

ฮิวริสติกสำหรับปัญหาตำแหน่ง ที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบพลวัต โดยมีข้อจำกัดด้านขนาด

วัลลภ รัตนถาวร และ สีรภ ปริชานนท์*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

E-mail : boy_wallop@hotmail.com, seeronk.p@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหาที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบพลวัตที่มีข้อจำกัดด้านขนาดนั้นจัดเป็นปัญหาในกลุ่มเอ็นพีฮาร์ด (NP-hard) ของการออกแบบระบบโลจิสติกส์และระบบการกระจายสินค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าใช้จ่ายรวมของการสนองตอบต่อความต้องการของลูกค้าตลอดช่วงเวลาการวางแผนมีค่าน้อยที่สุด ด้วยการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมในตำแหน่งที่มีศักยภาพ โดยในส่วนของความต้องการของลูกค้านั้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาความต้องการของลูกค้าว่ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและเป็นฟังก์ชันของเวลา อีกทั้งเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง ลูกค้าแต่ละรายจะสามารถรับบริการจากศูนย์กระจายสินค้าได้เพียงแห่งเดียวเท่านั้น โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาโดยอยู่บนพื้นฐานของวิธีฮิวริสติกการค้นหาแบบทาบ โดยใช่วิธีการประมาณเขตข้างเคียงแทนวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งมีข้อดี คือ สามารถลดระยะเวลาในการหาคำตอบเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้กำหนดให้ศูนย์กระจายสินค้าแห่งใดที่เปิดให้บริการแล้วไม่สามารถที่จะย้ายตำแหน่งหรือปิดลงภายหลังได้ซึ่งมีเหตุผลมาจากต้นทุนค่าก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่งนั้นต้องใช้งบลงทุนจำนวนมากและระยะเวลาในการก่อสร้างใช้เวลานานจึงไม่เหมาะสมที่จะย้ายตำแหน่งบ่อยๆ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีพันธุกรรมซึ่งเป็นฮิวริสติกเปรียบเทียบ พบว่าขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพดีโดยผลเฉลยส่วนใหญ่จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดและใช้ระยะเวลาการคำนวณน้อยกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมมาก

คำสืบค้น

ปัญหาดำเนินที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบพลวัต การค้นหาแบบทาบ ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

HEURISTICS for DYNAMIC CAPACITATED FACILITY LOCATION PROBLEMS

Wallop Ratanathavorn and Seerong Prichanont*

Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, Thailand 10330
E-mail : boy_wallop@hotmail.com, seerong.p@chula.ac.th*

ABSTRACT

Dynamic capacitated facility location is one of the NP-hard combinatorial optimization problems in logistics and distribution system design. The objective of this problem is to minimize the total cost for satisfying customer demands over the whole planning horizon by choosing service facilities among all possible locations subject to limited capacity constraint. The demands in this paper are considered to be changing over time or time-dependent demand, moreover, for practical setting each customer demand can be supplied from only one service facility. In this paper, a heuristic-based algorithm, Tabu Search, is proposed by using approximate neighborhood evaluation since it is an effective way to reduce computational time when the size of problem is large. In addition, since building a new facility requires a large amount of capital and is time consuming, the relocation of any opened facilities is not allowed over the planning horizon. Computational results of Tabu Search heuristic are compared with Genetic Algorithms (GA). The results show that the algorithm is very efficient, the solutions in most cases are optimal or near-optimal with reasonable computational time compared to GA

KEYWORDS

dynamic facility location problem, tabu search, genetic algorithms

I. บทนำ

ปัญหาตำแหน่งที่ตั้ง (facility location problems) เป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งของระบบโลจิสติกส์และระบบห่วงโซ่อุปทาน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น การจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าเพื่อให้ค่าใช้จ่ายรวมในการขนส่งสินค้าต่ำที่สุด การหาที่ตั้งสถานที่เก็บวัตถุดิบทรายเพื่อให้อยู่ห่างจากแหล่งชุมชนมากที่สุด หรือการจัดตั้งศูนย์กู้ชีพฉุกเฉินเพื่อให้ระยะเวลาสูงสุดของการสนองตอบต่อสถานการณ์ฉุกเฉินต่ำที่สุด ซึ่ง Owen and Daskin [1] ได้จำแนกลักษณะของปัญหาตำแหน่งที่ตั้งตามลักษณะของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ออกเป็น 3 ประเภท คือ ปัญหาปกคลุม (covering problems) ปัญหาระยะทางเฉลี่ย (average distance problems) และปัญหาศูนย์กลาง (center problems) ซึ่งปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในประเภทหนึ่งของปัญหาระยะทางเฉลี่ย และมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมรวมทั้งจัดสรรความรับผิดชอบในการให้บริการ (location-allocation) กับลูกค้าโดยใช้ต้นทุนรวมในการสนองตอบต่อความต้องการของลูกค้ามีค่าต่ำที่สุดตามเงื่อนไขและข้อจำกัดของปัญหา

ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบระยะทางเฉลี่ยถูกเสนอครั้งแรกในปี 1964 โดย Hakimi [2] มีชื่อว่า P-median problem แต่ต่อมาพบว่าปัญหาของ Hakimi ยังมีจุดด้อยที่ไม่ได้พิจารณาต้นทุนคงที่ในการสร้างศูนย์กระจายสินค้าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งหากทำการเพิ่มต้นทุนคงที่ในการสร้างศูนย์กระจายสินค้าเข้าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Cornuéjols et. al. [3]) ปัญหา P-median problem จะเปลี่ยนเป็นปัญหา uncapacitated facility location problem (UFLP) ซึ่งจำนวนศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมจะถูกกำหนดโดยต้นทุนรวมทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยต้นทุนคงที่ในการสร้างและต้นทุนค่าขนส่งแทนการกำหนดมาล่วงหน้าดังเช่นปัญหาของ Hakimi โดยหากทำการเพิ่มเงื่อนไขบังคับด้านขนาดของศูนย์กระจายสินค้า (capacity) เพิ่มเติม ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งนี้จะมีชื่อว่า capacitated facility location problem (CFLP) ซึ่งปัญหาจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

ในสภาวะการแข่งขันทางธุรกิจที่มีแนวโน้มจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น อีกทั้งปัจจัยต่างๆยังเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น ทำให้นักวิจัยด้านปัญหาตำแหน่งที่ตั้งในอดีตที่ผ่านมาซึ่งพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆของปัญหาเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลานั้น อาจจะให้คำตอบที่ไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเสมอไป งานวิจัยในปัจจุบันได้พิจารณาความสำคัญของเวลาต่อปัญหามากขึ้น โดย Current Ratick and Revelle [4] ได้ให้คำจำกัดความของปัญหาตำแหน่งที่ตั้งลักษณะนี้หรือปัญหาแบบพลวัตไว้ว่า เป็นปัญหาตำแหน่งที่ตั้งที่พารามิเตอร์ต่างๆมีความสัมพันธ์กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และความสำคัญของเวลานี้จะต้องถูกนำมาพิจารณาด้วย ซึ่งพารามิเตอร์ที่มักจะนำเวลามาร่วมในการพิจารณา คือ ความต้องการของลูกค้าเวลาในการขนส่ง (travel time) หรือต้นทุนในการขนส่ง (travel cost) เป็นต้น ซึ่ง Ballou [5] ได้เสนองานวิจัยเพื่อแก้ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า 1 แห่งแบบพลวัตขึ้นโดยการใช้วิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (dynamic programming) แบบคำนวณย้อนกลับในการหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมที่สุดตลอดระยะเวลาการวางแผนขึ้นเป็นครั้งแรก แต่ต่อมา Sweeney and Tatham [6] ได้แย้งว่าแนวคิดการแก้ปัญหาที่เสนอโดย Ballou นั้นจะให้คำตอบที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดย่อย (sub-optimal) เนื่องจากเซตคำตอบในแต่ละช่วงเวลาถูกจำกัดเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุดอันดับแรกเท่านั้น จึงได้เสนอให้เพิ่มการพิจารณาเซตคำตอบในแต่ละช่วงเวลาเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจำนวน R_i อันดับแทนและพบว่าคุณภาพของคำตอบที่ดีขึ้นสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนศูนย์กระจายสินค้าอาจมีจำนวนได้มากกว่า 1 แห่งซึ่ง Wesolowsky and Truscott [7] และ Drezner [8] ได้เสนอปัญหาแบบพลวัตซึ่งมีพื้นฐานมาจากปัญหา P-median problem ขึ้นโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีไดนามิกโปรแกรมมิ่งและวิธีหาคำตอบที่ดีที่สุดตามลำดับ ส่วนปัญหาแบบพลวัต

