ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์

The Development and Implementation of Hybrid Encoding Genetic Algorithm with Multi-Relations

นามผู้วิจัย นายสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์ปรณัฐ วิสุวรรณ, Ph.D.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ, Ph.D.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, Ph.D.)

กรรมการ .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะโกศิษฐ, Ph.D.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์ดวงพรรณ กริชชาญชัย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสม แบบหลายความสัมพันธ์

The Development and Implementation of Hybrid Encoding Genetic Algorithm with Multi-Relations

โดย

นายสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2551

สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ 2551: การพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ปรณัฐ วิสุวรรณ, Ph.D. 133 หน้า

การศึกษาวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์เพื่อแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายที่เส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดมีหลายเส้น แต่ละเส้นมีค่าน้ำหนักไม่เท่ากันและค่าน้ำหนักคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตามเวลา วิธีการที่พัฒนาขึ้นจะเข้ารหัสผสมกันระหว่างเลขจำนวนเต็มที่แสดงถึงจุดยอดและเลขฐานสองที่แสดงถึงเส้นเชื่อม ทำการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ด้วยวิธีวงล้อเสี่ยงโชค ใช้การข้ามพวกแบบจุดตัดเดียวซึ่งมีผลเฉพาะเลขฐานสอง ใช้การกลายพันธุ์แบบสลับค่าซึ่งมีผลเฉพาะเลขจำนวนเต็ม ทำการทดลองกับปัญหาขนาดตั้งแต่ 20 จุดยอด ถึง 30,000 จุดยอด

จากการทดลองพบว่าค่าของตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสม ได้แก่ ขนาดของประชากรที่สัมพันธ์กับขนาดของปัญหา จำนวนรุ่นวิวัฒนาการมีค่าระหว่าง 300 ถึง 400 รุ่น ค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกมีค่าระหว่างร้อยละ 20 ถึง 60 และความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์มีค่าระหว่างร้อยละ 30 ถึง 80 ขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา และพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดไม่เกิน 100 จุดยอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 50 สำหรับปัญหาที่มีขนาดเกินกว่า 100 จุดยอด แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด สามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 20 และปัญหาที่มีขนาดเกินกว่า 1,000 จุดยอด จะสามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้น้อยกว่าร้อยละ 20 ซึ่งในปัญหาขนาดใหญ่มากที่มีจำนวนจุดยอด 30,000 จุดยอด สามารถลดต้นทุนการเดินทางได้ร้อยละ 6.07 จากนั้นได้นำวิธีการที่พัฒนาขึ้นแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่งสินค้าและกำหนดสภาพจราจรโดยกำหนดค่าตัวแปรป้อนเข้าที่เหมาะสมตามผลการทดลอง พบว่าสามารถลดต้นทุนในการขนส่งได้ร้อยละ 45.3 ถึง 49.4

_____ _____ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Supat Patvichaichod 2008: The Development and Implementation of Hybrid Encoding Genetic Algorithm with Multi-Relations. Doctor of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Poranat Visuwan, Ph.D. 133 pages.

The aim of this research is to develop and implement the hybrid encoding genetic algorithm with multi-relations in order to solve a traveling salesman problem with multiple arches between vertices, various weight in each arch, and constant or time-dependence weights. The developed algorithm employs two types of encoding methods: integer encoding which indicates the vertices and binary encoding which indicates the arches. The parent chromosomes are chosen by random. The one-point crossover method is used only for the binary encoding whilst the exchange mutation technique is used only for the integer encoding. Experimentally, the problem sizes range from 20 to 30,000 vertices.

From the experiment, the proper input parameters include a population size relating to the problem size, generations in range of 300 and 400, probabilities of crossover in range of 20 to 60 percents, and probabilities of mutation in range of 30 to 80 percents depending on the problem size. In addition, the developed algorithm can effectively solve problems. For the problem sizes under 100 vertices, the algorithm can reduce the traveling costs of about 50 percent. For the problem sizes between 100 and 1,000 vertices, the algorithm results in 20 percent traveling cost saving. For the problem size over 1,000 vertices, less than 20 percent traveling cost saving is achieved, whilst at the 30,000 vertices the traveling cost is reduced by 6.07 percent. Thereafter, the developed algorithm is applied for the problem of the pickup and delivery vehicle routing with traffic conditions by using the proper input parameters from the experiment. The results reveal the reduction in traveling cost, ranging from 45.3 to 49.4 percents.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. ปรณัฐ วิสุวรรณ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ รศ. ดร. ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา รศ. ดร. ดวงพรรณ กริชชาญชัย และ ผศ. ดร. วิชัย ศิวะโกศิษฐ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอกที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สุวิมล สัจจวาณิชย์ ผู้แทนบัณฑิตวิยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บุพการีที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ

ตุลาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	36
ผล	36
วิจารณ์	87
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	107

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1	ระยะของถนนเส้นต่าง ๆ	83
2	แสดงค่าคงที่ในสมการคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	85
3	ผลการทดลองของปัญหา PDVRPTC	86

ตารางผนวกที่

1	ผลการทดลองหาขนาดของประชากร (N) ที่เหมาะสม	108
2	ผลการทดลองหาจำนวนรุ่นการวิวัฒนาการ (G) ที่เหมาะสม	111
3	ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสม สำหรับ VerticeSize = 60, PopulationSize = 30, Generation = 300	114
4	ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสม สำหรับ VerticeSize = 100, PopulationSize = 50, Generation = 300	118
5	ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 600, PopulationSize = 60, Generation = 300	122
6	ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 1,000 PopulationSize = 100, Generation = 300	126
7	การทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 2,000ม PopulationSize = 100, Generation = 400	130

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง	10
2	แสดงการเข้ารหัสแบบจัดลำดับ	13
3	แสดงการเข้ารหัสแบบแทนค่า	14
4	แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น	16
5	แสดงตัวอย่างการหาค่าความเหมาะสม	17
6	แสดงการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชค	18
7	แสดงการข้ามพวก	19
8	แสดงการกลายพันธุ์	20
9	ขั้นตอนการทำงานของ HEGA	23
10	ภาพแสดงวิธีการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชคในขั้นตอน HEGA	28
11	ตัวอย่างปัญหา TSPMR	32
12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้ สำหรับปัญหาขนาด 20 ถึง 100 จุดยอด	36
13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้ สำหรับปัญหาขนาด 200 ถึง 1,000 จุดยอด	37
14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้ สำหรับปัญหาขนาด 1,500 ถึง 3,000 จุดยอด	38
15	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	38
16	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	39
17	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	41
19	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของที่เหมาะสม	42
20	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรเหมาะสม	43
21	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	44
22	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	45
23	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	46
24	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	47
25	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้าและเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	49
27	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	50
28	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม	51
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 20 ถึง 100 จุดยอด	53
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 200 ถึง 1,000 จุดยอด	54
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,500 ถึง 3,000 จุดยอด	54
32	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	55
33	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	56
34	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	58
36	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	59
37	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	60
38	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	61
39	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	62
40	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	63
41	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	64
42	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	66
44	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	67
45	กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม	68
46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด	70
47	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด	71
48	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด	73
49	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด	74
50	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด	75
51	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด	76
52	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด	77
53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
54	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด	79
55	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด	80
56	ภาพแสดงปัญหา PDVRPTC ตัวอย่าง	82
57	ความเร็วเฉลี่ยของรถขนส่งสินค้าที่ขึ้นกับช่วงเวลาในการเดินทาง	83
58	ภาพแสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกและความเร็วของรถขนส่ง	84

การพัฒนาและการประยุกต์ใช้งานขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์

The Development and Implementation of Hybrid Encoding Genetic Algorithm with Multi-Relations

คำนำ

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) เป็นขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ที่พัฒนาและจำลองมาจากกระบวนการทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ที่เรียกว่าทฤษฎีวิวัฒนาการหรือทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีการที่ถูกนำไปแก้ปัญหาต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problems, TSP) ซึ่งเป็นปัญหาโครงข่าย (Network problem) มีลักษณะเป็นกราฟ (Graph) ที่ประกอบด้วยจุดยอด (Vertices) และเส้นเชื่อม (Edges) ที่เชื่อมต่อระหว่างจุดยอดเข้าด้วยกัน ปัญหา TSP จัดว่าเป็นปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์ (NP-Complete problem) ซึ่งไม่มีวิธีการแก้ปัญหาที่ดีให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดภายในเวลาที่เหมาะสม (Coley, 1999)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะขยายขอบเขตของปัญหา TSP เป็นปัญหาที่มีเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดแบบหลายความสัมพันธ์ (Traveling salesman problem with multi-relations, TSPMR) ที่ระหว่างแต่ละจุดยอดมีเส้นเชื่อมได้หลายแบบ แต่ละแบบมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ไม่เท่ากัน และค่าถ่วงน้ำหนักยังสามารถเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อให้กลายเป็นปัญหา TSP ที่ใกล้เคียงกับปัญหาทางวิศวกรรมในความเป็นจริงมากขึ้น โดยปัญหาที่สามารถประยุกต์ใช้งานจากปัญหา TSPMR ที่พัฒนาขึ้นมีหลากหลาย เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบกำหนดสภาพจราจร (Vehicle routing problem with traffic conditions, VRPTC) ปัญหาโครงข่ายท่อส่งน้ำ (Water distribution network) และปัญหาโครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger network) เป็นต้น

เนื่องจากปัญหา TSPMR เป็นปัญหาที่ถูกขยายขอบเขตจากปัญหา TSP แบบเดิม จึงนับว่าเป็นปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์เช่นกัน ทำให้การแก้ปัญหา TSPMR ที่มีจุดยอดจำนวนมากไม่สามารถแก้ปัญหาให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดในเวลาที่เหมาะสม จึงเน้นเพียงหาคำตอบที่ดีด้วยขั้นตอนวิธีการโดยประมาณ (Approximate algorithm) รวมทั้งขั้นตอนวิธีการแบบเดิมไม่ค่อยเหมาะสมในการ

แก้ปัญหา TSPMR เนื่องจากมีหลายความสัมพันธ์ระหว่างจุดยอดและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นพัฒนาขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบใหม่ขึ้นเรียกว่าขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์ (Hybrid encoding genetic algorithm with multi-relations, HEGA) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบโดยประมาณ ที่พัฒนาให้มีการเข้ารหัสแบบใหม่ ซึ่งผสมผสานการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary encoding) เข้ากับการเข้ารหัสแบบเลขจำนวนเต็มหรือแบบจัดลำดับ (Integer encoding หรือ Permutation encoding)

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ ให้ได้คำตอบโดยประมาณ

2. หาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้าต่าง ๆ ที่ต้องกำหนดในการทำงานของวิธีการที่พัฒนาขึ้น โดยทดลองบนปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ที่มีจำนวนจุดยอดน้อยถึงปัญหาที่มีจำนวนจุดยอดมาก

3. ประยุกต์ใช้วิธีการที่พัฒนาขึ้นในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่งสินค้าและกำหนดสภาพจราจร (Pickup and delivery vehicle routing problem with traffic conditions, PDVRPTC)

การตรวจเอกสาร

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

ลักษณะของปัญหา

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย หรือ TSP ถูกเสนอครั้งแรกในรูปแบบของเกมส์ที่ชื่อว่าไอโคเซียน (Icosian games) โดยเซอร์วิลเลี่ยม ฮามิลตัน ในคริสศตวรรษที่ 18 ต่อมาในปี พ.ศ. 2473 คาร์ล เมนเกอร์ (Karl Menger) ได้ตีพิมพ์ปัญหานี้ในวารสาร จึงเป็นที่รู้จักในหมู่นักวิจัย ซึ่งในปี พ.ศ. 2477 เฮศเลอร์ วิทย์นี่ (Hassler Whitney) ได้นำปัญหา TSP ไปบรรยายที่มหาวิทยาลัย Princeton และในปี 2480 งานวิจัยชิ้นแรกเกี่ยวกับปัญหา TSP ก็ถูกนำเสนอเป็นปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถรับส่งนักเรียนในประเทศสหรัฐอเมริกา

ปัญหา TSP มีลักษณะเป็นกราฟ ที่ประกอบด้วยจุดยอด (Vertices) และเส้นเชื่อม (Edges) เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ $G = (V, E)$ โดย $V = \{1, \ldots, n\}$ ซึ่ง n คือจำนวนจุดยอดทั้งหมด และ $E = \{(i, j): i, j \in V, i \neq j\}$ ระยะเส้นเชื่อมจากจุดยอด i ไป j ซึ่งเท่ากับ c_{ij} มีได้ 2 รูปแบบคือ รูปแบบอสมมาตร (Asymmetric) ซึ่ง $c_{ij} \neq c_{ji}$ และรูปแบบสมมาตรที่ $c_{ij} = c_{ji}$ ถ้าปัญหา TSP เกิดจากกราฟที่เป็นแบบสมมาตร จะเรียกว่าปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบสมมาตร (Symmetric traveling salesman problem, STSP) ถ้าเกิดจากกราฟแบบอสมมาตร จะเรียกว่าปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบอสมมาตร (Asymmetric traveling salesman problem, ATSP)

ในการหาเส้นทางเดินผ่านจุดยอดจุดละ 1 ครั้งและกลับมาจุดเริ่มต้น เรียกว่า รอบฮามิลโตเนี่ยน (Hamiltonian cycle, HAMC) เส้นทางเดินที่ได้เรียกว่ารอบใหญ่ (Tour) ถ้าเส้นทางเดินผ่านไม่ครบทุกจุดยอด แต่กลับมายังจุดเริ่มต้น เส้นทางเดินที่ได้เรียกว่ารอบย่อย (Subtour) ถ้าเส้นทางเดินผ่านจุดยอดจุดละ 1 ครั้ง แต่ไม่กลับมาจุดเริ่มต้น เส้นทางเดินที่ได้เรียกว่าเส้นทางฮามิลโตเนี่ยน (Hamiltonian path, HAMP)

ในปัญหา TSP ถ้ามีจุดยอดจำนวน n จุด จะบอกไม่ได้ว่าเส้นทางรวมทั้งหมดจากการเดินทางผ่านจุดยอด n จุด ตามลำดับที่วางไว้ต้องลำดับแบบใดจึงจะได้คำตอบที่ดีที่สุด จนกว่าจะสลับตำแหน่งถึง $(n-1)!$ เพื่อหาลำดับตำแหน่งจุดยอดที่มีระยะรวมน้อยที่สุด ปัญหาลักษณะนี้ เรียกว่า

ปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard problem) เนื่องจากเมื่อจำนวนจุดยอดเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่ต้องใช้ในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลัง ถ้าคอมพิวเตอร์ประมวลผลได้ 1,000,000,000,000 หน่วยต่อวินาที การคำนวณ 30! หรือเท่ากับ 2.65×10^{32} ต้องใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบถึง 2.65×10^{20} วินาที

วิธีการหาคำตอบของปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

การแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายนั้น สามารถทำได้ด้วย 3 วิธีการใหญ่ ๆ ได้แก่ วิธีการแบบแม่นตรง (Exact approaches) วิธีศึกษาสำนึก (Heuristic methods) และวิธีอภิศึกษาสำนึก (Meta-Heuristic methods) โดยวิธีการแบบแม่นตรงจะให้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) แต่ต้องใช้เวลาในการหาคำตอบนานถ้ามีจุดยอดจำนวนมาก ส่วนวิธีการแบบศึกษาสำนึกและอภิศึกษาสำนึกนั้นเป็นวิธีการหาคำตอบโดยประมาณ จะให้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ภายในเวลาคำนวณที่ยอมรับได้

วิธีการแบบแม่นตรง วิธีการแรกที่นำมาแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายคือ กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Dantzig *et al.*, 1954) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เวลามากในการหาคำตอบ ต่อมาจึงได้มีการคิดค้นวิธีการที่เรียกว่า การแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัด (Branch-and-Cut, B&C) ซึ่ง GrOschel (1980) ได้ใช้วิธีการนี้แก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบสมมาตรในชุดตัวอย่าง 120 เมือง ในประเทศเยอรมัน Padberg and Rinaldi (1987) แก้ปัญหา 532 เมืองในประเทศสหรัฐอเมริกา GrOschel and Holland (1991) แก้ปัญหา 666 เมืองจากแผนที่โลก จากนั้นได้มีการรวมตัวของนักวิจัยระหว่างมหาวิทยาลัย Rice มหาวิทยาลัย Princeton และห้องปฏิบัติการของ AT&T จัดทำเครือข่ายคอมพิวเตอร์โดยได้รับการสนับสนุนจาก Compaq, Intel และ AMD เพื่อแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบสมมาตรขนาดใหญ่ ซึ่งได้แก่ ปัญหา 13,509 เมืองในประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี 2541 และปัญหา 15,112 เมืองในประเทศเยอรมัน สำหรับปัญหา 15,112 เมืองในประเทศเยอรมัน ถ้าใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพนเทียมความเร็ว 600 MHz คำนวณ ต้องใช้เวลาถึง 50.4 ปี ในการหาคำตอบ_วิธีการแบบแม่นตรงอีกวิธีการหนึ่งที่ถูกนำเสนอคือ การแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound, B&B) โดยผู้ใช้วิธีการนี้ในการแก้ปัญหาได้แก่ Balas and Christofied (1981), Miller and Penky (1989), Fischetti and Toth (1992) และ Lysgaard (1999) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัดแล้ว Fischetti and Toth

(1997) ได้ทดสอบว่าประมาณ 3 ใน 4 ของปัญหาที่สร้างขึ้น วิธีการแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัดรวดเร็วกว่าวิธีการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต

วิธีศึกษาสำนึก เนื่องจากว่าวิธีการแบบแม่นตรงมีความล่าช้าในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นวิธีการที่หาคำตอบที่ดีหรือที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดจึงได้ถูกคิดค้นขึ้น เช่น วิธีการสร้างคำตอบเริ่มต้น (Construction procedures) ซึ่งเป็นวิธีการในการเชื่อมแต่ละจุดยอดเข้าด้วยกันเป็นคำตอบ ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนวิธีการเนียเรสไนเบอร์ (Nearest-neighbor algorithm) ขั้นตอนวิธีการอินเสิร์ทชั่น (Insertion algorithm) (Rosenkrantz *et al*., 1977) ขั้นตอนวิธีการแพทชิ่ง (Patching algorithm) (Karp, 1979) เมื่อใช้วิธีการเหล่านี้ในการสร้างคำตอบเริ่มต้นแล้ว จะทำการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธีการปรับปรุงคำตอบ (Tour improvement procedures) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้สำหรับปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบสมมาตร ได้แก่ วิธีการสลับทีละ 2 ให้เหมาะสมที่สุด (2-Optimal) และสลับทีละ 3 ให้เหมาะสมที่สุด (3-Optimal) (Christofied and Eilon, 1972) วิธีสลับแบบลินเคอร์นิแกนให้เหมาะสมที่สุด (Lin-Kerninghan optimal, LK-opt) (Lin and Kerninghan, 1973) และวิธีเจเนรัลอินเสิร์ทชั่นและโพสท์ออพติไมซ์ (General insertion and post-optimization, GENIUS) (Gendreau *et al.*, 1992) แต่วิธีการเหล่านี้ไม่เหมาะสมในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบไม่สมมาตร ในขณะที่วิธีการสลับแบบออร์ (Or optimal, Or-opt) เป็นวิธีการที่แก้ได้ทั้งปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Golden and Stewart, 1985) โดยวิธีการปรับปรุงคำตอบนี้ถ้าเริ่มต้นด้วยคำตอบที่แตกต่างกัน คำตอบสุดท้ายที่ได้อาจจะไม่เท่ากัน ดังนั้นวิธีอภิศึกษาสำนึกซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบเฉพาะที่จึงอาศัยคุณสมบัตินี้สร้างหลักเกณฑ์ในการสร้างคำตอบเริ่มต้นที่แตกต่างกันไปเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีได้

วิธีอภิศึกษาสำนึก เป็นวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีการปรับปรุงคำตอบจากวิธีศึกษาสำนึก โดยสุ่มคำตอบเริ่มต้นมาจำนวนหนึ่ง จากนั้นทำการสลับลำดับตามวิธีการจนกลายเป็นคำตอบเริ่มต้นของขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนวิธีการนี้จะไม่มีจุดสิ้นสุดที่แน่นอน ถ้าใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานคุณภาพของคำตอบจะดีขึ้น วิธีอภิศึกษาสำนึกวิธีแรกคือ วิธีการทาบูเสิร์ท (Tabu search, TS) ซึ่งเป็นการกำหนดตัวแปรเพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบที่ได้จากวิธีปรับปรุงคำตอบซ้ำกัน (Glover, 1977, 1989, 1990) วิธีอภิศึกษาสำนึกที่พัฒนาต่อมามักจะเลียนแบบปรากฏการณ์ทางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น เช่น วิธีการซิมูเลทแอนนีลริ่ง (Simulated annealing, SA) ซึ่งเลียนแบบขั้นตอนของการอบชุบเหล็กกล้า (Kirkpatrick et al., 1983) นอกจากนั้นวิธีอภิศึกษาสำนึกได้ผนวกเอาปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) มาใช้ในการแก้ปัญญาด้วย ซึ่งได้แก่ วิธีการ

เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network, ANN) ซึ่งเลียนแบบขั้นตอนการทำงานของระบบประสาท (Hopfield and Tank, 1985) และขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ซึ่งเป็นการเลียนแบบการขั้นตอนการถ่ายทอดพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต (Goldberg, 1989)

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ในการแก้ปัญหาที่หลากหลายและแตกต่างกันออกไปเพื่อให้วิธีการแก้ปัญหาเหล่านั้นเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้น และขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) เป็นวิธีอภิศึกษาสำนึกในการแก้ปัญหาแบบหนึ่งที่ช่วยให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีให้กับปัญหา โดยใช้กระบวนการทางพันธุศาสตร์เข้ามาในกระบวนการค้นหาคำตอบ

