธีสำหรับปัญหาการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าโดยการแบ่งระบบออกเป็นสองระดับ," *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*., ปีที่ 1 (ฉบับที่ 2), หน้า 24-38, 2556.