ที่มีพื้นฐานมาจากปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบไม่มีข้อจำกัดด้านขนาดนั้น Van Roy and Erlenkotter [9] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและใช้วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีลาดขึ้นของปัญหาคู่ (dual-ascent method) และวิธีการแตกกิ่งสาขา (branch and bound method) ในการหาคำตอบ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีสถิติสำหรับปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบพลวัตโดยมีข้อจำกัดด้านขนาดและต้นทุนคงที่ โดยเนื้อหาของงานวิจัยนี้ในส่วนแรกประกอบไปด้วยการอธิบายถึงลักษณะของปัญหาข้อจำกัดต่างๆ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาที่สร้างขึ้น ส่วนที่สองเป็นการอธิบายถึงวิธีการค้นหาแบบทาบซึ่งเป็นวิธีสถิติที่พัฒนาขึ้นสำหรับการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ ส่วนที่สามเป็นการทดสอบสมรรถนะของวิธีสถิติที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีพันธุกรรมโดยใช้ตัววัดสมรรถนะด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาในการหาคำตอบในการวัดสมรรถนะ และในส่วนสุดท้ายเป็นการสรุปและเสนอข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยด้านปัญหาตำแหน่งที่ตั้งในอนาคต

II. ลักษณะของปัญหาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้าแบบพลวัตเมื่อมีข้อจำกัดด้านความสามารถสูงสุดในการให้บริการนั้นจัดเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นกว่าปัญหาตำแหน่งที่ตั้งทั่วไป โดยมีลักษณะคล้ายกับการแก้ปัญหาแบบสถิติจำนวนหลายๆ ปัญหา (คาบเวลา) โดยแต่ละปัญหามีเงื่อนไขข้อจำกัดมาเพื่อบังคับให้แต่ละปัญหามีความเชื่อมโยงกัน และมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการกำหนดตำแหน่งที่ตั้ง เวลาที่เหมาะสมในการสร้างศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่ง และจำนวนของศูนย์กระจายสินค้าในแต่ละคาบเวลาอยู่ในระยะเวลาการวางแผน โดยใช้ต้นทุนรวมทั้งหมดทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนค่าขนส่งในการสนองตอบความต้องการของลูกค้าที่มีค่าต่ำที่สุด และเพื่อให้สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงในธุรกิจในงานวิจัยนี้จะไม่อนุญาตให้ศูนย์กระจายสินค้าที่ได้สร้างขึ้นแล้วในคาบเวลาก่อนหน้าถูกปิดหรือย้ายไปยังตำแหน่งอื่นได้ และลูกค้าสามารถรับบริการจากศูนย์กระจายสินค้าเพียงแห่งใดแห่งหนึ่งเท่านั้นไม่สามารถแบ่งความต้องการสินค้าของลูกค้าคนนั้นได้

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้ ในส่วนของฟังก์ชันความต้องการของลูกค้ามีแนวคิดมาจากสมการคณิตศาสตร์ของ Drezner [8] โดยกำหนดให้เซต I คือเซตของลูกค้าทั้งหมดมีดัชนีคือ i ซึ่ง $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$ J คือเซตของศูนย์กระจายสินค้าทั้งหมดมีดัชนีคือ j ซึ่ง $j \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$ และ T คือเซตของคาบเวลาอยู่ทั้งหมดในระยะเวลาการวางแผนมีดัชนีคือ k ซึ่ง $k \in \{1, 2, 3, \dots, P\}$ โดยในการสร้างแบบจำลองของปัญหาจะมีการกำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

f_j	ต้นทุนคงที่ในการสร้างศูนย์กระจายสินค้า j
d_{ij}	ระยะทางระหว่างลูกค้า i กับตำแหน่งศูนย์กระจายสินค้า j
w_{ik}	ความต้องการของลูกค้า i ในคาบเวลาที่ k
c	ต้นทุนค่าขนส่งต่อหน่วยระยะทาง • ความต้องการ
s_{jk}	ความสามารถสูงสุดในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้า j ในคาบเวลาที่ k
a_j	ต้นทุนการดำเนินงานต่อคาบเวลาของศูนย์กระจายสินค้า j
X_{ijk}	ตัวแปรทวิภาคเมื่อส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้า j ไปยังลูกค้า i ในคาบเวลาที่ k
Y_{jk}	ตัวแปรทวิภาคเมื่อศูนย์กระจายสินค้า j เปิดให้บริการในคาบเวลาที่ k
Y_j	ตัวแปรทวิภาคเมื่อมีการสร้างศูนย์กระจายสินค้า j ในคาบเวลาใดๆ

ในการนิยามฟังก์ชันความต้องการซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลานั้น จะกำหนดให้ w_{ik} คือความต้องการของลูกค้า i ในคาบเวลาที่ k และคาบเวลาที่ k นี้เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ $[t_a, t_b]$ ในระยะเวลาการวางแผนโดยสามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$w_{ik} = \int_{t_a}^{t_b} w_i(t) dt \quad (1)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize} \quad F = \sum_{j=1}^m f_j Y_j + \sum_{k=1}^P \sum_{j=1}^m a_j Y_{jk} + \sum_{k=1}^P \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c^* w_{ik} * (d_{ij} * X_{ijk}) \quad (2)$$

$$\text{subject to;} \quad \sum_{j=1}^m X_{ijk} = 1 \quad ; \quad \forall i, \forall k \quad (3)$$

$$Y_{jk} - Y_{j,k+1} \leq 1 \quad ; \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, P-1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ik} X_{ijk} \leq s_{jk} \quad ; \quad \forall j, \forall k \quad (5)$$

$$X_{ijk} - Y_{jk} \leq 0 \quad ; \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6)$$