GA สามารถช่วยแก้ปัญหาที่มีค่อนข้างขนาดใหญ่และซับซ้อนได้ เนื่องจากวิธี GA มีคุณสมบัติของการเลียนแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม นั่นคือ หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ จึงจัดได้ว่า GA เป็นวิธีหนึ่งในกลุ่มของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับถึงประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในทางด้านของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เช่น หุ่นยนต์ เกมส์ ทางด้านธุรกิจและทางด้านการออกแบบต่างๆ เช่น ออกแบบแผงวงจรไฟฟ้า หรือโครงสร้างที่ซับซ้อนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ และในการนำเอาความสามารถในด้านการพัฒนาวิวัฒนาการทางวิชาพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้ก็จะต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายทอดลักษะทางพันธุกรรม ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทางพันธุศาสตร์ เช่น การคัดเลือกโครโมโซมที่สมควรนำไปสืบสายพันธุ์ (Selection) การจับคู่โครโมโซมที่ได้จากการคัดเลือก (Mating), การผสมกันระหว่างโครโมโซมที่ได้จากการจับคู่กัน (Crossover) และการปรับเปลี่ยนค่าบางตำแหน่งของโครโมโซม (Mutation)

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเกิดจากคำสองคำมารวมกัน คือ พันธุกรรม (Genetic) รวมกับขั้นตอนวิธีการ (Algorithm) ซึ่งพันธุกรรม เป็นส่วนหนึ่งของวิชาพันธุ์ศาสตร์ ที่ว่าด้วยการศึกษากระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากบรรพบุรุษสู่รุ่นลูกรุ่นหลาน โดยมีโครโมโซมเป็นตัวแทนในการถ่ายทอด โครโมโซมคือสายรหัสของ DNA ประกอบไปด้วยยีนซึ่งแต่ละยีนจะมีการบ่งบอกลักษณะพิเศษเอาไว้ เช่น สีตา สีผม ซึ่งโครโมโซมเหล่านี้มีบทบาทอย่างมากในกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นหนึ่งไปยังรุ่นหนึ่ง ซึ่งจะมีปรากฏการณ์ธรรมชาติเกิดขึ้นใน

ระหว่างการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรุ่น ซึ่งกระบวนที่เกิดขึ้นการเหล่านี้ทำให้เกิดวิวัฒนาการ(Evolution) กระบวนการที่ว่านี้ ได้แก่การกลายพันธุ์ (Mutation) และการข้ามพวก (Crossover)

ขั้นตอนวิธีการหมายถึงชุดคำสั่งที่มีการเรียงลำดับขั้นตอนไว้อย่างดีด้วยกระบวนการทางด้านคณิศาสตร์และทางตรรกะเพื่อแก้ปัญหาใดปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ซึ่ง Alan The Gorithm Turing เป็นผู้พิสูจน์ว่าคำตอบที่ได้จากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์หรือปัญหาทางตรรกะสามารถตัดสินได้ด้วยชุดของขั้นตอนวิธีที่ถูกต้อง ขั้นตอนและวิธีเป็นการค้นหาคำตอบที่ถูกต้องให้กับปัญหายากๆ โดยการแบ่งย่อยปัญหานั้นออกเป็นขั้นตอนง่ายๆ นอกจากนี้ยังเป็นการใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย เช่น ในการเขียนโปรแกรมถ้ามีการออกแบบขั้นตอนที่ดี โปรแกรมนั้นย่อมมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพที่ดีและมีขนาดที่เล็ก เป็นต้น

GA เป็นวิธีแก้ปัญหาที่ใช้ในการค้นหา (Search) เพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุด ที่เรียกว่า Optimum points โดยได้พัฒนาและจำลองวิธีการมาจากกระบวนการทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจาก ทฤษฎีวิวัฒนาการ หรือ ทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต โดยทฤษฎีนี้เป็นของ Charles Darwin ซึ่งจากทฤษฎีนี้ John Holland นักวิทยาศาสตร์สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ได้คำการคิดค้นการลอกเลียนแบบขั้นตอนธรรมชาติของการพัฒนาสิ่งมีชีวิตขึ้นในปี คริสต์ศักราช 1970 โดยพัฒนาขึ้นรวมกับเพื่อนร่วมงานและนักศึกษาของมหาวิทยาลัย Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่เขามีจุดมุ่งหมายเพื่อ

1. อธิบายการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางธรรมชาติของพันธุกรรม

2. เพื่อที่จะนำกลไลการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับการเขียนโปรแกรม

ซึ่งมีความหวังว่าจะเป็นการค้นพบที่มีความสำคัญทั้งกับกลไกทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตและการคิดค้นประดิษฐ์ทางวิทยาศาสตร์

จากการคิดค้นของ John Holland ทำให้สามารถค้นหาและแก้ปัญหาให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุดทั้งอาจจะเป็นจุดต่ำสุด (Minimum point) หรือจุดสูงสุด (Maximum point) สำหรับหลักการ

ของวิธีการค้นหาแบบ GA คือสิ่งมีชีวิตทั้งหมดจะมีทั้งลักษณะที่ดีและไม่ดี ในการกำหนดว่าสิ่งมีชีวิตไหนมีลักษณะที่ดีหรือไม่ดีนั้นจะถูกกำหนดจาก Optimization theory ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะที่ดีนั้นจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดลักษะทางพันธุกรรม เพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตใหม่ที่ดีขึ้น ในส่วนที่มีลักษณะที่ไม่ดีจะไม่ถูกสนับสนุนหรือไม่นำส่วนนี้มาพิจารณา ดังนั้นในหลักการทำงานของ GA จึงถูกนำเสนอข้อมูลในรูปแบบโครโมโซม นั้นหมายความว่า คำตอบ ที่สามารถเป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาจะถูกนำมาแปลงเป็นโครโมโซม เพื่อนำโครโมโซมไปใช้ในกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม โดยจะใช้ค่าความเหมาะสม (Fitness value) ที่มีความสอดคล้องกับค่าจุดประสงค์ (Objective value) กำหนดให้แต่ละโครโมโซม และโครโมโซมเหล่านั้นจะถูกนำมาพิจารณาว่าโครโมโซมใดควรนำมาสืบสายพันธุ์ต่อไปหรือโครโมโซมใดไม่ควรนำมาสืบสายพันธุ์ และจากการหาคำตอบโดยใช้โครโมโซม ในแต่ละรุ่น (Generation) จะมีการสุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา จึงทำให้ GA สามารถหาคำตอบที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดได้

GA เป็นวิธีการหาคำตอบที่ช่วยในการหาคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ซึ่งจะนำค่าที่เหมาะสมที่สุดจากประชากรรุ่นก่อนมาใช้พิจารณาในการหาคำตอบของประชากรรุ่นถัดมา ซึ่งมีการใช้ตัวดำเนินการ (Operator) คือ การคัดเลือก (Selection) การข้ามพวก (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นตัวสุ่มในการหาคำตอบในบริเวณของปัญหาซึ่งจะช่วยให้มีความหลากหลาย (Diversity) ในการหาคำตอบทุกบริเวณของปัญหา

GA มีองค์ประกอบที่สำคัญ 6 ส่วนด้วยกัน ดังนี้

1. การเข้ารหัสของโครโมโซมหรือรูปแบบของโครโมโซม (Chromosome encoding) คือ รูปแบบโครโมโซมที่ใช้ในการนำเสนอทางเลือกที่สามารถจะเป็นได้ของแต่ละปัญหา

2. ประชากรเริ่มต้น (Initial population) คือ ประชากรต้นกำเนิดที่จะนำเข้าไปในกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม

3. ฟังก์ชั่นความเหมาะสม (Fitness function) ฟังก์ชันสำหรับประเมินค่าความเหมาะสมเพื่อให้คะแนนแต่ละทางเลือกของคำตอบ

4. ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic operator) ซึ่งใช้ในการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของข้อมูลตลอดกระบวนการ ได้แก่ การคัดเลือก การข้ามพวก และการกลายพันธุ์

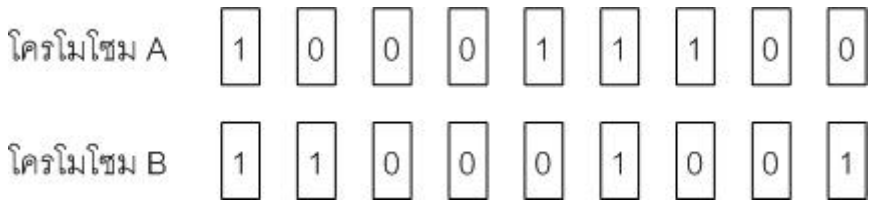
5. ตัวแปรป้อนเข้า (Input parameters) ตัวแปรป้อนเข้าที่สำคัญที่ต้องกำหนดให้ GA ได้แก่ ขนาดของประชากร (Population size, N) ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก (Crossover probability, Pc) ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability, Pm) และจำนวนรุ่นของการวิวัฒนาการ

6. เงื่อนไขในการหยุดกระบวนการหาคำตอบ ซึ่งมีหลากหลายวิธี ดังจะการอธิบายถึงองค์ประกอบแต่ละส่วน ดังต่อไปนี้

การเข้ารหัสของโครโมโซม

การเข้ารหัสหรือการได้มาซึ่งโครโมโซม คือปัญหาแรกที่จะเริ่มแก้ปัญหาโดยใช้ GA ในการเข้าหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหา และในปัจจุบันปัญหามีมากมายจึงทำให้รูปแบบของโครโมโซมมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้น ๆ เช่น

การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary encoding) เป็นรูปแบบโครโมโซมเริ่มแรกที่นำมาใช้แก้ปัญหา จึงทำให้รูปแบบโครโมโซมแบบนี้เป็นเรื่องธรรมดาที่สุด ลักษณะของการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง คือ ทุกตำแหน่งของยีนของโครโมโซมจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง

มีงานวิจัยจำนวนมากในหลายสาขาที่ใช้ GA ที่เข้ารหัสแบบเลขฐานสองในการแก้ปัญหาดังปัญหาทางด้านวิศวกรรม เช่น Wang (2008) ใช้ในการเลือกส่วนประกอบที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต Poursamad (2007) ใช้ในการปรับค่าของ Fuzzy logic ในการควบคุมรถยนต์

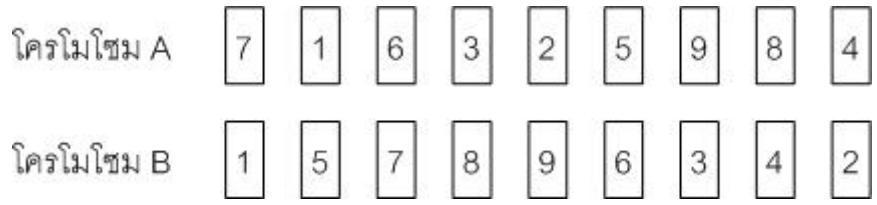
Hybrid ให้มีสมรรถนะที่ดีในขณะที่ประหยัดพลังงานและมลภาวะต่ำ Zhang *et .al.* (2007) ใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของ ANN ในการแก้ปัญหาการจำแนกรายมือ Worden *et al.* (2008) ใช้ในการหาตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นบนใบพัดเครื่องบิน Carballido *et al.* (2007) ใช้ช่วยในการออกแบบเครือข่ายของระบบตรวจจับ (sensor network) Chen and Ji (2007) ใช้ในการแก้ปัญหา dynamic advanced planning scheduling (DAPS) ซึ่งปรากฏว่าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี Howe (2007) ใช้ในการช่วยหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบทางเข้าอุโมงค์ของรถไฟ Madadi and Balaji (2007) ใช้ในการสอน ANN เพื่อช่วยในการเลือกตำแหน่งการติดตั้งแหล่งความร้อน (heat source) ให้เหมาะสมที่สุด Baghmisheh *et al.* (2007) ใช้ในการหาตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายในคาน Cho and Rowlands (2007) ใช้ในการช่วยลด tensile stress ในวัสดุ Valdevit *et al.* (2006) ใช้หาความสามารถในการลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กคู่ที่ตรงการบรรจุแก้วทรงปรึซึม Gholap and Khan (2007) ใช้ในการช่วยออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำความเย็น Grady *et al.* (2005) ใช้หาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งกังหันลม Torbati *et al.* (2003) ใช้ในการช่วยออกแบบโครงสร้างของดาวเทียมเพื่อควบคุมความสั่นสะเทือนที่จะเกิดขึ้น Pina and Lima (2003) ใช้ในการควบคุมการทำงานของเตาเผาแก้วเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงสุด Gopal and Rao (2003) ใช้ในการเลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมเครื่องเจียรวัสดุ Lep and Sejnoha (2003) ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยต้องการลดต้นทุนให้น้อยที่สุด แต่ทุกส่วนจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ Liatsis and Tawfik (1999) ใช้ช่วยในการออกแบบรูปทรงของถนนแบบสองมิติให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด Baumal *et al.* (1998) ใช้ในการออกแบบระบบกันสะเทือนของรถยนต์ให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

ปัญหาทางด้านอื่น ๆ ที่มีผู้สนใจใช้ GA ที่เข้ารหัสแบบเสขฐานสองในการแก้ปัญหา เช่น Kim and Ahn (2008) ใช้ในการแบ่งกลุ่มทางการตลาด (Market segmentation) บนตลาดออนไลน์ Laszlo and Mukherjee (2007) ได้ประยุกต์ใช้ในการแบ่งกลุ่มฐานข้อมูลที่คล้ายคลึงกันให้อยู่กลุ่มเดียวกัน โดยได้พัฒนาวิธีการข้ามพวกแบบใหม่ขึ้นมาให้เหมาะสมกับปัญหา Juang *et al.* (2007) ใช้ในการจัดการแผนในการฝึกอบรมให้กับพนักงาน

นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่ผสมผสาน GA ที่เข้ารหัสแบบเสขฐานสองเข้ากับขั้นตอนวิธีการอื่น เช่น Hua and Chang (2008) ได้ปรับปรุงการเข้ารหัสแบบเลขฐานสองเพื่อแก้ปัญหา Production allocation โดยใช้กำหนดการเชิงพลวัตในการทำ Preprocessing เพื่อลดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ Boulif and Atif (2008) ได้นำเอา Fuzzy logic ผสานเข้ากับ GA โดยให้ Fuzzy logic ปรับค่า N, Pc

และ Pm ของ GA เพื่อให้ลู่เข้าหาคำตอบเร็วและได้ผลเฉลยที่ดี Cen (2007) ผสมผสาน GA กับ Oscillation search (OS) algorithm เรียกว่า OSGA เพื่อใช้ในการออกแบบ Frequency-response masking (FRM) โดย GA จะควบคุมกระบวนการในการออกแบบเพื่อให้ได้คำตอบที่ดี ส่วน OS ใช้ในแก้ไขค่าของโครโมโซมที่มีดีที่สุดในแต่ละรุ่น Mitsi *et al.* (2008) ผสาน GA เข้ากับ Hill climbing method ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่และมุมของแขนกล Parappagoudar *et al.* (2008) ใช้ GA ในการปรับน้ำหนักของ ANN ในการออกแบบแม่พิมพ์ เรียกว่า Genetic-neural network (GA-NN) ผลปรากฏว่าขั้นตอนวิธีการที่คิดค้นขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่า ANN แบบเดิม Huang and Hung. (2008) ผสมผสาน GA เข้ากับ ANN ในการลดการผิดรูปของวงจรฮาร์ดดิสค์ขนาดเล็ก Cui *et al.* (2008) ผสมผสาน GA เข้ากับเครือข่ายประสาทเทียมในการเลือกชนิดของวัสดุในการประกอบรถยนต์ให้เหมาะสมที่สุด Roya *et al.* (2007) ได้พัฒนา Fuzzy simulation-based genetic algorithm (FSGA) เพื่อแก้ปัญหาการจัดเก็บสินค้า Chaibakhsh *et al.* (2007) ได้สร้างแบบจำลองการทำงานของหม้อต้มและใช้ GA ในการปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้หม้อต้มทำงานได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น Kim and Park (2007) ใช้ GA ช่วยในการควบคุมรอบการเดินเบาของเครื่องยนต์เบนซิน Khorsanda *et al.* (2007) ผสมผสาน GA เข้ากับ ANN เพื่อช่วยในการออกแบบโครงสร้างของคาน โดยใช้ ANN ในการทำให้โครโมโซมทุกตัวเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ และใช้ในการประมาณหาค่าความเหมาะสม El-Zonkoly (2005) ใช้ในการประเมินคุณภาพของกระแสไฟฟ้า Canyurt (2004) พัฒนาวิธีการที่เรียกว่า Genetic algorithm fatigue strength estimation model (GAFSEM) ในการแก้ปัญหาความล้าในวัสดุ Sarkar *et al.* (2003) ใช้ GA ช่วยในการวาดภาพจากจุด โดยได้แยกโครโมโซมออกมาเป็น 2 กลุ่ม เรียกว่า กลุ่มตัวผู้ และตัวเมีย เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา Pawar and Ganguli (2003) ได้ผสมผสาน GA เข้ากับ Fuzzy logic เพื่อช่วยในการหาตำแหน่งที่เสียหายของใบพัดเครื่องบินเฮลิคอปเตอร์ Chien and Chou (2001) ใช้ GA ร่วมกับ ANN ในการหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมของ 304 Stainless steel ประกอบด้วย ความเร็วในการตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัด Chiou and Lan (2001) เสนอวิธีการใช้ GA ในการแบ่งกลุ่มของข้อมูล

การเข้ารหัสแบบจัดลำดับ (Permutation encoding) รูปแบบโครโมโซมแบบนี้ใช้ในการลำดับของปัญหา ซึ่งนับเป็นการเข้ารหัสอีกแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมเช่นเดียวกับการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง เนื่องจากว่ามีความเหมาะสมกับปัญหาที่มีการจัดลำดับงาน เช่น ปัญหา TSP และปัญหาการจัดลำดับงาน (task ordering problem) เป็นต้น โดยในการเข้ารหัสแบบจัดลำดับนั้น ในแต่ละโครโมโซจะประกอบด้วยยีนที่แสดงถึงชุดของเลขจำนวนเต็มแทนลำดับของงาน ดังแสดงในภาพที่ 2

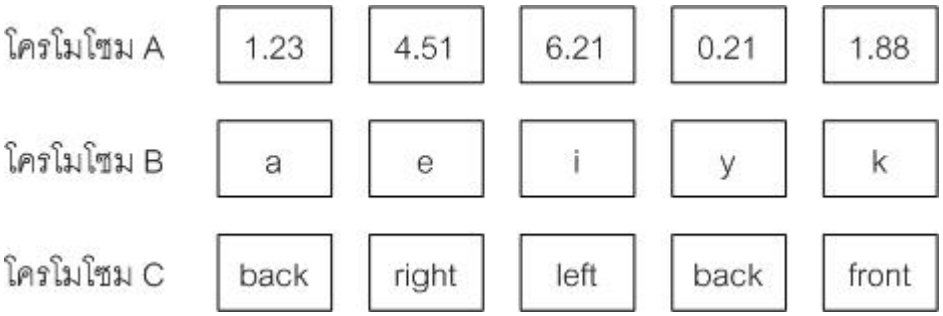


ภาพที่ 2 แสดงการเข้ารหัสแบบจัดลำดับ

งานวิจัยที่ใช้ GA ที่เข้ารหัสแบบจัดลำดับในการแก้ปัญหา เช่น Shiau *et al.* (2008) ได้พัฒนา GA ขึ้น เรียกว่า Hybrid constructive genetic algorithm (HCGA) โดยผสานเอาการค้นหาแบบทาบูเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ ทำให้คุณภาพของคำตอบดีขึ้น Chen *et al.* (2008) ได้พัฒนา Hybrid genetic algorithm โดยใช้วิธี local search หาประชากรเริ่มต้น ในการแก้ปัญหา Flow-shop scheduling problem ส่วน Marimuthua *et al.* (2008) ใช้ในการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักร Lee *et al.* (2008) ผสมผสาน GA เข้ากับ Ant colony optimization (ACO) ในการแก้ปัญหา Multiple sequence alignment (MSA) ซึ่งเป็นปัญหาเอ็นพีบริบูรณ์ โดย ACO ช่วยให้ GA ไม่ตกสู่ Local minima ส่วน Kripakaran *et al.* (2007) ใช้ในการหาต้นทุนที่ต่ำสุดของโครงเสาสะพาน โดยใช้ GA เป็น Preprocessing ให้ได้คำตอบที่ดีจากนั้นใช้วิธีการ Local search ที่พัฒนาขึ้นในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด Abadeh *et al.* (2007) ได้พัฒนา Parallel genetic local search algorithm (PAGELS) ในการค้นหาผู้บุกรุกในระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ Cheng (2007) ได้ผสมผสาน GA เข้ากับ ANN เพื่อวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง Ho *et al.* (2007) ได้ปรับปรุง GA เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา VRP โดยสร้างกลุ่มของประชารเริ่มต้นด้วย Saving algorithm และใช้ Nearest neighbor heuristic ช่วยในการจัดลำดับการขนส่ง Balakrishnana *et al.* (2003) ได้พัฒนา GA แบบผสมผสานในการแก้ปัญหา Dynamic plant layout problem (DPLP) โดยใช้กำหนดการเชิงพลวัตในการสร้างประชากรเริ่มต้นที่ดี และมีการแบ่งกลุ่มในโครโมโซม Zhou *et al.* (2003) ใช้ในการแก้ปัญหาในการกำหนดลูกค้าให้กับแต่ละคลังสินค้า Kaveh and Bondarabadyb (2003) พัฒนาการ Hybrid graph-genetic ขึ้นมาโดยปรับปรุงเข้ารหัสแบบจัดลำดับเพื่อใช้ในการสร้าง Mesh ของ Finite element ทางด้าน Chang *et al.* (2003) ใช้ในการแก้ปัญหา Biaxially oriented polypropylene film (BOPP) เพื่อลดค่าความเบี่ยงเบนและเวลาในการติดตั้งให้น้อยที่สุด Duan and Yu (2003) ได้พัฒนา Genetic shortest-path algorithm ขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการเดินสายไฟฟ้าให้สิ้นเปลืองน้อยที่สุด Mawdesleya and Al-Jibouri (2003) ใช้ช่วยในการออกแบบผังโรงงาน โดยได้พัฒนาวิธีการข้ามพวกและกลายพันธุ์ขึ้นมาใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหา Ahuja *et al.* (2000) พัฒนา Greedy genetic algorithm ขึ้นเพื่อแก้ปัญหา Quadratic assignment problem (QAP) ซึ่งได้พัฒนาการข้ามพวกและการ