$$Y_{jk} \leq Y_j \quad ; \quad \forall j, \forall k \quad (7)$$

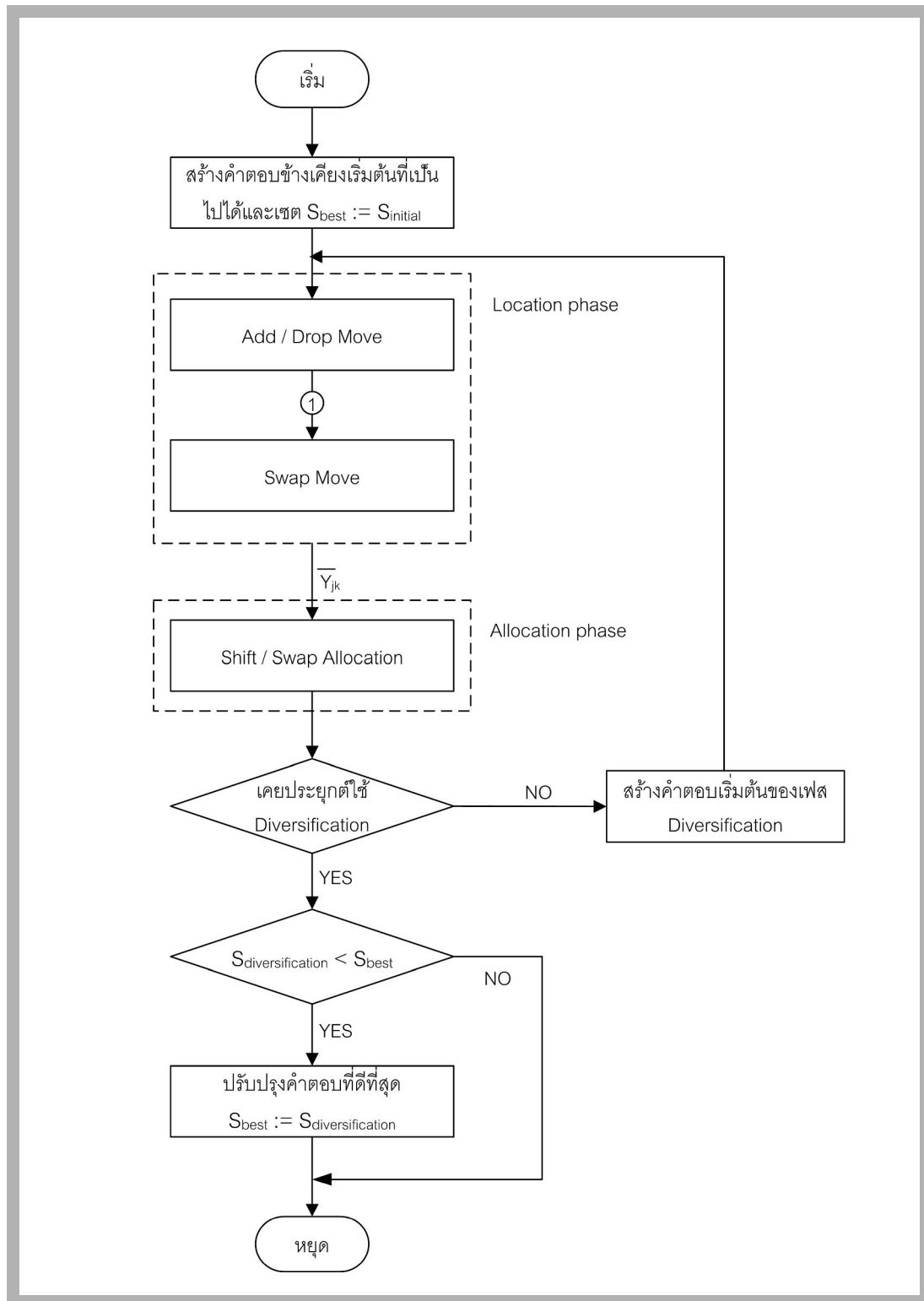
$$X_{ijk}, Y_j, Y_{jk} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งแบบพลวัตนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการตัดสินใจหาตำแหน่งที่ตั้งของของศูนย์กระจายสินค้าที่เหมาะสมเพื่อให้ต้นทุนรวมในการสนองตอบความต้องการของลูกค้ามีค่าต่ำที่สุด โดยสมการ (2) แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหานี้ ซึ่งพจน์แรกแสดงถึงต้นทุนคงที่รวมในการก่อสร้างศูนย์กระจายสินค้าทั้งหมด พจน์ที่สองแสดงถึงต้นทุนการดำเนินงานรวม และพจน์ที่สามแสดงถึงต้นทุนค่าขนส่งรวมทั้งหมดตลอดระยะเวลาการวางแผน โดยมีเงื่อนไขบังคับ (3) ซึ่งกำหนดให้ลูกค้ารับบริการจากศูนย์กระจายได้เพียงแห่งเดียว (single source) เงื่อนไขบังคับ (4) เพื่อกำหนดให้ศูนย์กระจายสินค้าใดที่เปิดให้บริการแล้วไม่สามารถที่จะปิดหรือย้ายตำแหน่งได้ เงื่อนไขบังคับ (5) เป็นเงื่อนไขบังคับเพื่อกำหนดสามารถสูงสุด (maximum capacity) ในการให้บริการของแต่ละศูนย์กระจายสินค้า เงื่อนไขบังคับ (6) เพื่อกำหนดให้ลูกค้ารับการบริการจากศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดให้บริการเท่านั้น เงื่อนไขบังคับ (7) เพื่อใช้ในการคำนวณต้นทุนคงที่ในการก่อสร้างซึ่งเป็นต้นทุนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น และเงื่อนไขบังคับ (8) เป็นการระบุชนิดของตัวแปรว่าเป็นตัวแปรทวิภาค

III. การค้นหาแบบทาบู

การค้นหาแบบทาบู (Glover [10], [11]) เป็นเทคนิคการหาคำตอบซึ่งได้รับการพัฒนามาจากวิธีการค้นหาเฉพาะที่ (local search) เพื่อแก้ไขจุดอ่อนของวิธีการค้นหาเฉพาะที่ซึ่งมักจะไม่สามารถเคลื่อนที่ให้หลุดพ้นจากจุดที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (local optima) ไปได้ โดยการค้นหาแบบทาบูจะใช้เทคนิคการเคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบข้างเคียงเช่นเดียวกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่ แต่ทำการเพิ่มหน่วยความจำยืดหยุ่น (flexible memory) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแทนทางในกระบวนการค้นหาซึ่งมี 2 ชนิด คือ หน่วยความจำระยะสั้น ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดการค้นหาคำตอบซ้ำในบริเวณที่ได้ทำการค้นหาไปแล้วโดยการบันทึกไว้ในรายการข้อห้าม (tabu list) และหน่วยความจำระยะยาวซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความหลากหลายของบริเวณในการค้นหาคำตอบทำให้คุณภาพของคำตอบดีขึ้น

ในกรณีที่คำตอบข้างเคียงของการค้นหาแบบทวนอยู่ในรายการข้อห้าม ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไปยังคำตอบข้างเคียงนั้นได้จะมีการกำหนดเกณฑ์ Aspiration criteria เพื่อละเว้นรายการข้อห้ามนั้นและยินยอมให้เคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบในรายการข้อห้ามได้ ซึ่งทำให้การค้นหาคำตอบดำเนินต่อไปได้ และในงานวิจัยนี้ยังได้ใช้เทคนิคการค้นหาคำตอบโดยเพิ่มความหลากหลาย (diversification) เพื่อเพิ่มบริเวณในการหาคำตอบในจุดที่ไม่ได้ทำการค้นหาคำตอบมากนัก โดยขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบทวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 1
ขั้นตอนวิธีการค้นหา
แบบทวน โดยแบ่งเป็น
2 เฟส

3.1 หลักการในกระบวนการค้นหาคำตอบ (Searching Process)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาซึ่งได้แสดงในหัวข้อ II นั้นในแต่ละวงรอบ (iteration) ของการค้นหาคำตอบถ้าทราบคุณลักษณะของศูนย์กระจายสินค้าว่าตลอดระยะเวลาการวางแผนนั้น มีศูนย์กระจายสินค้าใดเปิดให้บริการแล้ว ปัญหาใหญ่ที่พิจารณาจะลดรูปของปัญหาลงเหลือเป็นปัญหาการจัดทั่วไป (generalized assignment problem) ซึ่งทำให้ปัญหาที่พิจารณาลดความซับซ้อนในการหาคำตอบลงไป จากแนวคิดข้างต้นจึงสามารถแบ่งปัญหาใหญ่ออกเป็นปัญหาย่อยสองส่วน คือ ส่วนปัญหาคำตำแหน่งที่ตั้ง (location phase) และส่วนปัญหาการจัดสรร (allocation phase) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาลดรูปแสดงไว้ในสมการ (9)

ในกระบวนการค้นหาคำตอบถ้าทำการกำหนดตัวแปรตำแหน่ง (location variable) Y_{jk} ให้เป็นตัวแปรทวิภาคคงที่ใดๆ จะทำให้ปัญหาที่พิจารณาในหัวข้อ II นั้นกลายเป็นปัญหาลดรูป $F(\bar{Y}_{jk})$ เมื่อ $\bar{Y}_{jk}$ คือเซตของตัวแปร Y_{jk} ทั้งหมด และทำให้ปัญหาลดความซับซ้อนลงเหลือเฉพาะการแก้ปัญหาการจัดทั่วไปซึ่งเฟสตำแหน่งที่ตั้งแสดงในรูปที่ 1 เป็นส่วนที่ทำการหาเซตของตัวแปรตำแหน่ง $\bar{Y}_{jk}$ ที่เหมาะสมและเฟสการจัดสรรซึ่งทำการแก้ปัญหาการจัดทั่วไปของปัญหาลดรูป ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาลดรูปเมื่อกำหนดค่า $\bar{Y}_{jk}$ ใดๆ ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } F(\bar{Y}_{jk}) = \sum_{k=1}^P \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c^* w_{ik} (d_{ij} * X_{ijk}) \quad (9)$$

$$\text{subject to; } \sum_{j=1}^m X_{ijk} = 1 \quad ; \forall i \in I, \forall k \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ik} X_{ijk} \leq s_{jk} \quad ; \forall j \in J, \forall k \in T \quad (11)$$

$$X_{ijk} \leq Y_{jk} \quad ; \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in T \quad (12)$$

$$X_{ijk}, Y_{jk} \in \{0,1\} \quad (13)$$

เมื่อ $F(\bar{Y}_{jk})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาลดรูปเมื่อกำหนดตัวแปรตำแหน่งให้เป็นค่า $\bar{Y}_{jk}$
 $\bar{Y}_{jk}$ คือ เซตของตัวแปรทวิภาค Y_{jk} ทั้งหมด

ในส่วนต่อไปเป็นการอธิบายขั้นตอนต่างๆของฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการเริ่มต้น (initialization) ซึ่งใช้ฮิวริสติก GRASP ของ Feo and Resende [12] ในการสร้างคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้ (initial feasible solution) เพื่อนำไปใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นในส่วนที่สองซึ่งเป็นฮิวริสติกหลัก (main heuristic) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้การค้นหาแบบทาคูเป็นฮิวริสติกหลักในการหาคำตอบของปัญหา

3.2 กระบวนการเริ่มต้น (Initialization)

กระบวนการเริ่มต้นเป็นการสร้างคำตอบตั้งต้นของปัญหาที่พิจารณา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคำตอบสุดท้ายที่ได้รับจากฮิวริสติก ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการ GRASP หรือ Greedy Randomized Adaptive Search Procedures ของ Feo and Resende [12] และ Delmaire et al. [13] โดยตั้งสมมติฐานว่าการตัดสินใจในการจัดตั้งศูนย์กระจายสินค้าจะกระทำ ณ ขณะเวลาเริ่มต้นเพียงครั้งเดียวเท่านั้นและคงสถานะเช่นนั้นเรื่อยไปจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการวางแผน โดยขั้นตอนต่างๆของกระบวนการเริ่มต้นมีดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 คำนวณต้นทุนค่าขนส่ง (h_{ij}) ของแต่ละศูนย์กระจายสินค้าที่ยังไม่ได้เปิดให้บริการกับลูกค้าแต่ละรายที่ยังไม่ได้รับการบริการจากศูนย์กระจายสินค้าใดเลย หลังจากนั้นทำการเรียงลำดับค่า h_{ij} ของแต่ละศูนย์กระจายสินค้าจากน้อยไปหามาก
- ขั้นตอนที่ 2 สำหรับแต่ละศูนย์กระจายสินค้าให้ทดลองจัดลูกค้าที่ยังไม่ได้รับการเข้ากับศูนย์กระจายสินค้านั้น โดยจัดตามลำดับจากค่า h_{ij} ที่น้อยที่สุดก่อน และทดลองจัดจนกระทั่งความจุของศูนย์กระจายสินค้านั้นเต็ม แล้วจึงทำการคำนวณค่าของฟังก์ชันกริดดี φ_j ของแต่ละศูนย์กระจายสินค้าจนครบทุกศูนย์กระจายสินค้า
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการสุ่มเลือกศูนย์กระจายสินค้าที่จะเปิดให้บริการ โดยเลือกจากศูนย์กระจายสินค้าที่มีค่า φ_j ไม่เกินขอบเขตบนซึ่งเท่ากับ $\beta\varphi_{\max}$ เมื่อ β คือค่าคงที่ซึ่งน้อยกว่า 1 และ $\varphi_{\max}$ คือค่าสูงสุดของฟังก์ชันกริดดี
- ขั้นตอนที่ 4 อัปเดตเซตของศูนย์กระจายสินค้าที่ยังไม่ได้ถูกเลือกให้เปิดบริการ และเซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับการบริการจากศูนย์กระจายสินค้าใดเลย โดยหากยังมีลูกค้าที่ยังไม่ได้รับการบริการอยู่ให้เริ่มขั้นตอนที่ 1 ใหม่ แต่หากลูกค้าทุกรายได้รับการบริการแล้วก็จะสิ้นสุดกระบวนการเริ่มต้น

โดยฟังก์ชันกริดดีของแต่ละศูนย์กระจายสินค้าที่ยังไม่ได้เปิดให้บริการสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\varphi_j = \frac{f_j + (P^* a_j) + \sum_{i \in A_j} h_{ij}}{|A_j|} \quad (14)$$

เมื่อ A_j คือ เซตของลูกค้าที่ทดลองจัดให้ได้รับการบริการจากศูนย์กระจายสินค้า j

P คือ ระยะเวลาการวางแผน

3.3 คำตอบข้างเคียงและการประเมิน (Neighborhood and Evaluation)

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาใหญ่ออกเป็นปัญหาย่อย 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1 และหัวข้อ 3.1 ซึ่งการหาคำตอบของวิธีการค้นหาแบบทานู้นจะใช้การเคลื่อนคำตอบ (move) จากคำตอบที่ดีที่สุดปัจจุบันไปยังคำตอบข้างเคียงอีกคำตอบหนึ่งซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่า โดยการเลือกที่จะเคลื่อนคำตอบจากคำตอบปัจจุบันไปยังคำตอบใดนั้น จะมีการประเมินคำตอบข้างเคียงว่าควรที่จะเลือกเคลื่อนคำตอบไปยังจุดใดที่มีการพัฒนาคุณภาพของคำตอบที่ดีที่สุดและทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งสิ้นสุดขั้นตอนวิธี ซึ่งคำตอบข้างเคียงและการเคลื่อนคำตอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ คำตอบข้างเคียงของเฟสดำแหน่งที่ตั้ง และคำตอบข้างเคียงของเฟสการจัดสรร

3.3.1 คำตอบข้างเคียงของเฟสดำแหน่งที่ตั้ง

(Location Phase Neighborhood)