กลายพันธุ์แบบใหม่ขึ้น Liaw (2000) ผสม GA เข้ากับวิธีการ Tabu search (TS) เรียกว่า Hybrid genetic algotithm (HGA) เพื่อแก้ปัญหา Open shop scheduling problem โดยใช้ความสามารถของวิธีการ TS ในการป้องกันไม่ได้ตกเข้าสู่ค่าต่ำสุดเฉพาะจุด (Local minima) Ostermark (1999) ผสมผสาน GA เข้ากับวิธีการ Nonlinear integer programming เป็นวิธีการใหม่เรียกว่า Genetic hybrid algorithm (GHA) เพื่อแก้ปัญหา Trim loss problem ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ Gong *et al.* (1999) ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตำแหน่งของเครื่องจักรแบบมิติเดียว โดยเทียบผลที่ได้กับวิธีการอื่น พบว่า GA ให้ผลที่ดีที่สุด

การเข้ารหัสแบบแทนค่า (Value encoding) ใช้สำหรับปัญหาที่ต้องการค่าที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น ทุกตำแหน่งของยีนของโครโมโซมจะมีค่าบางค่าซึ่งสามารถเชื่อมโยงไปยังปัญหาได้ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง คำสั่ง หรืออื่นๆ รูปแบบ หรืออื่นๆ รูปแบบโครโมโซมแบบนี้สามารถใช้ได้กับปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อนของค่า ตัวอย่างเช่น



ภาพที่ 3 แสดงการเข้ารหัสแบบแทนค่า

งานวิจัยที่ใช้ GA ที่เข้ารหัสแบบแทนค่าในการแก้ปัญหา เช่น Bruno *et al.* (2008) ใช้ในการควบคุมค่าความผิดพลาดของกระบวนการหา Elastic properties ของวัสดุ ให้มีค่าน้อยที่สุด Epstein and Peigin (2007) ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบปีกของใบพัดเครื่องบิน Suresh *et al.* (2007) ได้ใช้ Particle swarm optimization (PSO) และ GA ในการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบใบพัดของเฮลิคอปเตอร์ Das and Konar (2007) ได้ใช้ PSO และ GA ในการลดสัญญาณรบกวนของภาพถ่าย Begum *et al.* (2008) ผสมผสาน GA กับ Fuzzy logic ในการควบคุมการเดินทางของหุ่นยนต์ Silva *et al.* (2008) ใช้ GA ในการออกแบบเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ โดยใช้ ANN เข้ามาช่วยทำให้ GA หาคำตอบได้เร็วขึ้น Zhang *et al.* (2008) ผสมผสาน ANN และ GA รวมทั้ง PSO ในการแก้ปัญหาการจัดวางอุปกรณ์และสิ่งของในดาวเทียม Chu *et al.* (2008) ผสมผสาน GA กับ Fuzzy

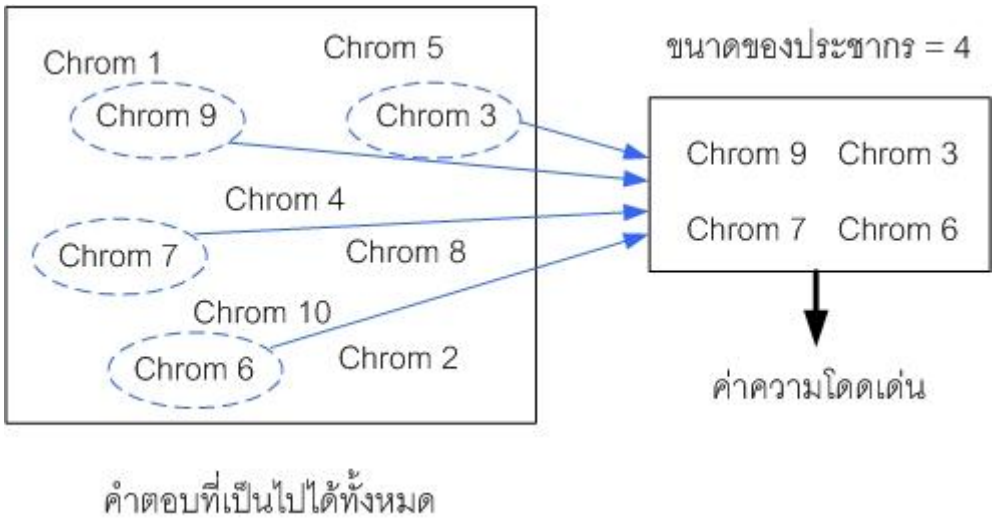
logic ในการออกแบบการระบายอากาศในอุโมงค์ Hilmann *et al.* (2007) ใช้ในการออกแบบตัวถังรถโดยสารให้เหมาะสมที่สุด Affi *et al.* (2007) ใช้ในการช่วยออกแบบระบบทาง Mechatronic ส่วน Wu *et al.* (2007) ใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Shahrokhi and Jahangirian (2007) ใช้ในการออกแบบปีกเครื่องบิน He and Hwang. (2007) ผสมผสาน GA เข้ากับ SA ในการหาตำแหน่งความเสียหายของเปลือกลามิเนตทรงกลม โดยปรับปรุงการกลายพันธ์และการข้ามพวกด้วย SA ส่วน Chen and Hsiao (2007) ผสมผสาน GA เข้ากับ Support vector machine (SVM) ในการวิเคราะห์ช่วงวิกฤตของธุรกิจ โดยใช้ GA ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการสอน SVM ในการจำแนกข้อมูล Geroa *et al.* (2006) ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง 3 มิติให้มีค่าเหมาะสมที่สุด Samanta (2004) ใช้ GA ร่วมกับเครือข่ายประสาทเทียมและ SVM ในการตรวจจับหาตำแหน่งเสียหายของเกียร์ Zhang *et al.* (2004) ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ของผนังอาคาร Brisa *et al.* (2003) ใช้ในการลดต้นทุนในการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance) ให้ต่ำที่สุด Chen and Feng (2003) ใช้ในการสร้างแบบจำลองของวัตถุ 3 มิติ จากแบบ 2 มิติ Yoshimoto *et al.* (2003) ใช้ในการวาดกราฟของการเจาะรูสลัก Wang (2003) ใช้ในการจัดตารางสอน Gomez *et al.* (2003) ใช้ GA ในการวางผังตำแหน่งการทำงานในโรงงานโดยมีช่องทางเดินคั่นกลาง Burguburu and Pape (2003) ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมทางอากาศพลศาสตร์ในการออกแบบใบพัดของเครื่องยนต์เทอร์โบ Muhl *et al.* (2003) ใช้ในการช่วยออกแบบขั้นตอนในการทำงานของโรงงานประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ Ko and Cheng (2003) ได้ผสมผสาน GA เข้ากับ Fuzzy logic และ ANN ในการแก้ปัญหาการบริหารงานก่อสร้าง โดยเรียกขั้นตอนวิธีการใหม่ว่า Evolutionary fuzzy neural inference Model (EFNIM) ซึ่งใช้ GA ช่วยในการหาค่า Membership function ที่เหมาะสมที่สุด

การเข้ารหัสแบบอื่น นอกจากการเข้ารหัสทั้ง 4 ดังกล่าว ยังมีงานวิจัยที่ได้พัฒนาการเข้ารหัสแบบใหม่ ได้แก่ Yang *et al.* (2008) พัฒนา Generalized chromosome genetic algorithm (GCGA) ขึ้น โดยปรับปรุงการเข้ารหัส แบ่งโครโมโซมออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัว (Head) และส่วนตัว (Body) เพื่อแก้ปัญหา TSP ส่วน Carter and Ragsdale (2006) ได้นำเสนอวิธีการเข้ารหัสแบบใหม่สำหรับการแก้ปัญหา Multiple traveling salesperson problem (mTSP) โดยแบ่งการเข้ารหัสแบบจัดลำดับออกเป็นช่วง ๆ ด้วยเลขจำนวนเต็มลบที่หมายถึงพนักงานขายแต่ละคน Wang and Ghosn (2005) พัฒนา GA ที่ใช้การเข้ารหัสแบบใหม่ที่เรียกว่า Gene expression messy genetic algorithm (GEMGA) ที่มีตัวเลขที่ใช้เข้ารหัส 3 ประเภท คือ 0, 1 และ -1 ใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง Acosta and Todorovich (2003) ได้ผสมผสาน GA เข้ากับ Fuzzy logic โดยสร้างการ

เข้ารหัสแบบใหม่ที่เรียกว่า Hierarchical genetic algorithms (HGA) ซึ่งในโครโมโซมจะมีตัวเลขฐานสอง 1 ชุดเป็นส่วนควบคุมและจำนวนต็มหนึ่งชุดเป็นตัวแปรทำงาน เพื่อใช้แก้ปัญหาการควบคุมเครื่องจักรต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรม Kwon *et al.* (2003) ได้พัฒนา Successive zooming genetic algorithm (SZGA) ขึ้น โดยปรับปรุงการเข้ารหัสด้วย Zooming factor เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบต่อเนื่อง Angelov and Buswell (2003) ได้คิดค้นวิธีการเข้ารหัสแบบใหม่ โดยอาศัย Ffuzzy rule เข้ามาช่วย โดยโครโมโซมจะถูกแบ่งออกเป็นหลายส่วน ในแต่ละส่วนจะเข้ารหัสแบบแทนค่าที่แตกต่างกัน เหมาะสมกับปัญหาที่มีความซับซ้อนจนการเข้ารหัสแบบเดิมไมสามารถใช้ได้ Abboud *et al.* (1998) ผสมผสานการเข้ารหัสแบบ GA เข้ากับวิธีการ Simulated annealing (SA) เพื่อแก้ปัญหาการจัดกำลังคน (Manpower allocation problem)

ประชากรเริ่มต้น

เป็นการกระทำอันดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของ GA ประชากรที่เกิดจากการสุ่ม (Random) เพื่อนำประชากรเข้าไปในกระบวนการ ในการสุ่มจะต้องสุ่มให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดของประชากรที่ได้กำหนดไว้ โดยที่ยังไม่มีการสนใจค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ดังแสดงในภาพที่ 4

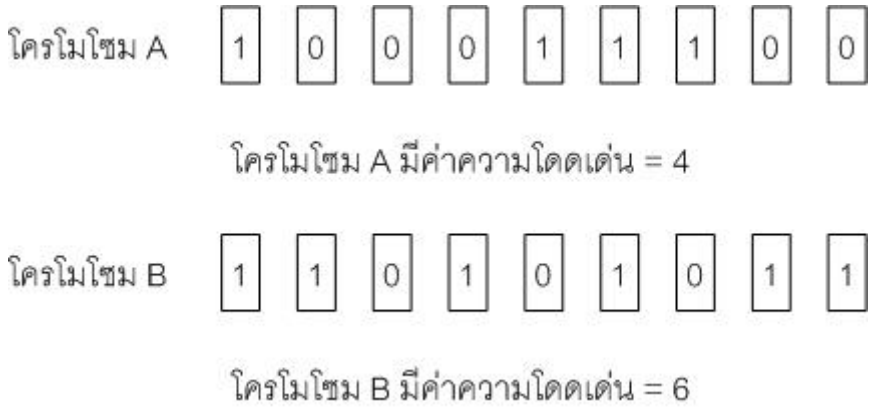


ภาพที่ 4 แสดงการสุ่มหาประชากรเริ่มต้น

ฟังก์ชั่นความเหมาะสม

โครโมโซมทุกตัวจะต้องมีค่าซึ่งบ่งบอกถึงความเหมาะสมที่จะพิจารณาว่าสมควรนำไปสืบสายพันธุ์ต่อหรือไม่สมควร ดังนั้นจึงต้องมีการให้ค่าความเหมาะสมกับแต่ละโครโมโซมเพื่อนำค่าความเหมาะสมไปพิจารณา โดยใช้สมการหาค่าความเหมาะสมสอดคล้องกับปัญหา สรุปได้ว่าค่าความเหมาะสม คือตัวที่ใช้ประเมินว่าแต่ละคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution) นั้น มีความเหมาะสม หรือสามารถใช้แก้ปัญหาได้ดีเพียงใด

ตัวอย่างของฟังก์ชันหาค่าความเหมาะสม เช่น กำหนดให้ค่าความเหมาะสม = จำนวนของยีนที่มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมดในโครโมโซม ดังแสดงในภาพที่ 5



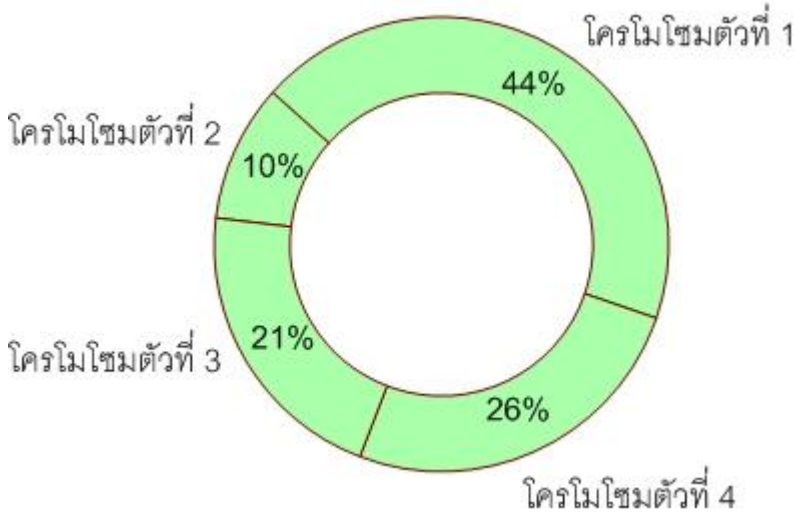
ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างการหาค่าความเหมาะสม

ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม

กล่าวได้ว่าตัวดำเนินการทางพันธุกรรมเป็นหัวใจสำคัญของ GA ซึ่งมี กระบวนการพื้นฐานที่สำคัญ มี 3 ส่วน ได้แก่ การคัดเลือก การข้ามสายพวกและการกลายพันธุ์

การคัดเลือก ในการคัดเลือกโครโมโซมเพื่อที่จะนำมาเป็นพ่อแม่ในการสืบสายพันธุ์ (Parent) ทำให้เกิดปัญหาว่าจะทำอย่างไรให้เกิดจากคัดเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจเพื่อที่จะเกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตตามทฤษฎีของ Charles Darwin จึงทำให้เกิดรูปแบบมากมายในการเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจที่สุดเพื่อนำไปสืบสายพันธุ์ เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชค (Roulette

wheel) การคัดเลือกแบบจัดลำดับ (Ranking) การคัดเลือกแบบทัวร์นาเม้นท์ (Tournament) การคัดเลือกแบบผู้เข้มแข็งอยู่รอด (Elitist) การคัดเลือกแบบคงสภาวะตัว (Steady-state) และอื่นๆ อีกมากมายหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการคัดเลือกโครโมโซมที่ดี ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 แบบเท่านั้น คือ การคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชคคือ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่ามีโอกาสถูกเลือกมากกว่า อธิบายได้จากภาพที่ 6 ดังต่อไปนี้ เมื่อแสดงถึงวงล้อเสี่ยงโชคที่โครโมโซมทั้งหมดอาศัยอยู่ ขนาดพื้นที่ของวงล้อเสี่ยงโชคคือสัดส่วนของค่าความเหมาะสมของทุกโครโมโซม ค่าที่มากที่สุดคือส่วนที่ใหญ่ที่สุด เมื่อมีการหมุนวงล้อ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสถูกเลือกสูงและบ่อย

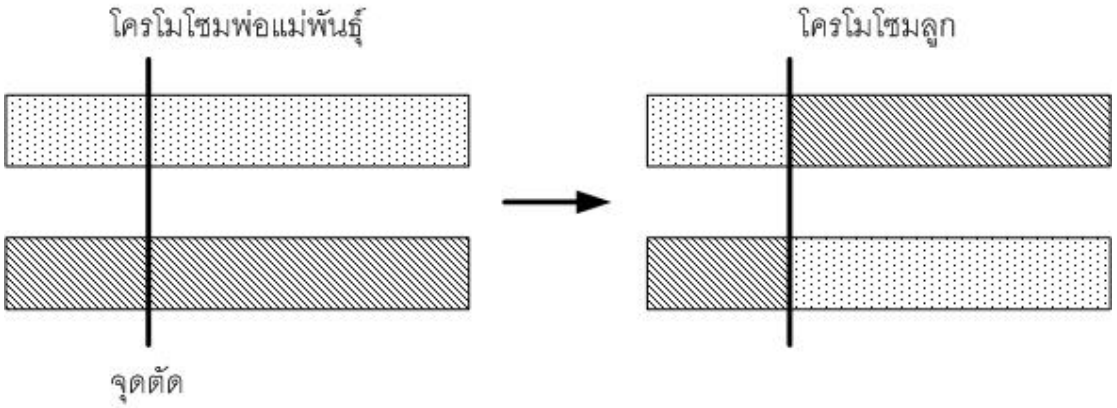


ภาพที่ 6 แสดงการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชค

ส่วนการคัดเลือกแบบผู้เข้มแข็งอยู่รอดเป็นแนวคิดที่ป้องกันไม่ให้ของคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นการวิวัฒนาการหายไป หมายความว่ามีการคัดลอกโครโมโซมที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นไว้ก่อน ส่วนประชากรส่วนที่เหลือจะที่จะต้องคัดเลือกจะใช้วิธีการเลือกแบบอื่นๆ

การข้ามพวก เป็นกระบวนการที่สำคัญของ GA ซึ่งเมื่อเกิดการข้ามพวกขึ้นในทางพันธุศาสตร์แล้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายขึ้น ซึ่งการข้ามพวกจะต้องอาศัยกระบวนการวิวัฒนาการที่เป็นเวลานาน แต่ในทำนองเดียวกันในทางการแก้ปัญหา แล้วจะทำให้เกิดความหลากหลายของคำตอบ จึงสามารถเลือกเอาคำตอบที่เหมาะสมกับความต้องการได้มากที่สุด ขั้นตอนในการข้ามพวกคือนำโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ 2 ตัว มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่

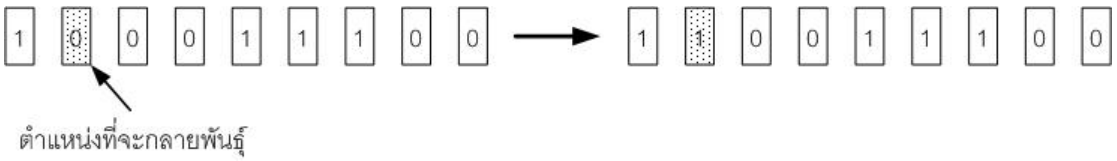
ขึ้นมา เรียกว่าโครโมโซมลูก (Offspring) จากนั้นใช้วิธีการที่ง่ายที่สุดคือ สุ่มตำแหน่งตัด (Cutting point) และทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่งจุดตัดของพ่อ และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งจุดตัดของแม่รวมกันจะได้โครโมโซมลูกตัวที่ 1 ออกมา จากนั้นทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่ง จุดตัดของแม่และคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่งจุดตัดของพ่อรวมกันจะได้โครโมโซมลูกตัวที่ 2 ออกมา ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงการข้ามพวก

การข้ามพวกที่แสดงเป็นตัวอย่างของการข้ามพวกแบบเดียวเท่านั้น ซึ่งที่จริงแล้วมีหลายแบบและจะแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบของการเข้ารหัสด้วย

การกลายพันธุ์ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นหลังจากการข้ามพวกเสร็จสิ้น นั่นหมายความว่าได้โครโมโซมรุ่นลูกที่เกิดจากผสมจากรุ่นพ่อแม่แล้ว จึงนำรุ่นลูกมาดำเนินการกลายพันธุ์ การกลายพันธุ์ในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ๆเกิดขึ้น และทำให้เกิดวิวัฒนาการ สำหรับการแก้ปัญหาแล้วการที่เกิดผลลัพธ์ในลักษณะที่แตกต่างออกไปจากเดิม การกลายพันธุ์จะทำหน้าที่ป้องกันข้อผิดพลาดของการที่คำตอบจะตกอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่ ขั้นตอนในการกลายพันธุ์นั้น เมื่อสุ่มได้ตำแหน่งการกลายพันธุ์แล้ว จะเปลี่ยนแปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่มนั้นใน เช่น ตัวอย่างการดำเนินการกับการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง จะมีการเปลี่ยนที่เป็นไปได้จาก 1 เป็น 0 หรือ จาก 0 เป็น 1 ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงการกลายพันธุ์

การกลายพันธุ์ที่แสดงเป็นตัวอย่างของการข้ามพวกแบบเดียวเท่านั้น ซึ่งที่จริงแล้วมีหลายแบบและจะแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบของการเข้ารหัสด้วย

ตัวแปรป้อนเข้า

ตัวแปรป้อนเข้าที่สำคัญหรือเป็นพื้นฐานของ GA มี 3 ตัว ได้แก่ ขนาดของประชากร (Population size) ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก (Crossover probability) และความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability)

ขนาดของประชากร หรือจำนวนของโครโมโซมในแต่ละรุ่น ถ้ามีจำนวนมากเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการประมวลผลมากและทำงานได้ช้าลงแต่มีแนวโน้มที่จะได้คำตอบที่ดีขึ้น หรือหากน้อยเกินไปก็จะทำให้การค้นหานั้นสามารถที่จะลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ช้าเกินไป (Chatterjee *et al.*, 2006)

ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก จะมีค่าที่อยู่ในช่วง 0 – 100 จากการทดลองของนักวิจัยหลายท่านได้พบว่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกส่วนใหญ่อยู่ที่ 60% - 95% (Coley, 1999) ถ้าหากไม่มีการข้ามพวก (0%) ผลที่ได้คือการทำสำเนาที่ถูกต้องจากพ่อแม่พันธุ์ แต่ถ้ามีการข้ามพวกเกิดขึ้นบ่อยจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่หลากหลาย ตัวอย่างการเกิดการข้ามพวก กำหนดให้ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก เป็น 85% ค่าที่สุ่มอยู่ในช่วง 0-100 นั่นหมายความว่าหากสุ่มตัวเลขได้ค่าไม่เกิน 85 ก็จะเกิดการข้ามพวกนอกจากนั้นจะไม่เกิดการข้ามพวก

ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ จะมีค่าที่อยู่ในช่วง 0 – 100 จากการทดลองของนักวิจัยหลายท่านได้พบว่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ ส่วนใหญ่อยู่ที่ 0% - 5% ต่อ 1 ตำแหน่งของโครโมโซม ถ้าไม่มีการกลายพันธุ์นั่นหมายความว่าผลที่ได้เกิดจากการข้ามพวกเพียงอย่างเดียว แต่

ถ้าหากมีการกลายพันธุ์ 100% จะทำให้โครโมโซมมีการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด ซึ่งการกลายพันธุ์ จะไม่เกิดบ่อยมากนักเพราะจะทำให้วิธีการ GA เปลี่ยนไปเป็นวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) (Coley, 1999) ตัวอย่างการเกิดการกลายพันธุ์ โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ เป็น 1% ค่าที่สุ่มอยู่ในช่วง 0 -100 นั่นหมายความว่า ณ ตำแหน่งนั้นหากสุ่มตัวเลขได้ค่าไม่เกิน 1 ก็จะเกิดการกลายพันธุ์

เงื่อนไขในการหยุดกระบวนการหาคำตอบ

ในการหยุดกระบวนการหาคำตอบของ GA นั้นมีได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น

1. ครบจำนวนรุ่นการวิวัฒนาการที่ได้กำหนดไว้

2. พบเป้าหมายหรือคำตอบที่ต้องการ

3. พบคำตอบที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการ เช่น โครโมโซมมีค่า ณ ตำแหน่งของยีนเดียวกันเหมือนกันถึงร้อยละ 95

ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย

ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ GA แก้ปัญหา TSP เพื่อหาคำตอบที่ดีของปัญหาภายในเวลาที่ยอมรับได้ (Carter and Ragsdale, 2006) ส่วนมากจะใช้วิธีการเข้ารหัสแบบจัดลำดับ ดังนั้นปัญหาที่ต้องแก้คือวิธีการข้ามพวกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ Chao *et al.* (2007) จึงมีวิธีการข้ามพวกจำนวนหลายวิธีถูกนำเสนอเพื่อแก้ปัญหา TSP โดยวิธีการที่ได้รับความนิยมประกอบด้วย วิธีการข้ามพวกแบบ order crossover (Goldberg, 1989; Davis, 1985; Starkweather *et al.*, 1991; Oliver *et al.*, 1987) วิธีการข้ามพวกแบบ Partially mapped crossover (Goldberg, 1989; Starkweather *et al.*, 1991; Goldberg and Lingle, 1985; Oliver *et al.*, 1987) วิธีการข้ามพวกแบบ Cycle Crossover (Goldberg, 1989; Starkweather *et al.*, 1991; Oliver *et al.*, 1987) วิธีการข้ามพวกแบบ Asexual crossover (Chatterjee *et al.*, 1996; Schmitt and Amini, 1998) วิธีการข้ามพวกแบบ Simple crossover (Knosala and Wal, 2001) วิธีการข้ามพวกแบบ Ordered crossover (Syswerda, 1989) และวิธีการข้ามพวกแบบ Moon crossover (Moon *et al.*, 2002)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ความเร็วในการประมวลผล 1800 MHz RAM 1 GB ระบบปฏิบัติการ Window XP

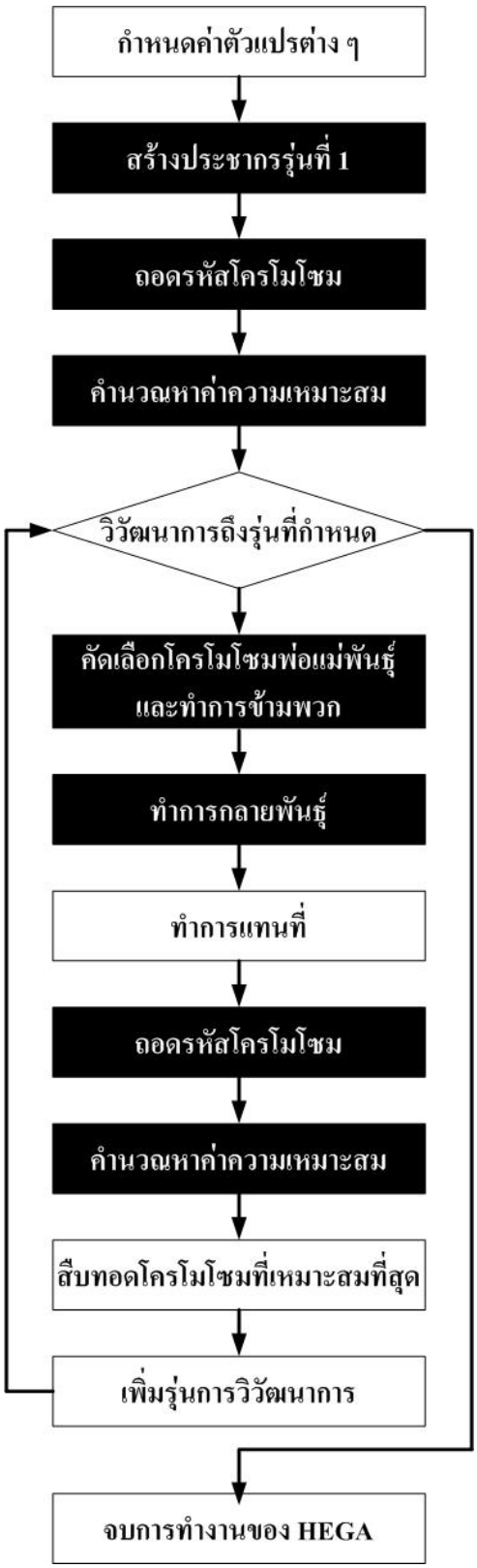
2. โปรแกรม Visual Basic version 6.0

วิธีการ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบเข้ารหัสผสม (Hybrid encoding genetic algorithm, HEGA) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีการที่พัฒนาขึ้นจากขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม เพื่อแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ (TSPMR) โดยขั้นตอนวิธีการ HEGA นี้จะเข้ารหัสแบบผสมผสานกันระหว่างเลขฐานสองและเลขจำนวนเต็มในโครโมโซมเดียวกัน โดยที่เลขฐานสองในโครโมโซมแสดงถึงจุดยอด ส่วนเลขจำนวนเต็มในโครโมโซมแสดงถึงเส้นเชื่อม ได้ใช้โปรแกรม Visual basic เวอร์ชั่นที่ 6 ในการเขียนขั้นตอนวิธีการ HEGA และขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการ HEGA ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งขั้นตอนที่ตัวอักษรเป็นสีขาวบนพื้นดำ หมายความว่า มีการปรับปรุงจากขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม ส่วนขั้นตอนที่ตัวอักษรเป็นสีดำบนพื้นขาว หมายความว่า ไม่ได้ปรับปรุงจากขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบดั้งเดิม

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ

ในการใช้ HEGA แก้ปัญหา TSPMR เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดของประชากร (Population size) ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก (Crossover probability, Pc) ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability, Pm) และจำนวนรุ่นของการวิวัฒนาการ (Generation) ซึ่งความหมาวของตัวแปรแต่ละตัว จะอธิบายในส่วนต่อไป



ภาพที่ 9 ขั้นตอนการทำงานของ HEGA

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

ประชากรเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัยการสุ่ม มีขนาดของประชากรตามที่กำหนด อยู่ในรูปเมทริกซ์ของประชากรซึ่งในตอนเริ่มต้นจะถูกแบ่งออกเป็นเมทริกซ์ของเส้นเชื่อมและเมทริกซ์ของจุดยอด

เมทริกซ์ของเส้นเชื่อมจะที่มีจำนวนแถวเท่ากับขนาดของประชากร และมีจำนวนหลักเท่ากับจำนวนเส้นเชื่อมคูณด้วยจำนวนการเข้ารหัสของแต่ละเส้นเชื่อม จะเท่ากับจำนวนการเข้ารหัสทั้งหมด แต่ละเส้นเชื่อมจะทำการเข้ารหัสเป็นเลขฐานสองจำนวน 3 ตัว ที่ได้จากการสุ่ม และสามารถแทนเส้นเชื่อมที่แตกต่างกันได้มากที่สุด 8 แบบ (2^3 แบบ) ถ้าจำนวนแบบของเส้นเชื่อมแตกต่างกันมากกว่า 8 แบบ ต้องเพิ่มจำนวนเลขฐานสอง โดยถ้าเพิ่มจำนวนเลขฐานสองเป็น 4 ตัว จะสามารถแทนเส้นเชื่อมที่แตกต่างกันได้มากที่สุด 16 แบบ (2^4 แบบ) ตัวอย่างเมทริกซ์ของเส้นเชื่อมเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

ส่วนเมทริกซ์ของจุดยอดจะมีจำนวนแถวเท่ากับขนาดของประชากร และมีจำนวนหลักเท่ากับจำนวนจุดยอด เช่น ในปัญหานี้มีจุดยอดจำนวน 3 จุดยอด ซึ่งจะไม่นับรวมจุดยอดเริ่มต้นและจุดยอดสิ้นสุด (ในที่นี้จะสมมติให้จุดยอดเริ่มต้นและจุดยอดสิ้นสุดเป็นจุดยอดเดียวกัน) การเข้ารหัสจะเป็นการเข้ารหัสแบบเลขจำนวนเต็ม ซึ่งตัวเลขจำนวนเต็มจะหมายถึงจุดยอดต่าง ๆ ตัวอย่างเมทริกซ์ของจุดยอดเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} \underline{2} & \underline{1} & \underline{3} \\ \underline{3} & \underline{2} & \underline{1} \\ \underline{3} & \underline{1} & \underline{2} \\ \underline{1} & \underline{3} & \underline{2} \end{bmatrix}$$

เมื่อนำเอาเมทริกซ์ของเส้นเชื่อมและเมทริกซ์ของจุดยอดมารวมกันจะกลายเป็นเมทริกซ์ของประชากร ซึ่งมีจำนวนแถวเท่ากับขนาดของประชากร และมีจำนวนหลักเท่ากับจำนวนของจุดยอด รวมกับจำนวนการเข้ารหัสทั้งหมด ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \underline{2} & 1 & 1 & 1 & \underline{1} & 0 & 1 & 0 & \underline{3} & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \underline{3} & 0 & 0 & 1 & \underline{2} & 0 & 0 & 0 & \underline{1} & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 1 & 0 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

แต่ละแถวของเมทริกซ์หมายถึงโครโมโซมแต่ละตัว โครโมโซมแต่ละตัวแทนคำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหา และมีความหมายเช่น โครโมโซมตัวที่ 1 แทนเส้นเชื่อมรหัส 1 0 0 ที่เชื่อมระหว่างจุดยอดที่ 0 ซึ่งคือจุดยอดเริ่มต้นและจุดยอดสุดท้าย กับจุดยอดที่ 2 เส้นเชื่อมรหัส 1 1 1 ที่เชื่อมระหว่างจุดยอดที่ 2 กับจุดยอดที่ 1 เส้นเชื่อมรหัส 0 1 0 ที่เชื่อมระหว่างจุดยอดที่ 1 กับจุดยอดที่ 3 เส้นเชื่อมรหัส 0 1 1 ที่เชื่อมระหว่างจุดยอดที่ 3 กับจุดยอดที่ 0 โดยทั้งนี้ในเมทริกซ์ของประชากรจะไม่มีจุดยอดที่ 0

หลังจากที่ได้ประชากรเริ่มต้นจากการสุ่มสร้างเมทริกซ์ของจุดยอดและเมทริกซ์ของเส้นเชื่อมแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการถอดรหัสโครโมโซม

ขั้นตอนที่ 2 การถอดรหัสโครโมโซม

จากเมทริกซ์ของประชากร จะเริ่มต้นการถอดรหัส (Decoding) ของโครโมโซม โดยจะถอดรหัสเส้นเชื่อมแต่ละเส้นจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบ (ในที่นี้เส้นเชื่อมแต่ละเส้นเข้ารหัสเป็นเลขฐานสองจำนวน 3 ตัว) ซึ่งวิธีการในการถอดรหัสจากเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบประกอบด้วย 2 ขั้นตอน เช่น ต้องการถอดรหัสเลขฐานสองจาก 1 0 0 เป็นจำนวนเต็ม จะได้ว่า

ขั้นที่ 1 เขียนกระจายตามค่าประจำหลักได้ดังนี้

$1\ 0\ 0 = (1 \times 2^2) + (0 \times 2^1) + (0 \times 2^0)$

ขั้นที่ 2 คำนวณค่าตามระบบเลขฐานสิบแล้วรวมเข้าด้วยกัน จะได้

$4 + 0 + 0 = 4$

เมื่อทำการถอดรหัสเสร็จสิ้น จะได้รูปเมทริกซ์ของจำนวนเต็ม ที่มีจำนวนแถวเท่ากับขนาดของประชากร และมีจำนวนหลักเท่ากับจำนวนเส้นเชื่อมรวมด้วยจำนวนจุดยอด ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 4 & \underline{2} & 7 & \underline{1} & 2 & \underline{3} & 3 \\ 3 & \underline{3} & 1 & \underline{2} & 0 & \underline{1} & 5 \\ 0 & \underline{3} & 6 & \underline{1} & 5 & \underline{2} & 3 \\ 6 & \underline{1} & 0 & \underline{3} & 7 & \underline{2} & 3 \end{bmatrix}$$

จากนั้นทำการถอดรหัสอีกครั้งหนึ่งเทียบกับจุดยอดต้นทางและปลายทาง เช่น ระหว่างจุดยอดประกอบด้วยเส้นเชื่อม 3 แบบ ซึ่งแต่ละแบบมีค่าถ่วงน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน จะกำหนดให้การถอดรหัสเป็นดังนี้ สำหรับเลขจำนวนเต็ม 0, 1 และ 2 จะถอดรหัสเป็นเส้นเชื่อมแบบที่ 1 เลขจำนวนเต็ม 3, 4 และ 5 จะถอดรหัสเป็นเส้นเชื่อมแบบที่ 2 และเลขจำนวนเต็ม 6 และ 7 จะถอดรหัสเป็นเส้นเชื่อมแบบที่ 3 ดังนั้นจะได้เป็นเมทริกซ์ของโครงข่าย ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 2 & \underline{2} & 3 & \underline{1} & 1 & \underline{3} & 2 \\ 2 & \underline{3} & 1 & \underline{2} & 1 & \underline{1} & 2 \\ 1 & \underline{3} & 3 & \underline{1} & 2 & \underline{2} & 2 \\ 3 & \underline{1} & 1 & \underline{3} & 3 & \underline{2} & 2 \end{bmatrix}$$

หลังจากที่ได้ทำการถอดรหัสจนกลายเป็นเมทริกซ์ของโครงข่ายแล้ว จะทำการคำนวณหาค่าความเหมาะสมในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาค่าจุดประสงค์

ขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณหาค่าจุดประสงค์ของแต่ละโครโมโซม โดยใช้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา ซึ่งในปัญหา TSPMR ต้องการค่าจุดประสงค์ที่ต่ำ จากนั้นจะได้เมทริกซ์ของค่าจุดประสงค์ ที่มีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนประชากร และจำนวนหลักเพียงหลักเดียว ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 46.7 \\ 34.5 \\ 32.3 \\ 27.9 \end{bmatrix}$$

จากเมทริกซ์ของค่าจุดประสงค์ ดังแสดงด้านบน พบว่าโครโมโซมตัวที่ 4 มีค่าจุดประสงค์น้อยที่สุด เท่ากับ 27.9 ซึ่งถือว่าเป็นโครโมโซมที่ดีที่สุด แต่ต้องทำการปรับแก้ค่าให้กลายเป็นค่าความเหมาะสม ซึ่งโครโมโซมตัวที่ดีที่สุดที่มีค่าจุดประสงค์น้อยที่สุดจะเป็นโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุด เพื่อจะได้มีโอกาสอยู่รอดสูงในรุ่นต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การปรับแก้เป็นค่าความเหมาะสม

เพื่อให้โครโมโซมที่ดีมีโอกาสสูงที่จะอยู่รอดในรุ่นต่อไป จึงต้องทำการปรับแก้ค่าจุดประสงค์เป็นค่าความเหมาะสม โดยใช้สมการในการปรับค่า ดังนี้

$$\text{Fitness value} = A \times (\text{Objective value}) + B$$

โดยที่ A = ค่าคงที่ กำหนดให้เท่ากับ -1

$B = 2 \times (\text{Mean objective value})$

จะได้เมทริกซ์ของค่าความเหมาะสม ที่มีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนประชากร และจำนวนหลักเพียงหลักเดียว ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 24.1 \\ 36.3 \\ 38.5 \\ 42.9 \end{bmatrix}$$

จากเมทริกซ์ของค่าความเหมาะสม ดังแสดงด้านบน พบว่าโครโมโซมที่ดีกว่า จะมีค่าความเหมาะสมที่มากกว่า ซึ่งจะทำให้มีโอกาศอยู่รอดในรุ่นต่อไปมากกว่า

เมื่อขั้นตอนในการสร้างประชากรเริ่มต้น จนถึงขั้นตอนในการปรับแก้ค่าความเหมาะสมเสร็จสิ้น จึงพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์และทำการข้ามพวก

กระบวนการวิวัฒนาการเริ่มต้นด้วยการคัดเลือกโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงเพื่อสืบทอดทางพันธุกรรม ใน HEGA เลือกใช้การคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชค โดยจะคำนวณหาค่าร้อยละของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว เช่น โครโมโซมทั้ง 4 ตัว มีค่าความเหมาะสมรวมเท่ากับ 141.8 ดังนั้นโครโมโซมตัวที่ 1 จะมีค่าความเหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 17 โครโมโซมตัวที่ 2 จะมีค่าความเหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 25 โครโมโซมตัวที่ 3 จะมีค่าความเหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 27 และโครโมโซมตัวที่ 4 จะมีค่าความเหมาะสมคิดเป็นร้อยละ 31

จากนั้นกำหนดให้โครโมโซมตัวที่ 1 มีค่าในวงล้อเสี่ยงโชคระหว่าง 0-17 โครโมโซมตัวที่ 2 มีค่าในวงล้อเสี่ยงโชคระหว่าง 18-42 โครโมโซมตัวที่ 3 มีค่าในวงล้อเดิมเดิมพันระหว่าง 43-69 และโครโมโซมตัวที่ 4 มีค่าในวงล้อเสี่ยงโชคระหว่าง 70-100 ดังแสดงในภาพที่ 10

ภาพที่ 10 ภาพแสดงวิธีการคัดเลือกแบบวงล้อเสี่ยงโชคในขั้นตอน HEGA

แล้วทำการสุ่มตัวเลขจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่าง 0-100 มา 1 ตัว เช่น ได้ค่าเท่ากับ 25 หมายความว่าโครโมโซมตัวที่ 2 จะถูกเลือกเป็นโครโมโซมพ่อพันธุ์ แล้วสุ่มตัวเลขจำนวนเต็มอีกครั้งหนึ่ง เช่น สุ่มได้ค่าเท่ากับ 77 หมายความว่าโครโมโซมตัวที่ 4 จะถูกเลือกเป็นโครโมโซมแม่พันธุ์ ดังตัวอย่างเช่น

0 1 1 3 0 0 1 2 0 0 0 1 1 0 1
1 1 0 1 0 0 0 3 1 1 1 2 0 1 1

ต่อด้วยการทำการข้ามพวก โดยทำการสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0-1 ออกมา 1 ตัว เทียบกับค่าโอกาสในการข้ามพวก (Pc) ที่กำหนด เช่น กำหนดค่า Pc เท่ากับ 0.70 และสุ่มตัวเลขออกมาได้เท่ากับ 0.57 ซึ่งค่าที่สุ่มออกมาได้น้อยกว่าค่า Pc ดังนั้นจะเกิดการข้ามพวก โดยใน HEGA เลือกใช้การข้ามพวกแบบจุดตัดเดียว (One-point crossover) ซึ่งจะสุ่มเลือกจุดตัดขึ้นมาหนึ่งจุด ดังตัวอย่างเช่น

0 1 1 3 0 0 1 2 0 | 0 0 1 1 0 1
1 1 0 1 0 0 0 3 1 | 1 1 2 0 1 1

แล้วทำการแลกเปลี่ยนเฉพาะยีนส์ของเลขฐานสองที่อยู่หลังจุดตัด โดยยีนส์ของเลขจำนวนเต็มไม่เกิดการแลกเปลี่ยน ดังตัวอย่างเช่น

0 1 1 3 0 0 1 2 0 | 1 1 1 0 1 1
1 1 0 1 0 0 0 3 1 | 0 0 2 1 0 1

จะได้โครโมโซมลูกที่เกิดขึ้นใหม่ 2 ตัว จากนั้นจะทำการสุ่มเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ออกมาอีกหนึ่งคู่ด้วยวิธีการคัดเลือกดังกล่าว เช่น สุ่มได้โครโมโซมตัวที่ 1 และตัวที่ 4 ดังตัวอย่างเช่น

1 0 0 2 1 1 1 1 0 1 0 3 0 1 1
1 1 0 1 0 0 0 3 1 1 1 2 0 1 1

สุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 -1 ออกมา 1 ตัว เทียบกับค่าอัตราการข้ามพวก (Pc) ที่กำหนด เช่น กำหนดค่า Pc เท่ากับ 0.70 และสุ่มตัวเลขออกมาได้เท่ากับ 0.89 ซึ่งค่าที่สุ่มออกมาได้มากกว่าค่า Pc ดังนั้นจึงไม่เกิดการข้ามพวก