สำหรับเฟสดำแหน่งที่ตั้งจะใช้วิธีการเคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบข้างเคียง 3 ประเภท คือ การเคลื่อนโดยการเพิ่มศูนย์กระจายสินค้า (add move) การเคลื่อนโดยการลดศูนย์กระจายสินค้า (drop move) และการเคลื่อนโดยการสับเปลี่ยนศูนย์กระจายสินค้า (swap move) ซึ่งในการประเมินคำตอบข้างเคียงของการเคลื่อนคำตอบทั้งสามชนิดนั้นจะใช้วิธีการประมาณตามหลักของ Jacobsen [14] ซึ่งจะประมาณคำตอบข้างเคียงโดยใช้ต้นทุนรวมที่เปลี่ยนแปลงไปจากปัจจุบันแทนการหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งจะต้องแก้ปัญหาคำจัดทั่วไป คือ ปัญหาลดรูป $F(\bar{Y}_k)$ ทุกครั้งเมื่อมีการเคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบอื่นโดย

กำหนดให้ S คือ คำตอบปัจจุบันของปัญหาซึ่งประกอบด้วยเซตของศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดให้บริการ J_{open} ซึ่งเท่ากับ $\{J_{open,1}, J_{open,2}, \dots, J_{open,k}\}$ และเซตของศูนย์กระจายสินค้าที่ไม่เปิดให้บริการ J_{close} ซึ่งเท่ากับ $\{J_{close,1}, J_{close,2}, \dots, J_{close,k}\}$ เมื่อ k คือ คาบเวลาย่อย และกำหนดให้ I คือ เซตของลูกค้าทั้งหมดโดยที่เซต I_{jk} แทนเซตของลูกค้าซึ่งถูกจัดสรรให้รับบริการจากศูนย์กระจายสินค้า j ในคาบเวลาที่ k และหากศูนย์กระจายสินค้า j ไม่ได้เปิดให้บริการในคาบเวลาที่ k เซต $I_{jk} = \phi$ ซึ่งการสร้างคำตอบข้างเคียงของคำตอบปัจจุบัน S และการเคลื่อนคำตอบจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของการเคลื่อนคำตอบแต่ละชนิด

3.3.1.1 การเคลื่อนโดยการเพิ่มศูนย์กระจายสินค้า (Add Move)

คำตอบข้างเคียงของการเคลื่อนโดยการเพิ่มจำนวนศูนย์กระจายสินค้านั้น คือ การเปลี่ยนสถานะของศูนย์กระจายสินค้า j' ใดๆในเซต $J_{close,k}$ จาก $Y_{j'k} = 0$ เป็น $Y_{j'k} = 1$ ซึ่งหมายถึงศูนย์กระจายสินค้า $j' \in J_{close,k}$ จะเปิดให้บริการเพิ่มขึ้นจากศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดอยู่แล้วในคำตอบปัจจุบัน S โดยจะเปิดให้บริการตั้งแต่คาบเวลา k เป็นต้นไปจนถึงสิ้นสุดระยะเวลาการวางแผน (ตามเงื่อนไขบังคับ (4)) ซึ่งคำตอบข้างเคียง $N(S)_{add}$ เมื่อ r คือ คาบเวลาแรกที่ศูนย์กระจายสินค้า j' เปิดให้บริการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$N(S)_{add} = \{J'_{open,k} \mid (J'_{open,k} = J_{open,k}, k < r) \vee (J'_{open,k} = J_{open,k} \cup \{j'\}, k \geq r)\} \quad (15)$$

ปัญหาที่พิจารณาเป็นปัญหาที่มีหลายคาบเวลาจึงต้องทำการประมาณต้นทุนรวมที่เปลี่ยนไป ΔZ_k ที่ละคาบเวลาซึ่งหลักการประมาณของ Jacobsen นั้นจะทำการย้ายลูกค้าบางตัว $i \in I$ ซึ่งปัจจุบันรับบริการจากศูนย์กระจายสินค้า j ใดๆในเซต $J_{open,k}$ ไปยังศูนย์กระจายสินค้าแห่งใหม่ j' ถ้าต้นทุนค่าขนส่งของลูกค้า i กับศูนย์กระจายสินค้าแห่งใหม่ซึ่งแทนด้วย $h_{ij'k}$ ต่ำกว่าต้นทุนค่าขนส่งปัจจุบันของลูกค้า i ซึ่งแทนด้วย h_{ik} โดยฟังก์ชันการประมาณของคำตอบข้างเคียง $N(S)_{add}$ เป็นดังนี้

$$\text{Minimize} \quad \Delta Z_k = \sum_{i \in I} (h_{ij'k} - h_{ik}) x_{ij'} \quad (16)$$

$$\text{subject to;} \quad \sum_{i=1}^n w_{ik} x_{ij'} \leq s_{j'k} \quad (17)$$

โดยที่ $x_{ij'} = 1$ เมื่อลูกค้า i ย้ายไปยังศูนย์กระจายสินค้าแห่งใหม่ j' ในคาบเวลา k นั้นๆ โดยมีเงื่อนไขบังคับ (17) กำหนดความสามารถสูงสุดในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้า j' และต้นทุนรวมทั้งหมดที่เปลี่ยนไปมีค่าเท่ากับ $\Delta Z = f_j + \Delta Annual_j + \sum_{k=1}^P \Delta Z_k$ ซึ่งหากมีค่าน้อยกว่า 0 แสดงว่าคำตอบข้างเคียงนี้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน ซึ่ง $\Delta Annual_j$ คือ ต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงของศูนย์กระจายสินค้า j'

3.3.1.2 การเคลื่อนโดยการลดศูนย์กระจายสินค้า (Drop Move)

การเคลื่อนโดยการลดศูนย์กระจายสินค้านั้นในบางครั้งหากศูนย์กระจายสินค้า $j' \in J_{open,k}$ ที่ถูกเลือกให้ปิดบริการลงทำให้ความสามารถในการให้บริการรวมของทุกศูนย์กระจายสินค้านั้นมีค่าน้อยกว่าความต้องการรวมทั้งหมดของลูกค้า จะทำให้คำตอบข้างเคียงนั้นกลายเป็นคำตอบที่เป็นไป

ไม่ได้ ดังนั้นในการสร้างคำตอบข้างเคียง $N(S)_{drop}$ ต้องคำนึงถึงความสามารถในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้าที่เหลือยู่หรือ s_{jk_slag} กับความต้องการรวมของลูกค้าด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับด้านความสามารถในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้าโดยคิดเป็นค่าปรับของการละเมิดแทน ซึ่งฟังก์ชันค่าปรับสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho_k = \sum_{j \in J_{open,k} - \{j'\}} \rho(s_{jk_slag} - \sum_{i \in I_{j'k}} w_{ik} x_{ij}) \quad (18)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าปรับต่อหน่วยความต้องการเมื่อมีการละเมิดเงื่อนไขบังคับ

เมื่อศูนย์กระจายสินค้า j' ถูกเลือกให้ปิดบริการลูกค้า i ซึ่งปัจจุบันรับบริการจากศูนย์กระจายสินค้า นี้จะถูกย้ายไปยังศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดอยู่ในเซต $J_{open,k} - \{j'\}$ ที่มีความสามารถในการให้บริการเหลือยู่เท่ากับ s_{jk_slag} โดยเลือกว่าลูกค้าสมควรจะย้ายไปอยู่กับศูนย์กระจายสินค้าใดนั้นจะเป็นไปตามฟังก์ชันต่อไปนี้

$$\text{Minimize} \quad \Delta Z_k = \sum_{i \in I_{j'k}} \sum_{j \in J_{open,k} - \{j'\}} (h_{ijk} - h_{ij'k}) * x_{ij} + \rho_k \quad (18)$$

$$\text{subject to;} \quad \sum_{j \in J_{open,k} - \{j'\}} x_{ij} = 1 \quad ; \quad \forall i \in I_{j'k} \quad (19)$$