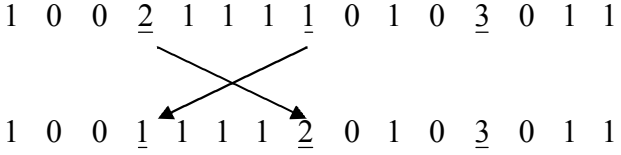
การคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์และทำการข้ามพวกจะดำเนินไปจนกระทั่งขนาดของประชากรคงที่ ซึ่งจะต้องทำการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์เท่ากับ 0.5 x Population size ครั้ง จนได้เมทริกซ์ของการข้ามพวก ที่มีขนาดเท่ากับเมทริกซ์ของประชากร ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \underline{3} & 0 & 0 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 & \underline{1} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 0 & 0 & \underline{2} & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \underline{2} & 1 & 1 & 1 & \underline{1} & 0 & 1 & 0 & \underline{3} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนของการกลายพันธุ์

ขั้นตอนที่ 6 การกลายพันธุ์

จากเมทริกซ์ของการข้ามพวกที่ได้หลังจากการคัดเลือกและข้ามพวกแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการในขั้นต่อไปคือการกลายพันธุ์ ซึ่งจะดำเนินการที่ละโครโมโซม โดยทำการสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 -1 ออกมา 1 ตัว เทียบกับค่าโอกาสในการกลายพันธุ์ (Pm) ที่กำหนด เช่น กำหนดค่า Pm เท่ากับ 0.10 และสุ่มตัวเลขออกมาได้เท่ากับ 0.05 ซึ่งค่าที่สุ่มออกมาได้น้อยกว่าค่า Pm ดังนั้นจะเกิดการกลายพันธุ์ โดยใน HEGA เลือกใช้การกลายพันธุ์แบบสลับค่า (Exchange mutation) ซึ่งจะสุ่มเลือกยีนส์ของจุดยอดมา 2 ตัว แล้วทำการสลับค่ากัน ดังตัวอย่างเช่น



ถ้าโครโมโซมตัวใดสุ่มค่าตัวเลขออกมาได้มากกว่าค่า Pm โครโมโซมตัวนั้นจะไม่ต้องผ่านการกลายพันธุ์ ซึ่งสมมติให้เกิดการกลายพันธุ์ที่โครโมโซมตัวที่ 3 เพียงตัวเดียว เสร็จแล้วจะได้เมทริกซ์ของการกลายพันธุ์ ที่มีขนาดเท่ากับเมทริกซ์ของประชากร ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \underline{3} & 0 & 0 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 & \underline{1} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 0 & 0 & \underline{2} & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \underline{1} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 0 & \underline{3} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

หลังจากที่ประชากรผ่านกระบวนการวิวัฒนาการต่าง ๆ ได้แก่ การคัดเลือกโครโมโซมที่เข็มแข็งให้อยู่รอดในรุ่นต่อไป แล้วทำการข้ามพวกและกลายพันธุ์ จากนั้นจะทำการถอดรหัสโครโมโซมแล้วหาค่าความเหมาะสมตามวิธีการที่แสดงมาขั้นต้น กระบวนการวิวัฒนาการอย่างสุดท้ายคือการสืบถอดโครโมโซมที่ดีที่สุดจากประชากรรุ่นก่อนมาสูงประชากรรุ่นต่อมา ดังขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 7 การสืบถอดโครโมโซมที่ดีที่สุด

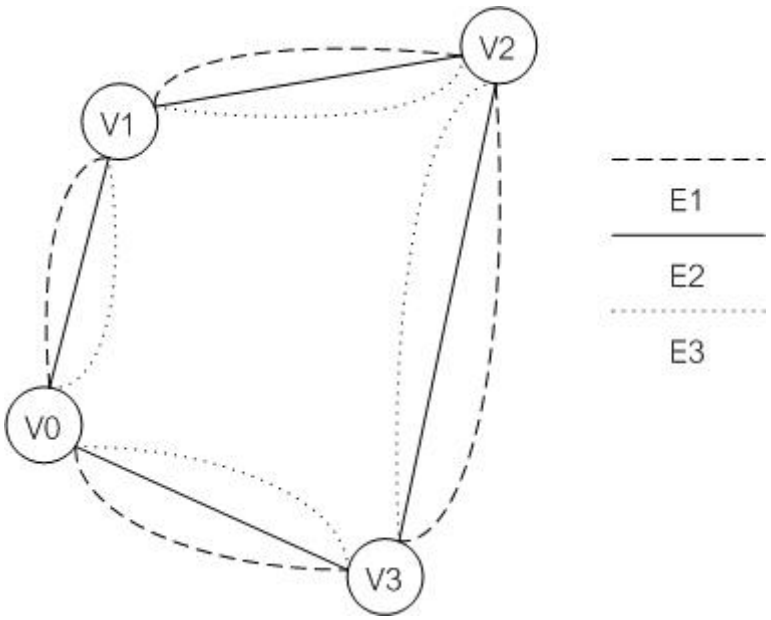
เพื่อรักษาให้โครโมโซมที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นสามารถที่จะอยู่รอดไปยังประชากรรุ่นต่อไป ใน HEGA จะกำหนดให้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดในประชากรรุ่นก่อน อยู่รอดโดยอัตโนมัติไปยังประชากรรุ่นต่อไป โดยจะทำการสุ่มว่าโครโมโซมที่เหมาะสมที่สุดจากรุ่นก่อนจะแทนที่โครโมโซมตัวใด เช่น โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดของรุ่นก่อนคือโครโมโซมตัวที่ 4 และทำการสุ่มเลือกได้หมายเลข 2 ซึ่งคือโครโมโซมตัวที่ 2 ในเมทริกซ์ของการกลายพันธุ์ หมายความว่าโครโมโซมตัวที่ 2 ในเมทริกซ์ของการกลายพันธุ์ จะถูกแทนที่ด้วยโครโมโซมตัวที่ 4 จากรุ่นที่แล้ว ซึ่งจะกลายเป็นประชากรในรุ่นต่อไป ดังตัวอย่างเช่น

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & \underline{3} & 0 & 0 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 & \underline{1} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \underline{1} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 0 & \underline{3} & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & \underline{1} & 0 & 0 & 0 & \underline{3} & 1 & 1 & 1 & \underline{2} & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

จากนั้นเมทริกซ์ของประชากรที่ได้จะเข้าสู่วิวัฒนาการในรุ่นต่อไป และจะวิวัฒนาการไปจนกระทั่งถึงรุ่นที่กำหนด จึงจบการทำงานของ HEGA

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์

ปัญหาการ TSPMR เป็นปัญหาที่ปรับปรุงขึ้นจากปัญหา TSP ทั่วไป มีลักษณะเป็นปัญหาโครงข่ายที่มีจุดยอด (Vertices, V) และเส้นเชื่อม (Edge, E) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะสุ่มสร้างจุดยอดที่มีพิกัด (X, Y) ขึ้น เท่ากับจำนวนจุดยอดที่กำหนด การเดินทางจะเริ่มจากจุดยอดเริ่มต้น (V_0) ไปยังทุกจุดยอด จุดยอดละ 1 ครั้ง แล้วสุดท้ายกลับมายังจุดยอดเริ่มต้น จุดประสงค์เพื่อให้ต้นทุนในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งเหมือนกับปัญหา TSP ทั่วไป แต่สิ่งที่ปรับปรุงคือปัญหา TSPMR จะมีเส้นเชื่อมระหว่างแต่ละจุดยอดได้หลายแบบ คล้ายคลึงกับปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบอสมมาตร (Asymmetric traveling salesman problem, ATSP) แต่ปัญหา ASTSP จะมีเส้นเชื่อมแค่ 2 แบบเท่านั้น (Kwon *et al.*, 2005; Righini and Trubian, 2004; Choi *et al.*, 2003) ในขณะที่ปัญหา TSPMR มีเส้นเชื่อมได้แบบไม่จำกัดจำนวน และค่าถ่วงน้ำหนักของเส้นเชื่อมแต่ละแบบยังสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาด้วย ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างปัญหา TSPMR

ตัวอย่างเช่น ปัญหา TSPMR ดังแสดงในภาพที่ 11 ที่มีเส้นทางเดินจากจุดยอดเริ่มต้น (V0) ไปยังจุดยอดที่ 1 (V1) จุดยอดที่ 2 (V2) จุดยอดที่ 3 (V3) แล้วกลับไปยังจุดยอดเริ่มต้น (V0) แต่ละจุดยอดจะเชื่อมด้วยเส้นเชื่อม 3 แบบ คือ เส้นเชื่อม E1, E2 และ E3 ซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน

เริ่มต้นด้วยทำการหาระยะขจัดระหว่างจุดยอด หรือเรียกว่าระยะยูคลิเดียน (Euclidean distance) เช่น ระยะขจัดระหว่างจุดยอดที่ i และ j (Cij) หาได้จากสมการ

$$Cij = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

สมมติว่าระยะขจัดระหว่างจุดยอดที่ i และจุดยอดที่ j เท่ากับระยะ B จะกำหนดให้เส้นเชื่อม E1 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.5 เท่าของ B เส้นเชื่อม E2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ B และเส้นเชื่อม E2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1.5 เท่าของ B แต่เมื่อการเดินทางผ่านไปครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอดทั้งหมดแล้ว กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักของเส้นเชื่อมเปลี่ยนแปลง โดยให้เส้นเชื่อม E1 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1.5 เท่าของ B เส้นเชื่อม E2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.5 เท่าของ B และเส้นเชื่อม E2 มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ B ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดขึ้นนี้จำลองจากเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงในปัญหาการขนส่ง เช่น สภาพถนน สภาพการจราจร เส้นทางที่เป็นไปได้ เป็นต้น

ปัญหาที่สามารถประยุกต์ใช้งานจากปัญหาข้างต้นที่พัฒนาขึ้นได้โดยตรงคือ ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบกำหนดสภาพการจราจร (Vehicle Rrouting problem with traffic conditions, VRPTC) ส่วนปัญหาที่ต้องแปลงปัญหาให้เป็นปัญหา TSPMR เพื่อหาคำตอบ เช่น ปัญหาโครงข่ายท่อส่งน้ำ (Water distribution network) และปัญหาโครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger network) เป็นต้น

วิธีการในการวิจัย

1. กำหนดปัญหา TSPMR เป็น 14 ปัญหาที่มีจุดยอดจำนวนน้อยถึงมาก ได้แก่ 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 และ 3,000 จุดยอด เหตุผลในการกำหนดจำนวนจุดยอดมากที่สุดที่ 3,000 จุดยอด เนื่องจากปัญหา TSP ที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยส่วนมากจะมีจำนวนจุดยอดไม่เกิน 3,000 จุดยอด ข้อมูลจากเวปไซต์ TSPLIB

2. ทดลองหาค่าตัวแปรป้อนเข้าต่าง ๆ ของวิธีการ HEGA ได้แก่ ขนาดของประชากร (N) ค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวก (Pc) ค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Pm) และจำนวนรุ่นของการวิวัฒนาการ (Generation, G) ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้คำตอบที่ดี ภายในเวลาที่ยอมรับได้ ในทั้ง 14 ปัญหา โดยเริ่มต้นกำหนดให้ค่า Pc, Pm และ G คงที่ เพื่อหาค่า N ที่เหมาะสม จากนั้นจะ

กำหนดให้ค่า N, Pc และ Pm คงที่ เพื่อหาค่า G ที่เหมาะสมกับขนาดต่าง ๆ ของปัญหา สุดท้ายจะกำหนดให้ค่า N และ G คงที่ เพื่อหาค่า Pc และ Pm ที่เหมาะสม

3. ในการทดลองจะวัดประสิทธิภาพของวิธีการ HEGA ด้วย 3 แบบ แบบแรกจะวัดค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) (Patvichaichod and Visuwan, 2007; Patvichaichod and Visuwan, 2008; Kim *et al*., 2004) อยู่ในรูปของร้อยละ ดังสมการ

$$\text{Cost saving} = [(ACF - MCL) / ACF] \times 100\%$$

โดยที่ ACF = ต้นทุนค่าเดินทางเฉลี่ยของวิวัฒนาการในรุ่นที่ 1 (Average cost at the first generation) หาได้จากค่าจุดประสงค์เฉลี่ยของทุกโครโมโซมในประชากรของวิวัฒนาการรุ่นที่ 1

MCL= ต้นทุนค่าเดินทางที่น้อยที่สุดของวิวัฒนาการในรุ่นสุดท้าย (Minimum cost at the last generation) คือค่าจุดประสงค์ของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดในประชากรของวิวัฒนาการรุ่นสุดท้าย

แบบที่ 2 จะวัดอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) (Patvichaichod and Visuwan, 2007; Patvichaichod and Visuwan, 2008) อยู่ในรูปของร้อยละ ดังสมการ

$$\text{Convergence rate} = [(MCF - MCL) / MCF] \times 100\%$$

โดยที่ MCF = ต้นทุนค่าเดินทางที่น้อยที่สุดของวิวัฒนาการในรุ่นที่ 1 (Minimum cost at the first generation) คือค่าจุดประสงค์ของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดในประชากรของวิวัฒนาการรุ่นที่ 1

ส่วนแบบที่ 3 จะวัดเวลาในการค้นหาคำตอบของวิธีการ HEGA (Run time) ในหน่วยวินาที

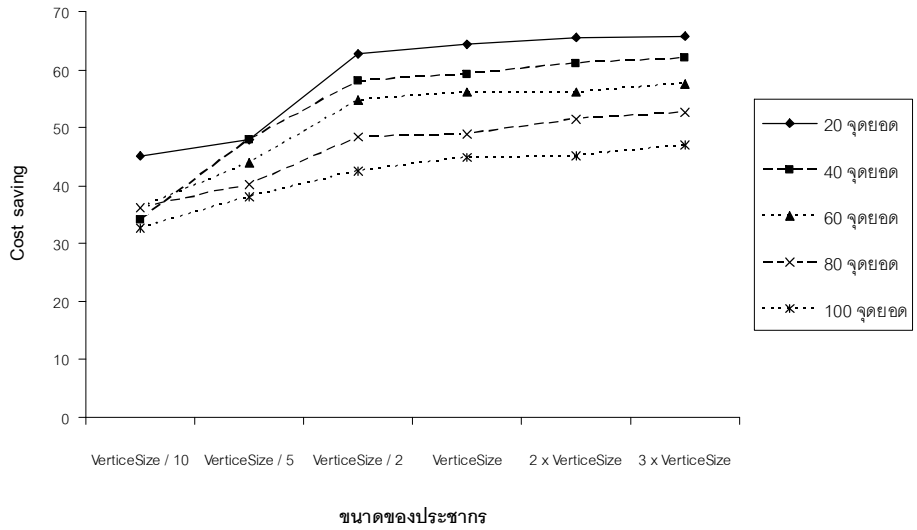
4. นำวิธีการ HEGA ที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งค่าที่เหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้าต่าง ๆ ที่ทดลองได้ แก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่งสินค้าและกำหนดสภาพจราจร (Pickup and delivery vehicle routing problem with traffic conditions, PDVRPTC)

ผลและวิจารณ์

ผล

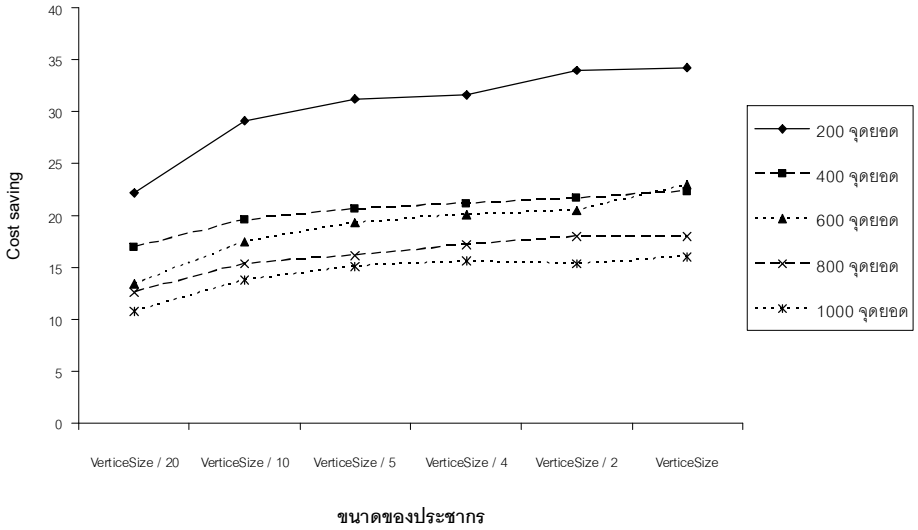
ผลการทดลองหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา

การทดลองหาค่าขนาดของประชากร (N) ที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของประชากรให้มีความสัมพันธ์กับขนาดของปัญหา และกำหนดค่าตัวแปรป้อนเข้าอื่น ๆ คงที่ ได้แก่ กำหนดให้ค่า Pc เท่ากับ 70% กำหนดให้ค่า Pm เท่ากับ 5% และกำหนดให้ค่า G เท่ากับ 500 รุ่น เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงในเห็นว่าค่า Pc ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 60% - 95% ค่า Pm ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0% - 5% และค่า G นิยมกำหนดไว้ไม่เกิน 500 รุ่น (Worden *et al*., 2008; Wang, 2008; Kim and Ahn, 2008; Carter and Ragsdale, 2006; Choi *et al*., 2003; Pina and Lima, 2003; Coley, 1999;) โดยในทุกการทดลองจะทำการรันโปรแกรม 5 ครั้ง (Chen *et al*., 2008; Gopal and Rao, 2003; Schmitt and Amini, 1998) แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) และเวลาในการค้นหาคำตอบ (Run time) พร้อมทั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่อยู่ในวงเล็บ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 1 และภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 27



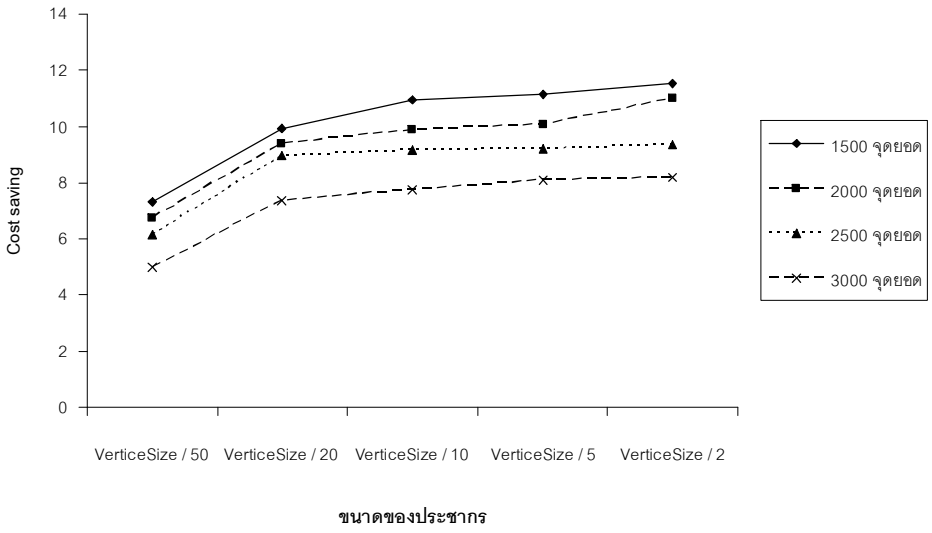
ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 20 ถึง 100 จุดยอด

จากภาพที่ 12 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 20, 40, 60, 80 และ 100 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/2)



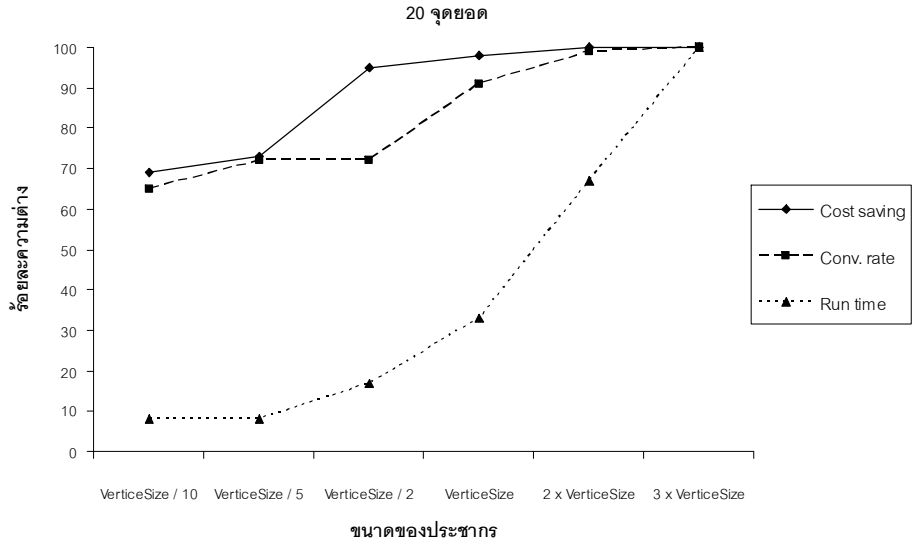
ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 200 ถึง 1,000 จุดยอด

ภาพที่ 13 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 จุดยอด ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/10)



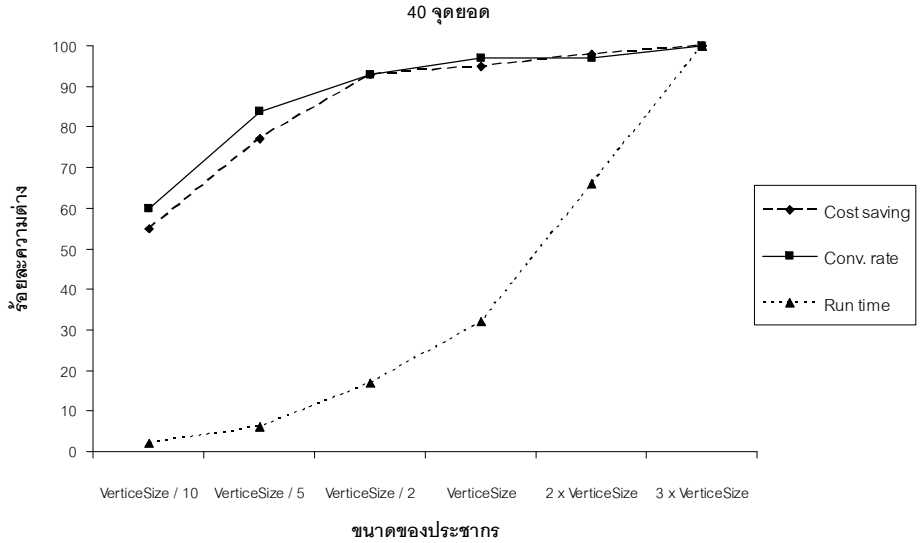
ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประชากรและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,500 ถึง 3,000 จุดยอด

จากภาพที่ 14 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 1,500, 2,000, 2,500 และ 3,000 จุดยอด ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/20)



ภาพที่ 15 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

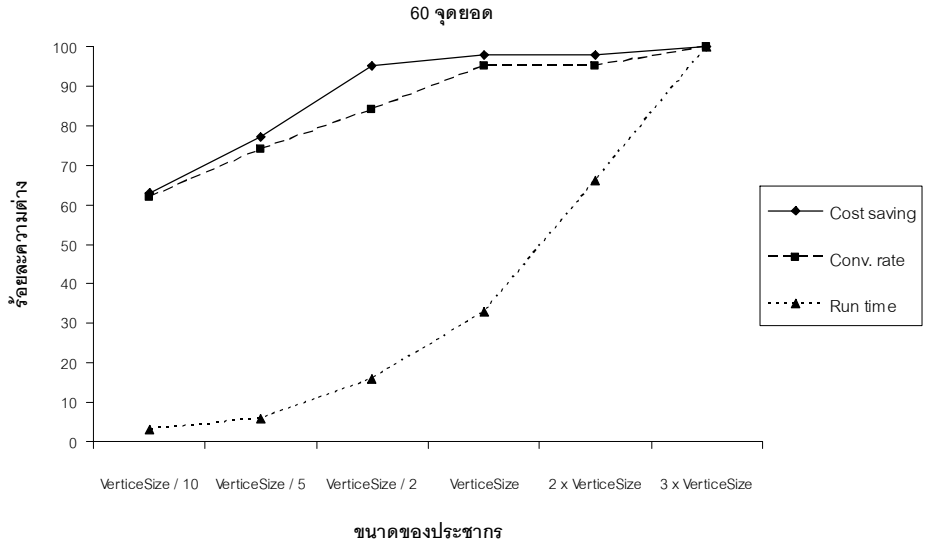
จากภาพที่ 15 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 26 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอด (N = 3 x VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 83 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



ภาพที่ 16 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

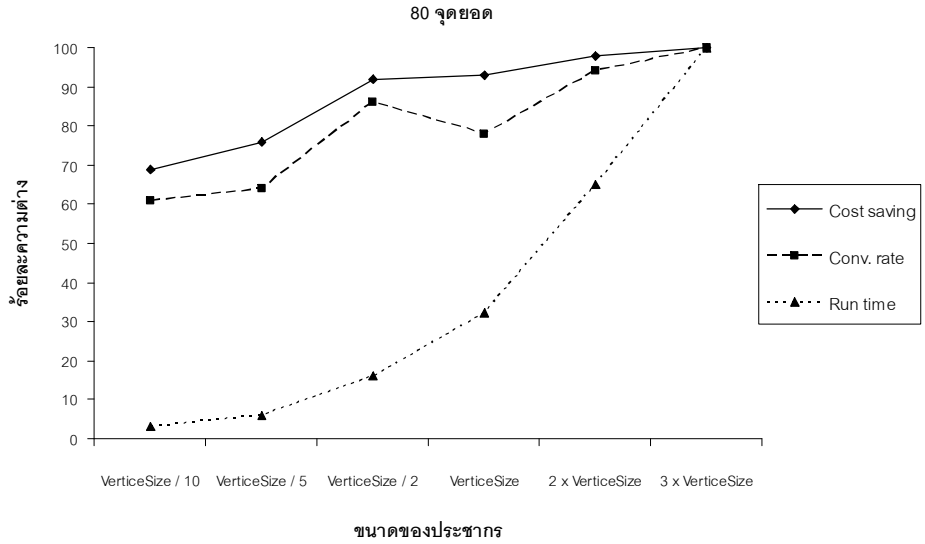
จากภาพที่ 16 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอด (N = 3 x VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 7

เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 83 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



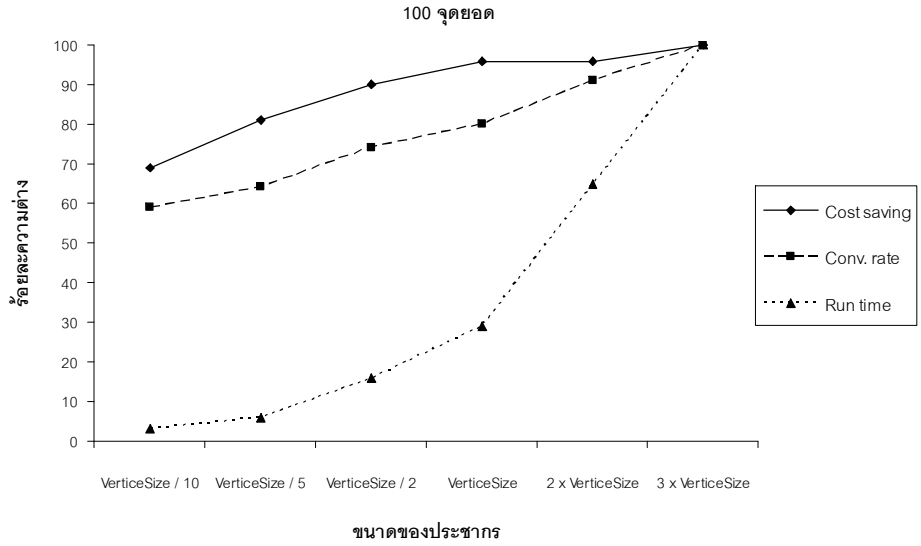
ภาพที่ 17 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 17 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอด (N = 3 x VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 84 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



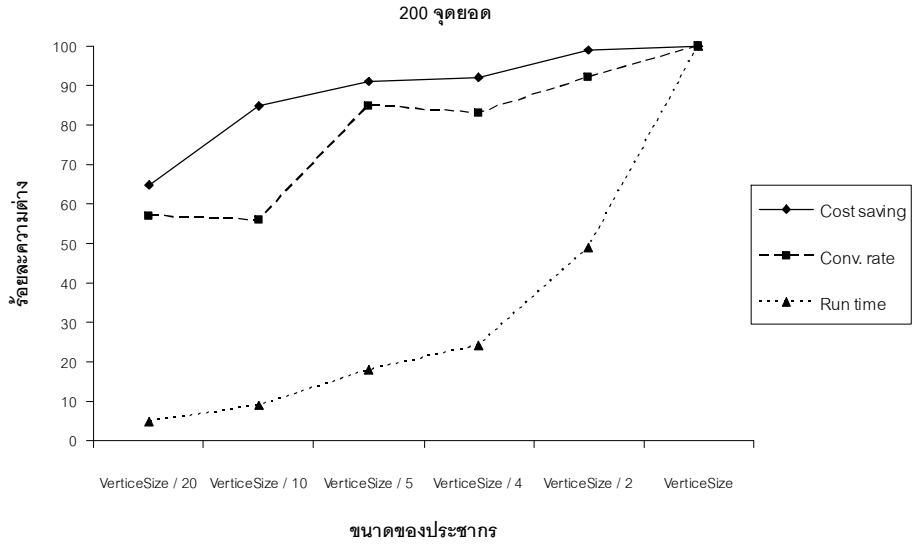
ภาพที่ 18 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 18 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอด (N = 3 x VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 84 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



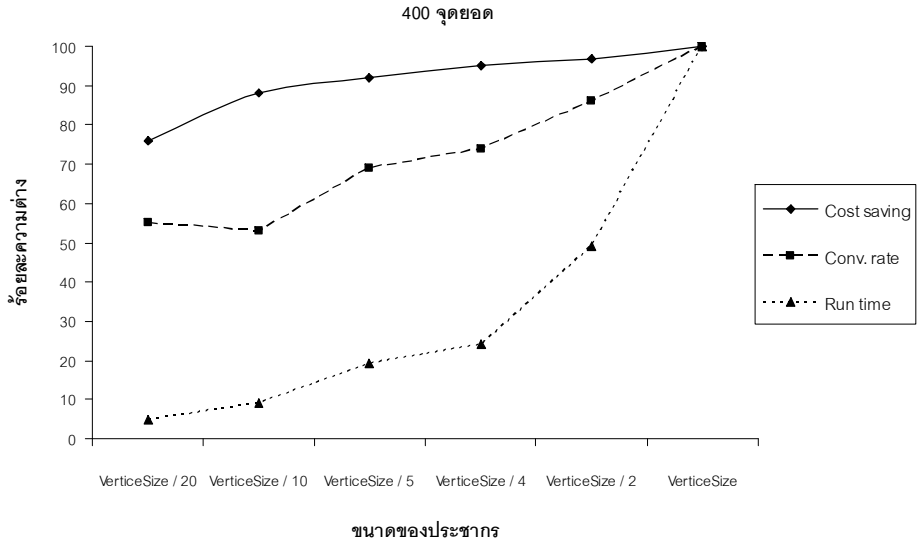
ภาพที่ 19 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 19 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอด (N = 3 x VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 84 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



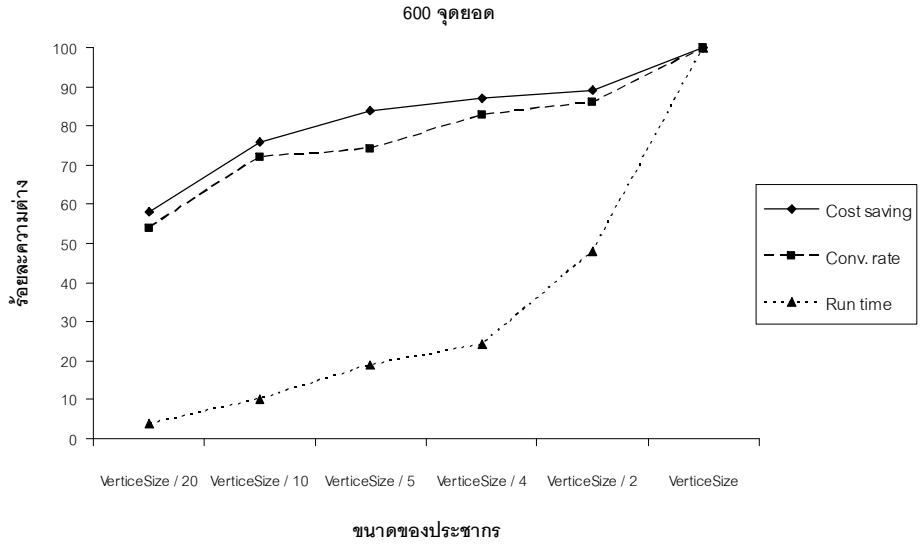
ภาพที่ 20 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 20 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



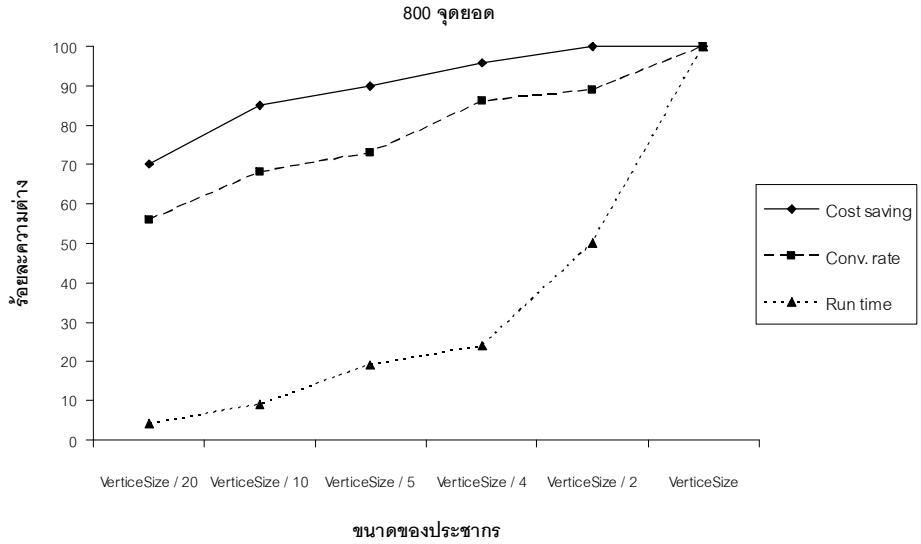
ภาพที่ 21 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 21 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



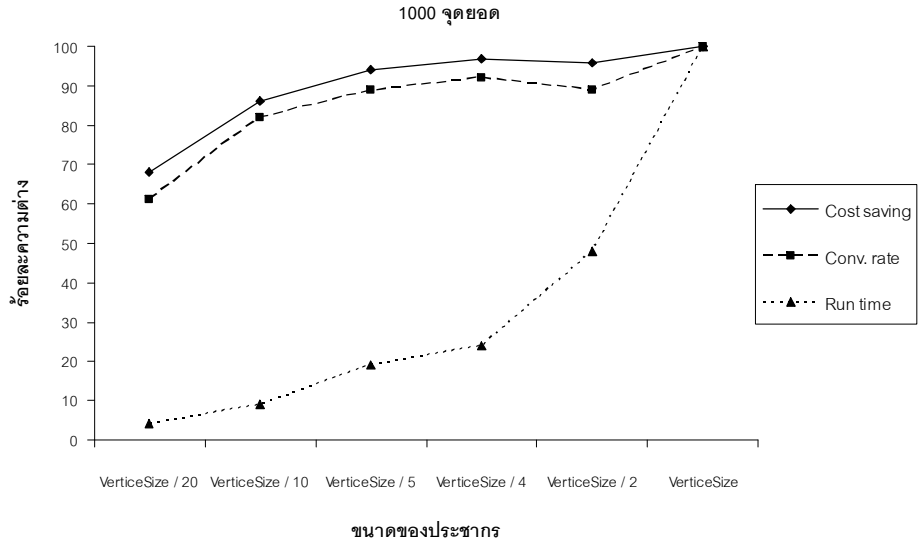
ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 22 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 24 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 90 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



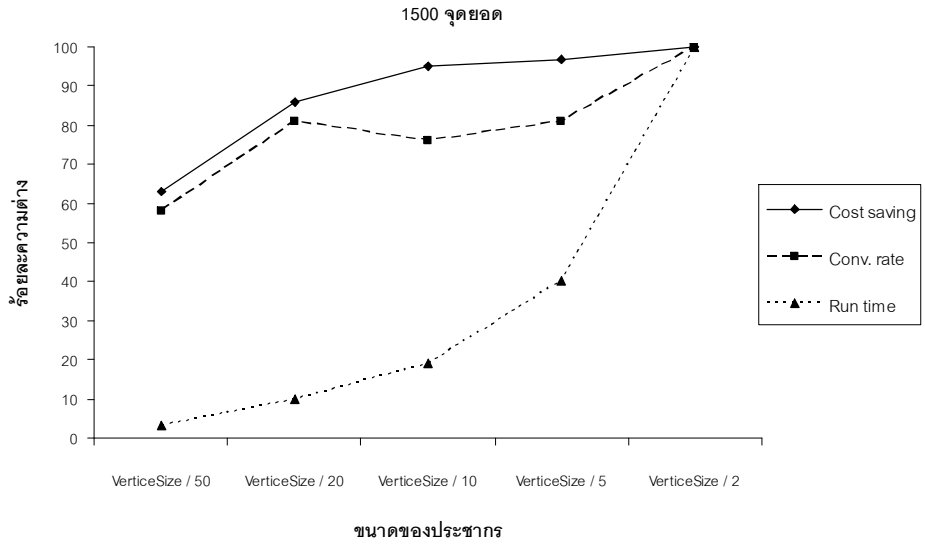
ภาพที่ 23 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 23 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



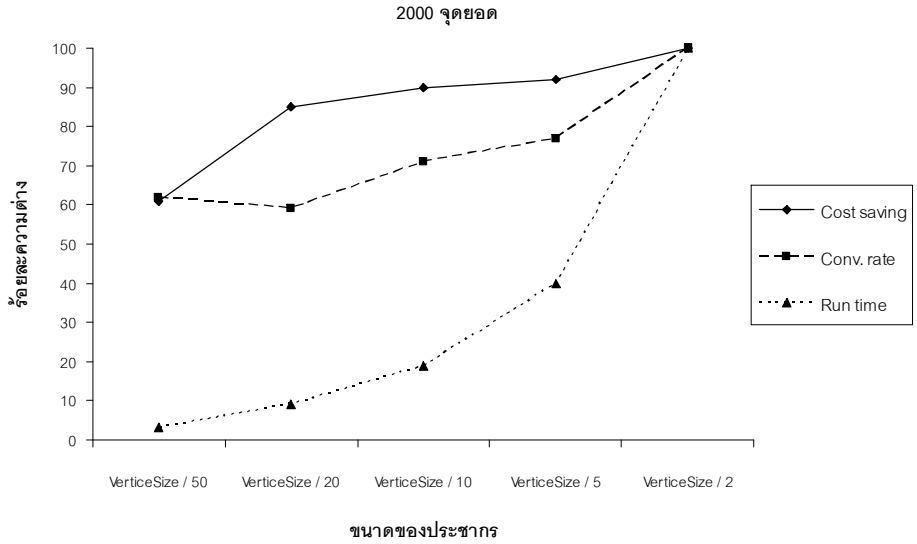
ภาพที่ 24 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด1,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 24 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/10) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



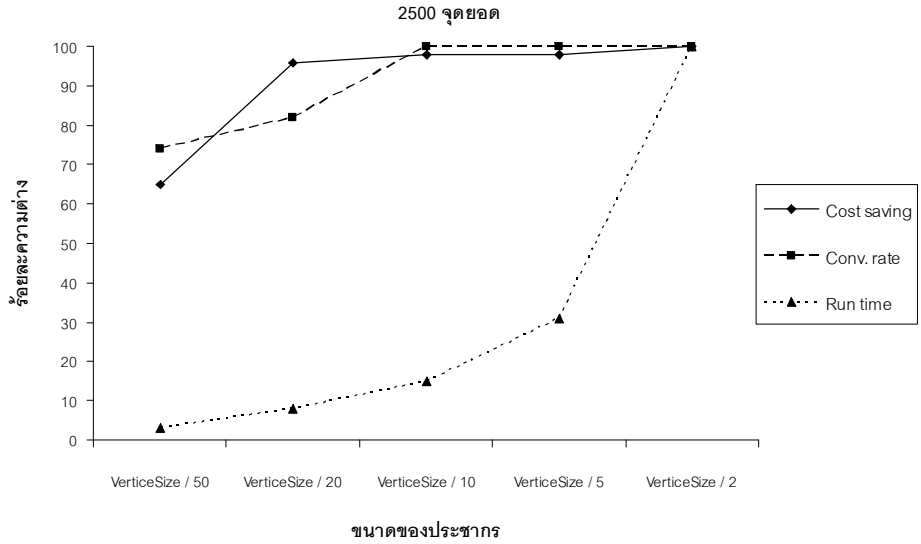
ภาพที่ 25 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 25 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในห้าสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/50) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 7 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 14 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 90 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



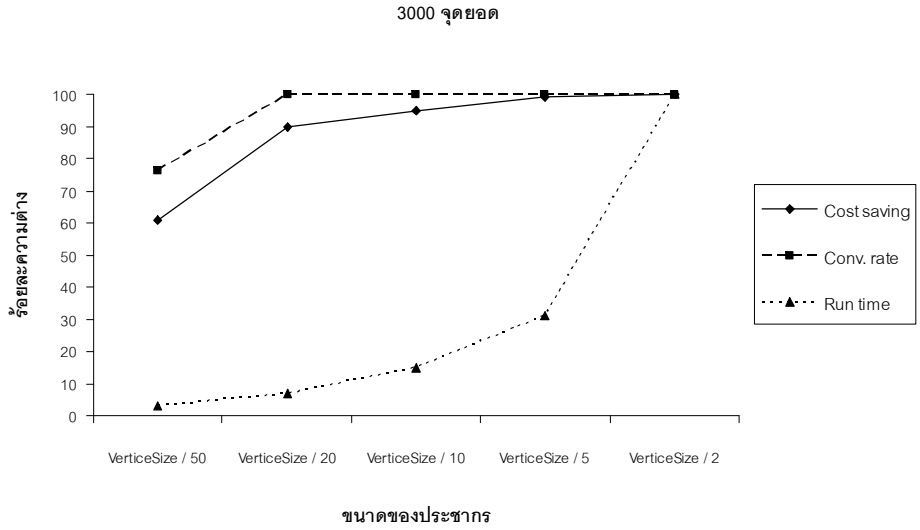
ภาพที่ 26 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 26 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในห้าสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/50) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 24 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



ภาพที่ 27 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 27 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในห้าสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/50) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 31 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 92 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้



ภาพที่ 28 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ในการหาค่าขนาดของประชากรที่เหมาะสม

จากภาพที่ 28 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในห้าสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/50) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 29 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 แต่ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/2) เทียบกับขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticesSize/20) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 93 และเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า อัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าเดินทางที่ประหยัดได้

จากการทดลองข้างต้นเมื่อมองโดยภาพรวมแล้วพบว่า สำหรับปัญหาขนาดไม่เกิน 100 จุดยอด ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 21 - 38 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 9 - 13 แต่เมื่อเพิ่มขนาดของประชากรให้มากขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นไม่