การจะเคลื่อนคำตอบไปยังจุดใดนั้นจะพิจารณาจากต้นทุนรวมทั้งหมดที่เปลี่ยนไป ΔZ เช่นเดียวกับการเคลื่อนโดยการเพิ่มศูนย์กระจายสินค้าซึ่ง $\Delta Z = \sum_{k=1}^P \Delta Z_k - f_{j'} - \Delta Annual_{j'}$ เมื่อ $\Delta Annual_{j'}$ คือ ต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงของศูนย์กระจายสินค้า j'

3.3.1.3 การเคลื่อนโดยการสับเปลี่ยนศูนย์กระจายสินค้า (Swap Move)

ในการเคลื่อนคำตอบโดยการสับเปลี่ยนนั้น จำนวนของศูนย์กระจายสินค้าในแต่ละคาบเวลาจะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แต่จะทำการสลับสถานะระหว่างศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดอยู่เดิมในเซต $J_{open,k}$ กับศูนย์กระจายสินค้าที่ไม่ได้เปิดให้บริการซึ่งอยู่ในเซต $J_{close,k}$ จำนวนหนึ่งซึ่งการสับเปลี่ยนศูนย์กระจายสินค้านั้นสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การที่มีการเพิ่มและลดศูนย์กระจายสินค้าในเวลาครั้งเดียวกัน โดยการสร้างคำตอบข้างเคียงของการเคลื่อนโดยการสับเปลี่ยนศูนย์กระจายสินค้านั้นรวมทั้งการประเมินคำตอบข้างเคียงนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการของการเคลื่อนคำตอบโดยการเพิ่มและการลดศูนย์กระจายสินค้านามาผนวกเข้าด้วยกัน

3.3.2 คำตอบข้างเคียงของเฟสการจัดสรร (Allocation Phase Neighborhood)

เฟสการจัดสรรเป็นการแก้ปัญหาลดรูป $F(\bar{Y}_{jk})$ เมื่อทราบค่าเซตคำตอบของตัวแปรตำแหน่งทวีภาค $\bar{Y}_{jk}$ แล้วว่าศูนย์กระจายสินค้าแห่งใดเปิดให้บริการบ้างและเปิดให้บริการ ณ เวลาใดในระยะเวลาการวางแผน ซึ่งเฟสการจัดสรรมีจุดประสงค์เพื่อมอบหมายลูกค้าให้กับศูนย์กระจายสินค้าที่เปิดให้บริการ

โดยใช้ต้นทุนค่าขนส่งต่ำที่สุด ซึ่งการเคลื่อนคำตอบของเฟสนี้จะใช้วิธีการเคลื่อนคำตอบ 2 วิธี คือ การสับเปลี่ยน (swap move) และการย้าย (shift move) ซึ่งวิธีการเคลื่อนคำตอบทั้งสองชนิดเป็นดังนี้

3.3.2.1 การเคลื่อนโดยการสับเปลี่ยนลูกค้า (Swap Move)

การเคลื่อนคำตอบโดยการสับเปลี่ยนลูกค้านั้น จะทำการเลือกลูกค้านั้นที่จะทำการสับเปลี่ยนมา 2 บัพ ซึ่งปัจจุบันรับบริการจากศูนย์กระจายสินค้าที่แตกต่างกัน มาสับศูนย์กระจายสินค้าที่รับผิดชอบกัน โดยในการสับนั้นจะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้าหลังสับลูกค้านั้นแล้วด้วย เพื่อไม่ให้ความต้องการรวมของลูกค้านั้นเกินความสามารถสูงสุดในการให้บริการ ซึ่งจะทำให้คำตอบข้างเคียงนั้นเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้

3.3.2.2 การเคลื่อนโดยการย้ายลูกค้า (Shift Move)

การเคลื่อนคำตอบวิธีนี้เป็นการย้ายลูกค้านั้น 1 รายจากศูนย์กระจายสินค้าหนึ่งไปยังอีกศูนย์กระจายสินค้าหนึ่ง หรือการเปลี่ยนศูนย์กระจายสินค้าที่รับผิดชอบของลูกค้านั้นเอง โดยการย้ายไปยังศูนย์กระจายสินค้าแห่งใหม่นั้น ความต้องการของลูกค้านั้นย้ายไปเมื่อนำไปรวมกับความต้องการรวมเดิมนั้นจะต้องไม่เกินความสามารถสูงสุดในการให้บริการของศูนย์กระจายสินค้าใหม่ที่ย้ายไปเพื่อป้องกันการเกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้

3.4 รายการข้อห้ามและระยะเวลาต้องห้าม (Tabu List and Tabu Tenure)

การค้นหาแบบทาบูจะใช้รายการข้อห้าม (tabu list) บันทึกคำตอบที่ได้ทำการค้นหาแล้วไว้เป็นระยะเวลาตามเวลาต้องห้ามที่กำหนด (tabu tenure) เพื่อป้องกันการวนกลับมาสู่จุดเดิม (cycling) โดยการเคลื่อนคำตอบจากคำตอบปัจจุบันมายังคำตอบที่อยู่ในสถานะต้องห้าม (tabu active) จะไม่สามารถทำได้ โดยรายการข้อห้ามสำหรับฮิวริสติกที่พัฒนาจะแบ่งเป็น 2 รายการ คือ

- 1) รายการข้อห้ามของส่วนปัญหาตำแหน่งที่ตั้ง กำหนดว่าถ้าศูนย์กระจายสินค้าใดถูกเปิด ปิด หรือสับเปลี่ยนแล้ว ศูนย์กระจายสินค้านั้นจะต้องทำการคงสถานะเดิมไว้เป็นจำนวนเท่ากับระยะเวลาต้องห้าม
- 2) รายการข้อห้ามของส่วนปัญหาการจัดสรร กำหนดว่าถ้าลูกค้านั้นใดถูกสับเปลี่ยน หรือถูกย้ายไปยังศูนย์กระจายสินค้าใดแล้ว ลูกค้านั้นจะต้องคงสถานะอยู่กับศูนย์กระจายสินค้านั้นเป็นระยะเวลาเท่ากับระยะเวลาต้องห้าม

3.5 เกณฑ์ปรารถนา (Aspiration Criteria)

ในการเคลื่อนคำตอบบางรอบนั้นจะพบว่า คำตอบข้างเคียงที่พัฒนาจากคำตอบปัจจุบันอาจจะมีสถานะถูกห้ามทำให้ไม่สามารถเคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบข้างเคียงดังกล่าวได้ จึงมีการกำหนดเกณฑ์ Aspiration Criteria เพื่อเป็นการละเว้นรายการข้อห้ามของคำตอบข้างเคียงนี้ในกรณีที่คำตอบข้างเคียงทั้งหมดที่ไม่ติดสถานะต้องห้าม มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าคำตอบปัจจุบัน (สำหรับปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด) ทำให้สามารถเคลื่อนคำตอบไปยังคำตอบข้างเคียงที่มีสถานะถูกห้ามนี้ได้

3.6 การเพิ่มความหลากหลายของคำตอบ (Diversification)