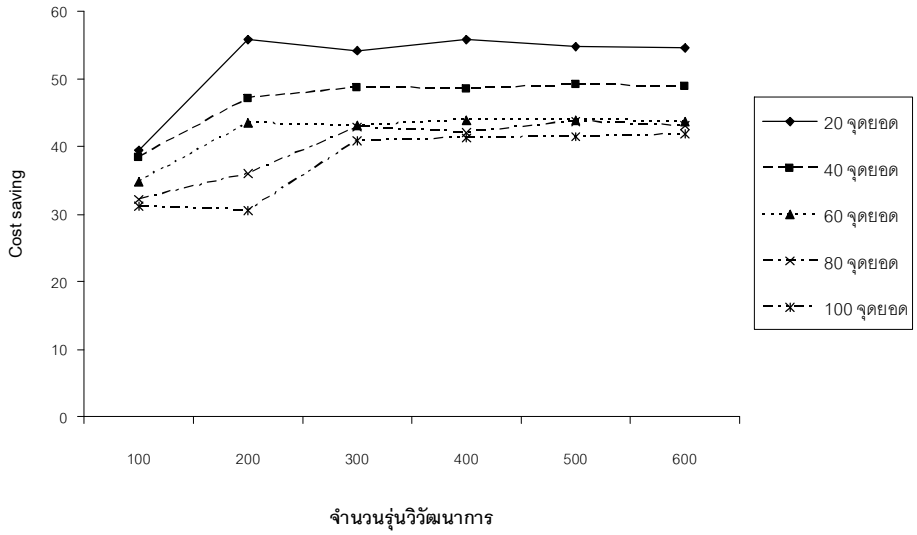
มาก เช่น เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรเท่ากับสามเท่าของจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 - 10 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 83 – 84 และเมื่อขนาดของประชากรมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มที่จะลดลง ส่วนค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 12 และภาพที่ 15 ถึงภาพที่ 19

สำหรับปัญหาขนาดมากกว่า 100 แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อขนาดของประชากรขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 – 25 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 – 6 และเมื่อเพิ่มขนาดของประชากรให้มากขึ้นอีก ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นอีก เช่น เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรขนาดของประชากรเท่ากับจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 12 - 20 แต่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 90 – 91 และเมื่อขนาดของประชากรมากขึ้นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มที่จะลดลง ส่วนค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 13 และภาพที่ 20 ถึงภาพที่ 24

สำหรับปัญหาขนาดมากกว่า 1,000 จุดยอด ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากเมื่อขนาดของประชากรเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในห้าสิบของจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 – 31 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 – 7 และเมื่อเพิ่มขนาดของประชากร ให้มากขึ้นอีก ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นอีก เช่น เมื่อขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด เทียบกับเมื่อขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอดจะมีค่าร้อยละความต่างเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 - 15 แต่เวลาการหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 90 – 93 ส่วนค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 25 ถึงภาพที่ 28

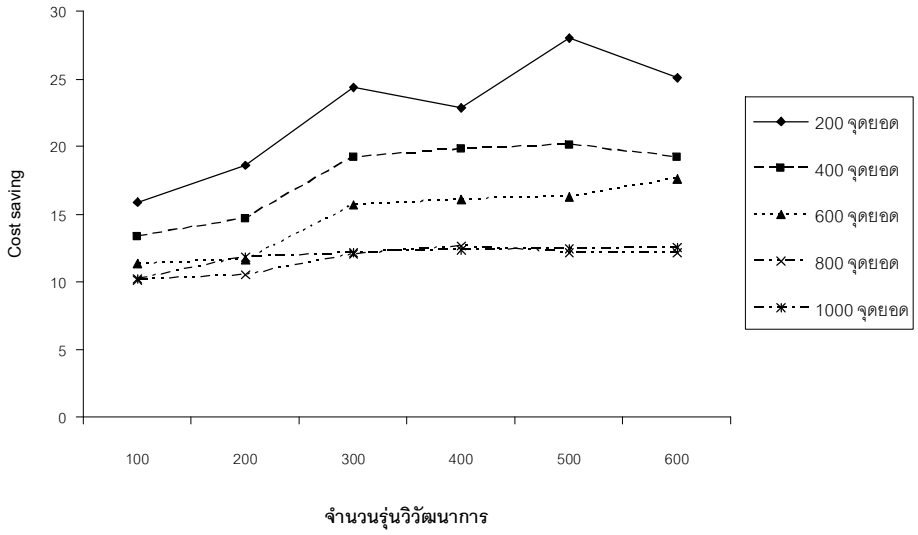
ผลการทดลองหาค่าจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา

การทดลองหาค่าจำนวนรุ่นวิวัฒนาการ (G) ที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา ทำการทดลองโดยกำหนดให้ค่า G เท่ากับ 100, 200, 300, 400, 500 และ 600 รุ่น ตามลำดับ ส่วนขนาดของประชากรจะกำหนดตามผลการทดลองข้างต้น คือ ถ้าขนาดของปัญหาอยู่ในช่วง 20-100 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/2) ถ้าขนาดของปัญหาอยู่ในช่วง 200-1,000 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/10) และถ้าขนาดของปัญหามากกว่า 1,000 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/20) และกำหนดให้ค่า Pc เท่ากับ 70% กำหนดให้ค่า Pm เท่ากับ 5% เช่นเดิม โดยในทุกการทดลองจะทำการรันโปรแกรม 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) และเวลาในการค้นหาคำตอบ (Run time) พร้อมทั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่อยู่ในวงเล็บ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 2 และภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 45



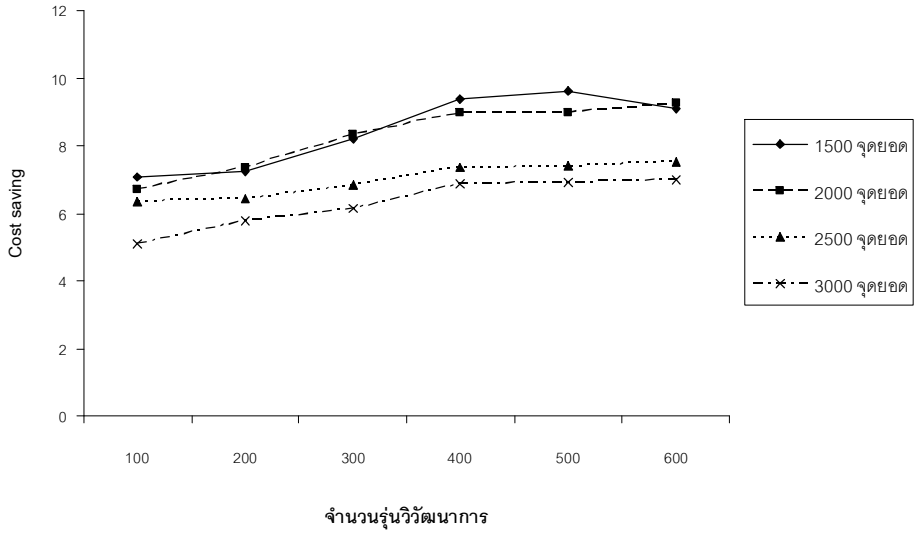
ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 20 ถึง 100 จุดยอด

จากภาพที่ 29 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 20, 40, 60, 80 และ 100 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300)



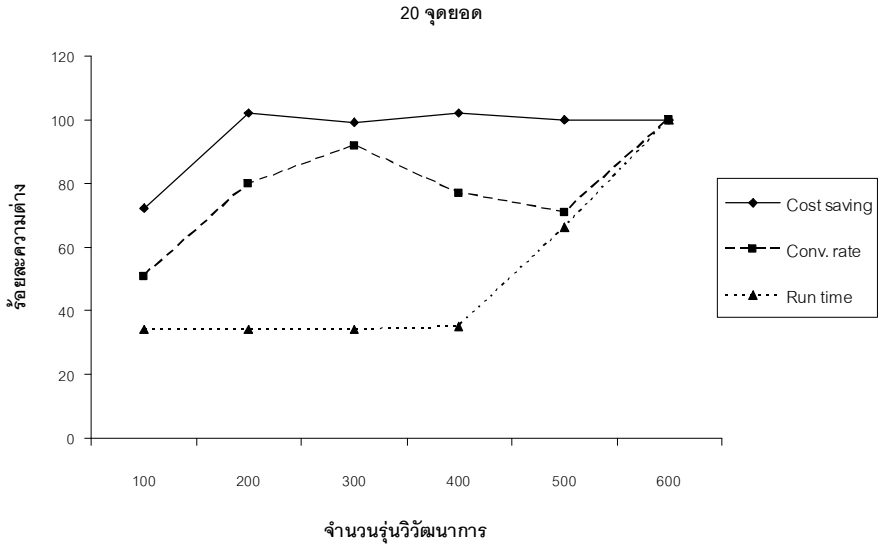
ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 200 ถึง 1,000 จุดยอด

จากภาพที่ 30 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 ค่าเดินทางที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300)



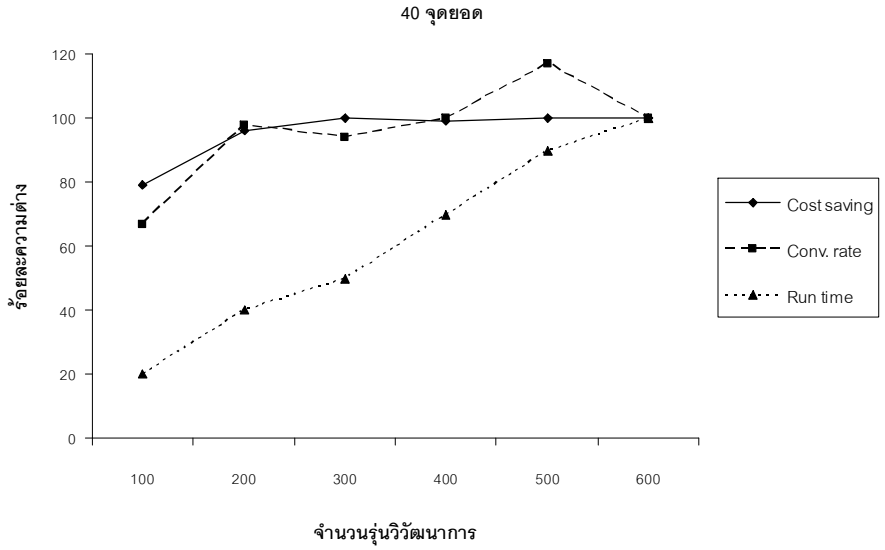
ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรุ่นวิวัฒนาการและค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,500 ถึง 3,000 จุดยอด

จากภาพที่ 31 พบว่าสำหรับปัญหาที่มีจุดยอดเท่ากับ 1,500, 2,000, 2,500 และ 3,000 เดินทางที่ประหยัดได้เริ่มจะคงที่เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400)



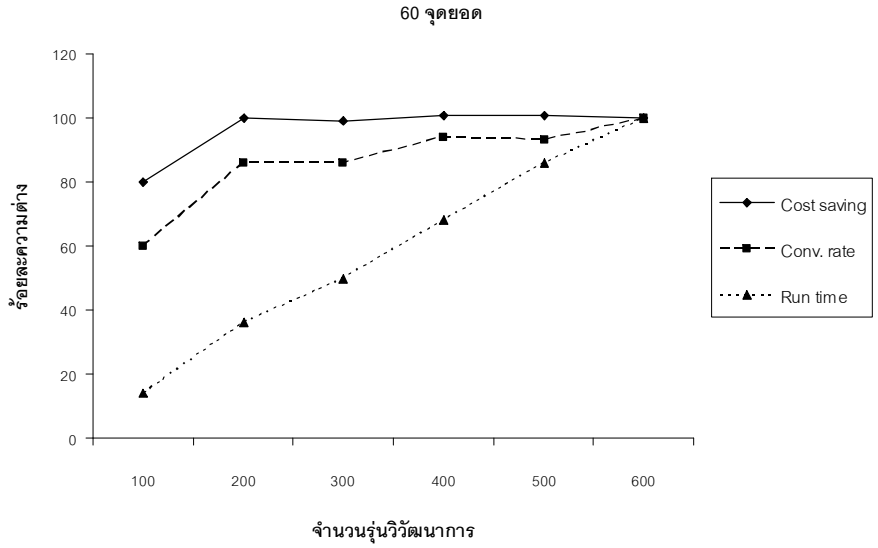
ภาพที่ 32 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 32 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 20 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 66



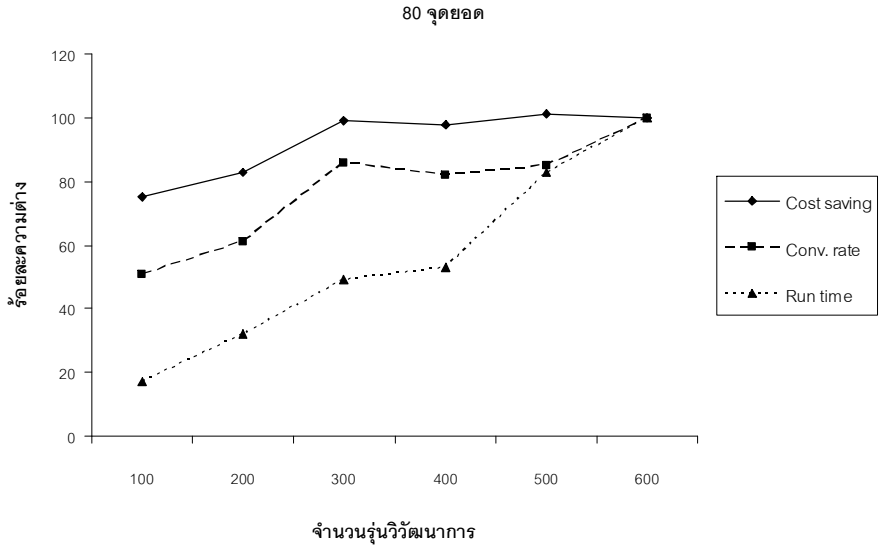
ภาพที่ 33 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 33 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 40 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 60



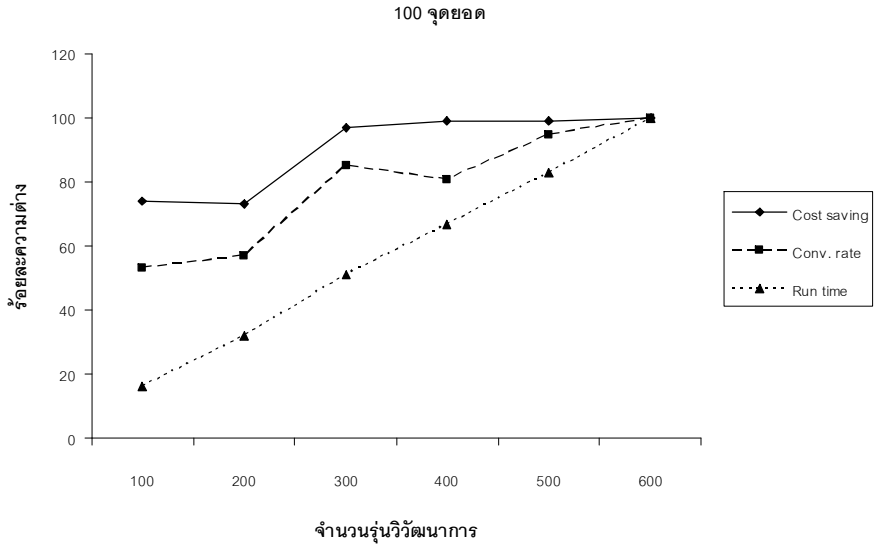
ภาพที่ 34 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 34 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 200 รุ่น (G = 200) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 64



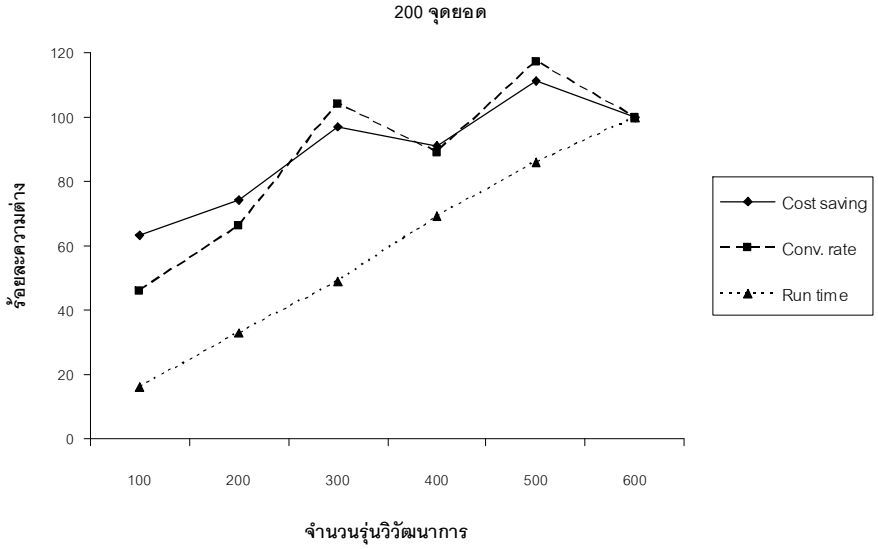
ภาพที่ 35 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 35 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 80 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 24 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 51



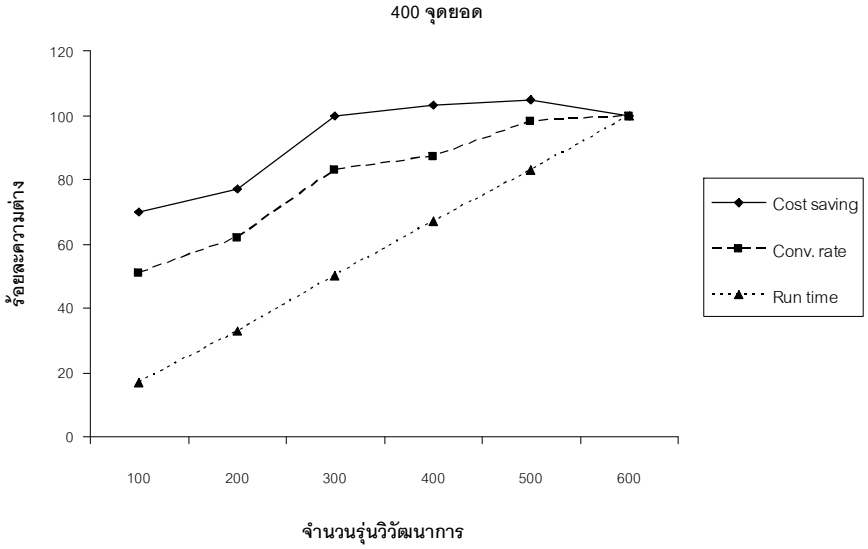
ภาพที่ 36 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 36 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 35 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 49



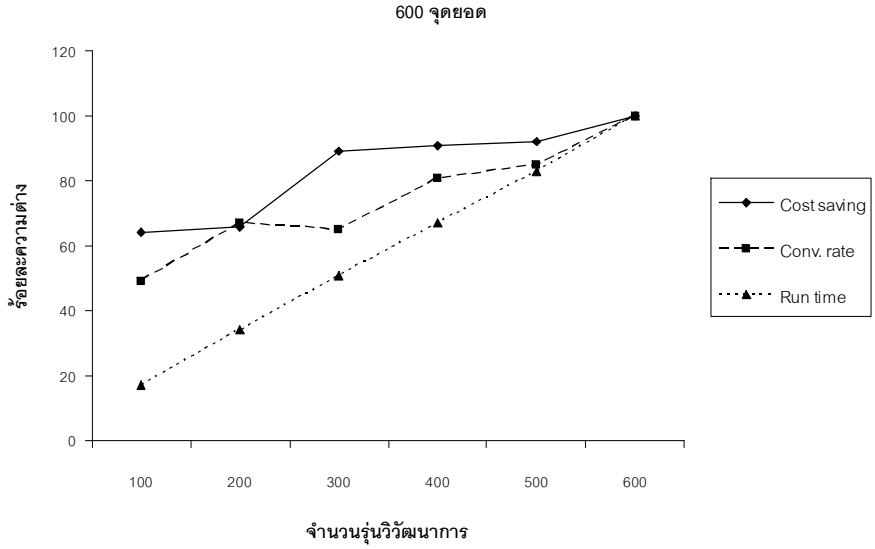
ภาพที่ 37 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 37 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 200 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 51



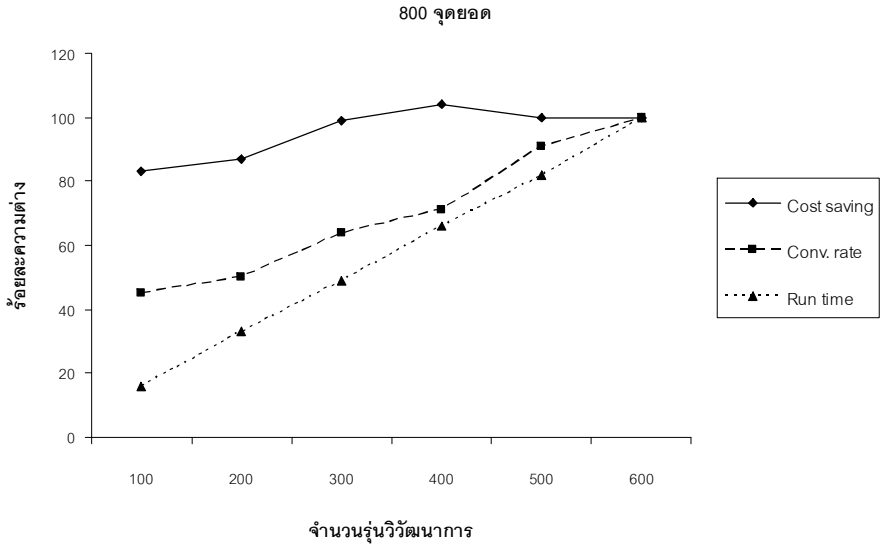
ภาพที่ 38 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 38 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 400 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 30 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 50