การค้นหาแบบทามูมักจะทำการค้นหาโดยเน้นเฉพาะในบริเวณที่คำตอบมีคุณภาพดีเป็นหลัก แต่หากทำการเพิ่มความหลากหลายของบริเวณในการค้นหาให้มากยิ่งขึ้นแล้ว คำตอบที่ได้รับมักจะมีคุณภาพของคำตอบที่ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเริ่มต้นใหม่ (restart) โดยอาศัยหน่วยความจำความถี่ (frequency memory) ในการบันทึกจำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงสถานะของศูนย์กระจายสินค้าแต่ละแห่งในกระบวนการของหน่วยความจำระยะสั้น (short-term memory) ซึ่งเทคนิคนี้จะสร้างคำตอบเริ่มต้นใหม่ให้กับการค้นหาแบบทามู โดยคำตอบที่สร้างขึ้นใหม่นั้นจะใช้ขั้นตอนวิธีที่ดีในการสร้างคำตอบและมีการให้ความสำคัญ (priority) กับบริเวณที่ไม่ค่อยได้มีการหาคำตอบมาก่อน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ศูนย์กระจายสินค้าที่มีความถี่ในการเปลี่ยนสถานะน้อยที่สุดเป็นอันดับแรก

IV. ผลการทดสอบสมรรถนะ

ในการทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนาในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (GA) ที่ถูกเสนอโดย Ting, Chen and Hong [15] เป็นฮิวริสติกที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะ โดยฮิวริสติกทั้งสองนั้นจะทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 และทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนามบนเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ระบบประมวลผล Core 2 Duo 1.66 GHz มีหน่วยความจำ 2.5 GB และทดสอบบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP

4.1 ปัญหาทดสอบ

ในการทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนานั้นจะแบ่งเป็นการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบกับปัญหามาตรฐานที่นักวิจัยด้านตำแหน่งที่ตั้งใช้เป็นมาตรฐานการทดสอบ ซึ่งเป็นปัญหา capacitated warehouse location problems (CWL) มีชื่อว่า OR-library ของ Beasley [16] จำนวน 16 ปัญหา เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับคำตอบที่ดีที่สุด และการทดสอบในส่วนที่สองเป็นการทดสอบกับปัญหาแบบพลวัตที่สร้างขึ้น เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนากับขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งปัญหาทดสอบแบบพลวัตที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของงานวิจัยนี้สร้างขึ้นโดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ชนิด คือ

- 1) ต้นทุนการดำเนินงานต่อคาบเวลา (a_j) โดยต้นทุนนี้จะกำหนดเป็นอัตราส่วนกับต้นทุนคงที่ในการตั้งศูนย์กระจายสินค้า (f_j) โดยแต่ละปัญหาจะมีอัตราส่วนของ a_j / f_j คือ 1% 10% 40% และ 80%
- 2) ฟังก์ชันความต้องการของลูกค้ากับเวลา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ความต้องการคงที่ ความต้องการเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง และความต้องการเพิ่มขึ้นแบบกำลังสอง ซึ่งความต้องการแบบคงที่ จะทำการสุ่มโดยใช้การกระจายแบบสม่ำเสมอ $U[1002000]$ และมีจำนวน 20% ของทั้งหมด ความต้องการแบบเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนคงที่และส่วนฟังก์ชันเส้นตรงกับเวลา ซึ่งทำการสุ่มโดยใช้การกระจายแบบสม่ำเสมอ $U[1002000] + U[114200]t$ และมีจำนวน 65% ของทั้งหมด และความต้องการแบบเพิ่มขึ้นกำลังสองประกอบด้วยสามส่วน คือ ส่วนคงที่ ส่วนฟังก์ชันเส้นตรง

กับเวลา และส่วนฟังก์ชันกำลังสองกับเวลา ซึ่งทำการสุ่มโดยใช้การกระจายสม่ำเสมอ
 $U[100380] + U[38200]t + U[1516]t^2$

- 3) จำนวนคาบเวลาย่อยในระยะเวลาการวางแผน ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดคาบเวลาย่อย
 ในระยะเวลาการวางแผน 3 ค่า คือ 1 3 และ 5 ตามลำดับ

4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

จากผลการทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกการค้นหาแบบทาบูนและขั้นตอนวิธีพันธุกรรมกับปัญหา
 มาตรฐาน OR-library ซึ่งตารางผลการทดสอบสมรรถนะแสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความ
 ต่างของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (%GAP) ของคำตอบที่ได้วิธีการค้นหาแบบทาบูนและขั้นตอนวิธี
 พันธุกรรมเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.41% และ 1.21% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเวลา
 ที่ใช้ในการหาคำตอบพบว่า ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของวิธีการค้นหาแบบทาบูนน้อยกว่า
 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมมาก คือใช้เวลา 14.21 และ 33.93 วินาทีตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ
 เวลาแล้วพบว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมใช้เวลาในการหาคำตอบโดยเฉลี่ยมากกว่าวิธีการค้นหาแบบทาบูนถึง
 138.8%

ตารางที่ 1

ผลการหาคำตอบปัญหา
 ตำแหน่งที่ตั้งของปัญหา
 มาตรฐาน OR-library
 ของ Beasley

Problem	Optimum	% GAP		Runtime (second)	
		TABU	GA	TABU	GA
cap91	796,648.44	0.214	0.721	21.55	35.05
cap92	855,733.50	0.466	0.819	21.28	34.08
cap93	896,617.54	1.122	1.756	21.69	33.38
cap94	946,051.33	0.895	2.488	20.08	33.12
cap101	796,648.44	0.108	0.508	12.51	34.52
cap102	854,704.20	0.148	0.283	12.47	32.54
cap103	893,782.11	0.14	0.362	13.09	31.17
cap104	928,941.75	0	0.203	13.12	30.86
cap121	793,439.56	0.141	1.836	11.37	37.11
cap122	852,524.63	0.469	2.268	12.21	35.77
cap123	895,302.33	0.622	2.901	12.92	35.82
cap124	946,051.33	1.74	2.144	14.52	33.84
cap131	793,439.56	0.342	1.217	10.47	35.81
cap132	851,495.33	0.149	1.061	10.24	33.34
cap133	893,076.71	0.187	0.465	10.29	33.27
cap134	928,941.75	0	0.312	9.6	33.15
	Average	0.42	1.21	14.21	33.93

ผลการทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนาและฮิวริสติกเปรียบเทียบกับปัญหาพลวัตที่สร้างขึ้น
 (ตารางที่ 2 และตารางที่ 3) พบว่าค่าเฉลี่ยของคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากทั้งสองวิธีจะเริ่ม

แตกต่างกันมากขึ้นเมื่อจำนวนคาบเวลาอยู่ในระยะเวลาการวางแผนเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนคาบเวลา
 ย่อยเท่ากับ 1 คาบ วิธีการค้นหาแบบทาบู่จะให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมอยู่
 0.1% แต่เมื่อจำนวนคาบเวลาเพิ่มเป็น 5 คาบวิธีการค้นหาแบบทาบู่จะให้คำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธี
 พันธุกรรมเพิ่มขึ้นเป็น 2.1% และเมื่อพิจารณาด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบพบว่า เมื่อจำนวนคาบเวลา
 การวางแผนเพิ่มขึ้นฮิวริสติกทั้งสองจะใช้เวลาในการหาคำตอบนานขึ้น แต่เมื่อพิจารณาลักษณะการ
 เพิ่มขึ้นของฮิวริสติกทั้งสอง พบว่าวิธีการค้นหาแบบทาบู่จะมีอัตราการเพิ่มของเวลาที่ใช้ในการหา
 คำตอบน้อยกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรม และในทุกๆค่าของคาบเวลาอยู่ในระยะเวลาการวางแผนพบว่า
 ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมมีค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมากกว่าวิธีการค้นหาแบบทาบู่ โดยเมื่อคิด
 เป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้งสองฮิวริสติก พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเวลาเฉลี่ยที่ใช้ใน
 การหาคำตอบระหว่างขั้นตอนวิธีพันธุกรรมและวิธีการค้นหาแบบทาบู่ที่จำนวนคาบการวางแผนเท่ากับ
 1, 3 และ 5 คือ 127.09% 310.80% และ 366.49% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อจำนวนคาบเวลา
 เพิ่มมากขึ้น ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมจะยิ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่มากกว่าฮิวริสติกการค้นหาแบบ
 ทาบู่มากยิ่งขึ้น

Problem	Number of periods					
	1		3		5	
			Objective function			
	Tabu	GA	Tabu	GA	Tabu	GA
P91	683,563	685,247	2,157,333	2,171,700	4,062,000	4,015,233
P92	737,207	734,220	2,261,733	2,280,100	4,209,267	4,187,233
P93	782,000	779,333	2,364,733	2,383,167	4,335,067	4,332,133
P94	836,433	827,340	2,489,800	2,499,167	4,541,167	4,512,633
P101	692,875	695,605	2,202,825	2,219,375	4,098,700	4,125,200
P102	751,795	755,718	2,325,175	2,338,258	4,292,375	4,334,400
P103	797,963	792,773	2,433,375	2,462,150	4,452,150	4,556,625
P104	839,733	839,393	2,569,000	2,582,225	4,651,024	4,748,800
P121	675,923	689,248	2,090,750	2,140,500	3,807,775	3,883,700
P122	732,595	740,490	2,262,150	2,332,675	4,101,375	4,198,200
P123	779,008	790,675	2,387,575	2,455,225	4,273,475	4,449,575
P124	845,815	837,705	2,529,200	2,593,825	4,558,200	4,732,050
P131	675,210	685,328	2,078,975	2,145,400	3,771,950	3,890,175
P132	738,273	743,698	2,241,175	2,311,100	4,049,150	4,206,650
P133	785,313	781,103	2,360,825	2,446,075	4,246,550	4,439,450
P134	829,415	828,018	2,515,350	2,579,225	4,508,475	4,706,975
Average	761,445	762,868	2,329,373	2,371,260	4,247,419	4,332,440

ตารางที่ 2

ผลการทดสอบสมรรถนะ
 ด้านคุณภาพของคำตอบ
 กับปัญหาพลวัตที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 3

ผลการทดสอบสมรรถนะ
ด้านเวลาในการหาคำตอบกับปัญหาพลวัตที่สร้างขึ้น

Problem	Number of periods					
	1		3		5	
			Runtime(second)			
	Tabu	GA	Tabu	GA	Tabu	GA
P91	21.81	48.08	39.15	149.45	58.12	249.11
P92	22.04	42.38	35.25	132.31	52.97	226.09
P93	21.22	46.6	34.07	146.42	51.98	251.92
P94	20.76	47.23	32.8	145.97	48.76	249.87
P101	15.04	50.94	33.46	155.94	55.11	266.29
P102	14.75	37.29	32.89	106	51.57	185.03
P103	15.13	33.35	33.14	104.37	51.3	203.93
P104	14.85	37.28	32.27	111.9	50.12	170.99
P121	14.09	38.23	31.21	128.7	46.48	236.55
P122	23.55	36.09	27.71	118.04	43.32	209.65
P123	27.9	43.61	26.6	140.64	42.47	245.52
P124	23.15	34.63	26.12	106.79	41.74	196.28
P131	12.51	37.98	29.49	128.2	49.58	237.42
P132	12.21	36.39	27.63	117.82	43.25	212.4
P133	11.85	34.74	26.6	113.31	41.8	209.7
P134	11.83	33.98	25.64	116.02	39.95	208.36
Average	17.67	39.92	30.88	126.37	48.03	222.44

V. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบสมรรถนะของฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ว่า วิธีการค้นหาแบบทาบูจะให้ประสิทธิภาพในด้านเวลาในการหาคำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในทุกชนิดของปัญหา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนคาบเวลาลอยอยู่ในระยะเวลาการวางแผนของปัญหาแบบพลวัตเพิ่มสูงขึ้น ด้านคุณภาพของคำตอบ วิธีการค้นหาแบบทาบูจะให้คุณภาพของคำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเล็กน้อย โดยเมื่อทำการทดสอบกับปัญหามาตรฐาน OR-library พบว่าวิธีการค้นหาแบบทาบูจะให้คุณภาพของคำตอบที่ดีใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด คือ มีความแตกต่างเพียง 0.41 เปอร์เซนต์เท่านั้น

ในการพัฒนาขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์กระจายสินค้าในอนาคตนั้น อาจใช้วิธีการผสมผสานระหว่างฮิวริสติกชนิดต่างๆรวมเข้าเป็นขั้นตอนวิธีเดียวกัน ซึ่งอาจพิจารณาโดยนำข้อดี ข้อเสียของฮิวริสติกแต่ละประเภทมาวิเคราะห์เพื่อเป็นการพัฒนาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] S. H. Owen and M. S. Daskin, "Strategic facility location: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 111, no. 3, pp. 423-447, 1998.
- [2] S. L. Hakimi, "Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph," *Operations Research*, vol. 12, no. 3, pp. 450-459, 1964.
- [3] G. Cornuéjols, G. L. Nemhauser, and L. A. Wolsey, "The uncapacitated facility location problem," *Discrete Location Theory*, New York: John Wiley & Sons, pp. 119-171, 1990.
- [4] J. Current, S. Ratick, and C. Revelle, "Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach," *European Journal of Operational Research*, vol. 110, no. 3, pp. 597-609, 1998.
- [5] R. H. Ballou, "Dynamic warehouse location analysis," *Journal of Marketing Research*, vol. 5, no. 3, pp. 271-276, 1968.
- [6] D. J. Sweeney and R. L. Tatham, "An improved long-run model for multiple warehouse location," *Management Science*, vol. 22, no. 7, pp. 748-758, 1976.
- [7] G. O. Wesolowsky and W. G. Truscott, "The multi period location-allocation problem with relocation of facilities," *Management Science*, vol. 22, no. 1, pp. 57-65, 1975.
- [8] Z. Drezner, "Dynamic facility location: The progressive P-median problem," *Location Science*, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 1995.
- [9] T. J. Van Roy and D. Erlenkotter, "A dual-based procedure for dynamic facility location," *Management Science*, vol. 28, no. 10, pp. 1091-1105, 1982.
- [10] F. Glover, "Tabu search – Part I," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, 1989.
- [11] F. Glover, "Tabu Search – Part II," *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 4-32, 1990.
- [12] T. A. Feo and M. G. C. Resende, "Greedy randomized adaptive search procedures," *Journal of Global Optimization*, vol. 6, pp. 109-134, 1995.
- [13] H. Delmaire, J. A. Diaz, E. Fernandez, and M. Ortega, "Reactive grasp and tabu search based heuristics for the single source capacitated plant location problem," *Information Systems and Operational Research*, vol. 37, no. 3, pp. 194-225, 1999.
- [14] S. K. Jacobsen, "Heuristics for the capacitated plant location model," *European Journal of Operational Research*, vol. 12, no. 3, pp. 253-261, 1983.
- [15] C. J. Ting, C. H. Chen, and M. H. Hong, "On the use of genetic algorithms to solve the dynamic location problem," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, no. 5, pp. 2247-2260, 2003.
- [16] J. E. Beasley, "An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 33, no. 3, pp. 314-325, 1988.