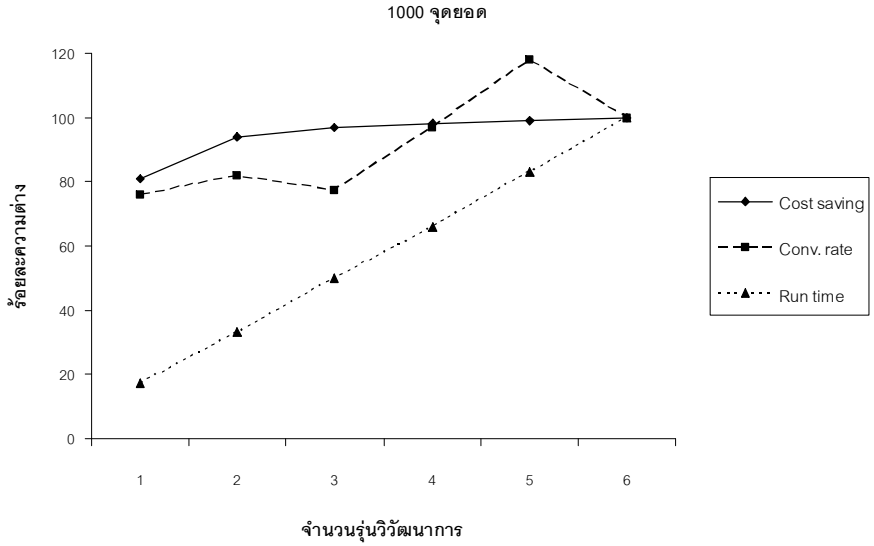
ภาพที่ 39 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 39 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 34 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 49



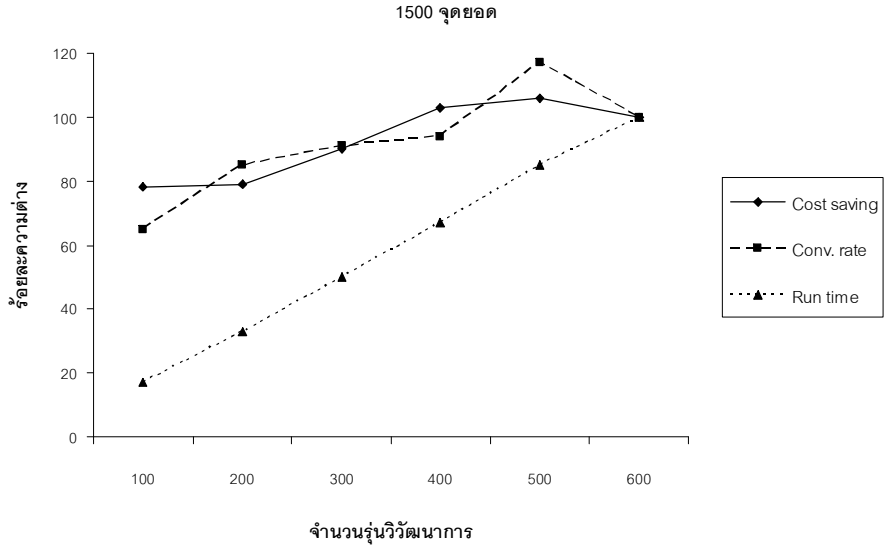
ภาพที่ 40 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 40 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 800 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 51



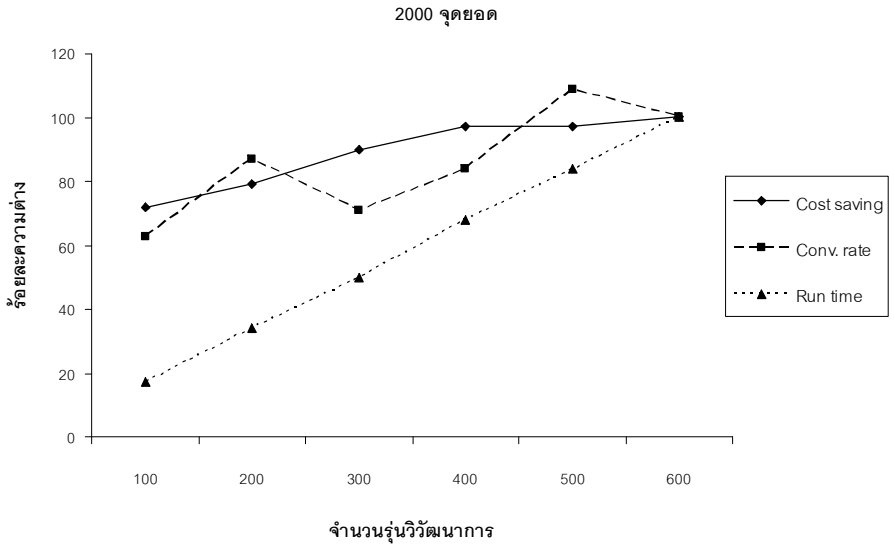
ภาพที่ 41 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 41 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 51



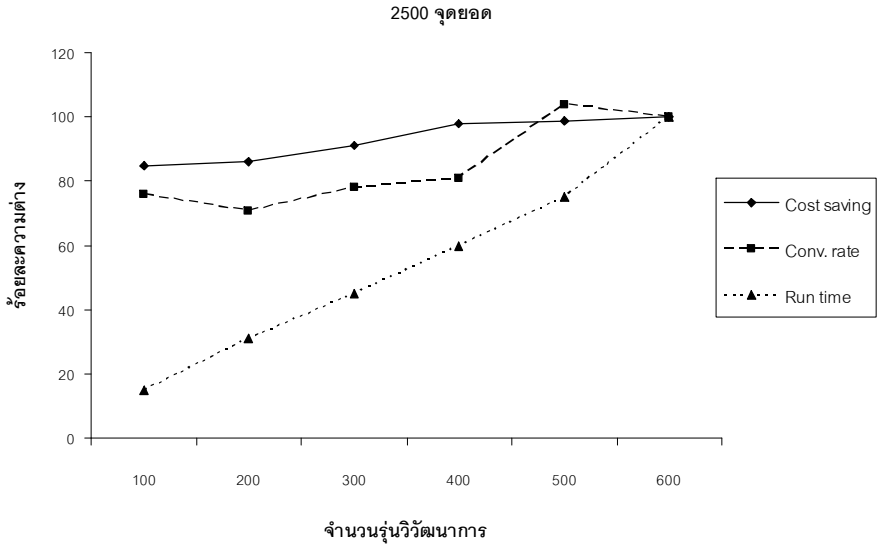
ภาพที่ 42 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 42 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 1,500 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 400) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33



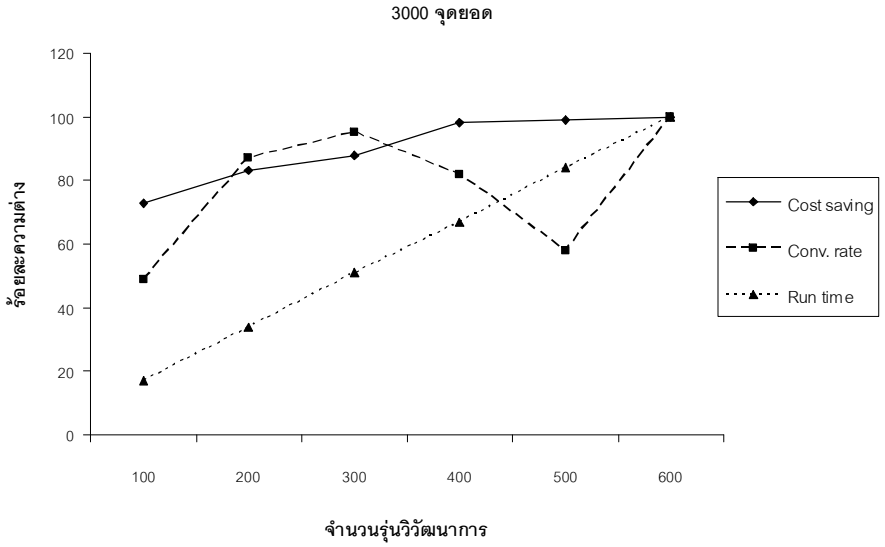
ภาพที่ 43 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 43 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 51 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 400) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 32



ภาพที่ 44 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

จากภาพที่ 44 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 2,500 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 13 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 45 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 400) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 40



ภาพที่ 45 กราฟแสดงค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ ค่าอัตราการลู่เข้า และเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ในการหาจำนวนรุ่นวิวัฒนาการที่เหมาะสม

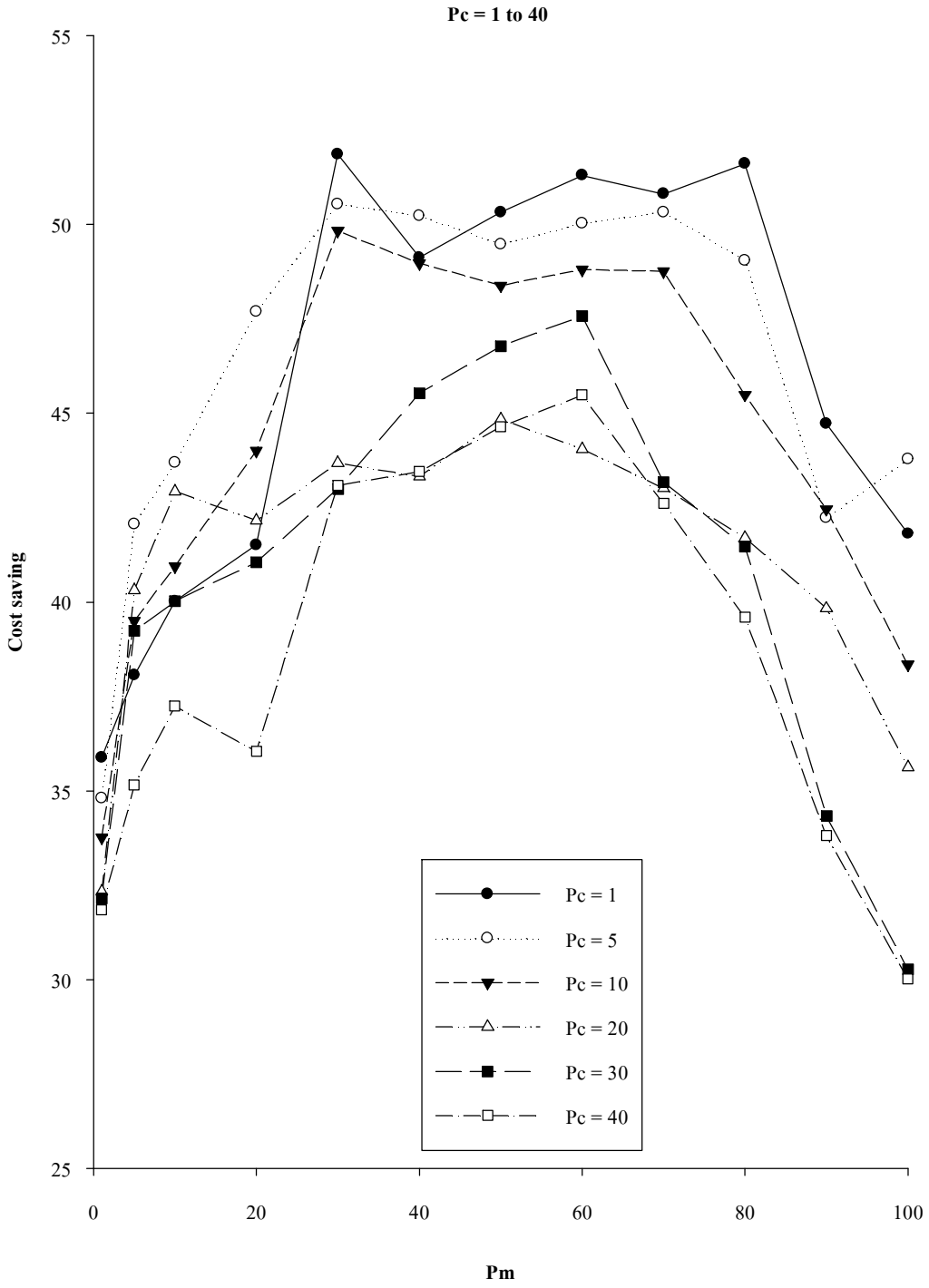
จากภาพที่ 45 พบว่าสำหรับปัญหาขนาด 3,000 จุดยอด ค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มเมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 100 รุ่น (G = 100) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 50 แต่ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 600 รุ่น (G = 600) เทียบกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 400) พบว่าค่าร้อยละความต่างของค่าเดินทางที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 33

จากการทดลองข้างต้นเมื่อมองโดยภาพรวมแล้วพบว่า สำหรับปัญหาขนาดไม่เกิน 60 จุดยอด เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้นเป็น 200 รุ่น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 17 – 30 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 0 – 22 ถ้าจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มมากขึ้นกว่านี้ พบว่าค่าต้นทุนที่ประหยัดได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจนแทบจะคงที่ ที่ร้อยละ 0-4 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 60 – 66 สำหรับปัญหาขนาดเกินกว่า 60 จุดยอด แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้นเป็น 300 รุ่น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 23 – 34 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 – 35 ถ้าจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มมากขึ้นกว่านี้ พบว่าค่าต้นทุนที่ประหยัดได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจนแทบจะคงที่ ที่ร้อยละ 1-3 ในขณะที่เวลา

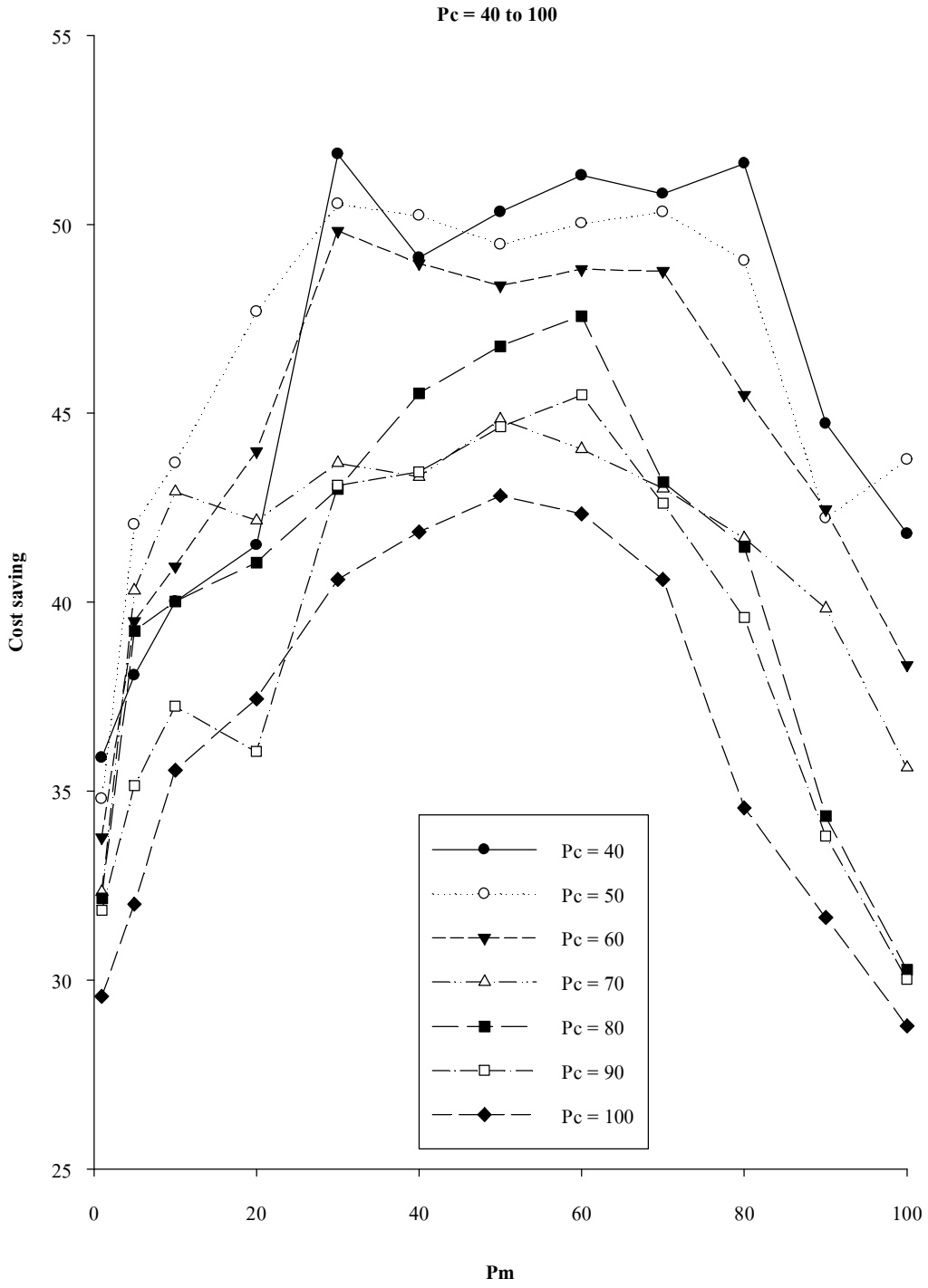
ในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 49 – 51 และสำหรับปัญหาขนาดเกินกว่า 1,000 จุดยอด เมื่อจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มขึ้นเป็น 400 รุ่น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 13 – 25 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 45 – 51 ถ้าจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเพิ่มมากขึ้นกว่านี้ พบว่าค่าต้นทุนที่ประหยัดได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจนแทบจะคงที่ ที่ร้อยละ 2-3 ในขณะที่เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 – 40 และค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ ดังแสดงในภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 45

ผลการทดลองหาค่า Pc และ Pm ที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา

การทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมกับขนาดของปัญหา ทำการทดลองโดยกำหนดขนาดของประชากรและจำนวนรุ่นวิวัฒนาการตามผลการทดลองข้างต้น คือ ถ้าขนาดของปัญหาอยู่ในช่วง 20-100 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/2) และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เลือกปัญหาขนาด 60 และ 100 จุดยอดเป็นตัวแทนของช่วง ถ้าขนาดของปัญหาอยู่ในช่วง 200-1,000 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/10) และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการ เท่ากับ 300 รุ่น (G = 300) เลือกปัญหาขนาด 600 และ 1,000 จุดยอดเป็นตัวแทนของช่วง และถ้าขนาดของปัญหามากกว่า 1,000 จุดยอด กำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/20) และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น (G = 400) เลือกปัญหาขนาด 2,000 จุดยอดเป็นตัวแทนของช่วง จากนั้นจะเปลี่ยนแปลงค่า Pc ระหว่าง 0.01 ถึง 1.00 และเปลี่ยนแปลงค่า Pm ระหว่าง 0.01 ถึง 1.00 โดยในทุกการทดลองจะทำการรันโปรแกรม 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) และเวลาในการค้นหาคำตอบ (Run time) พร้อมทั้งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่อยู่ในวงเล็บ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 ถึงตารางผนวกที่ 7 และภาพที่ 46 ถึงภาพที่ 55



ภาพที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด

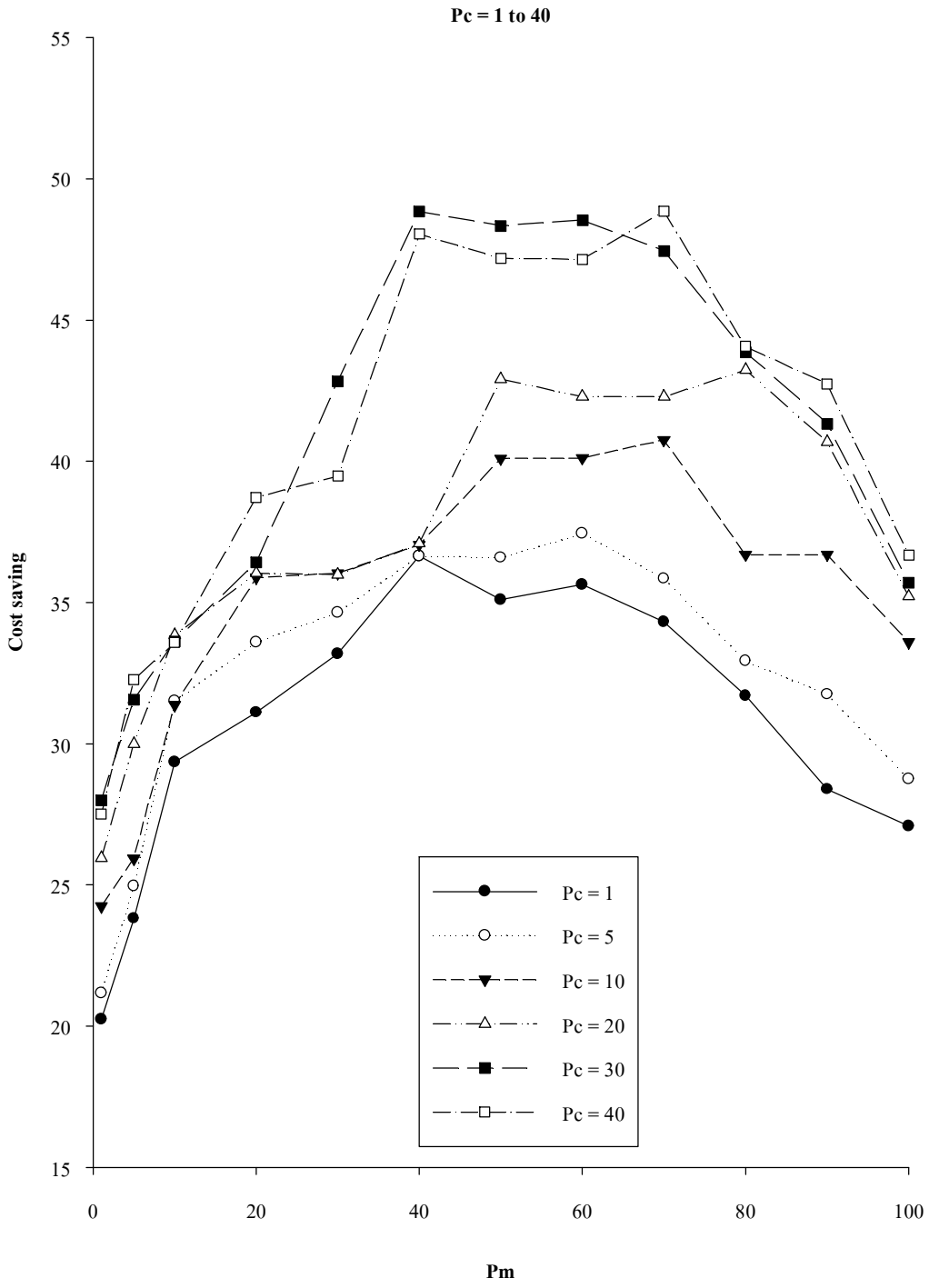


ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด

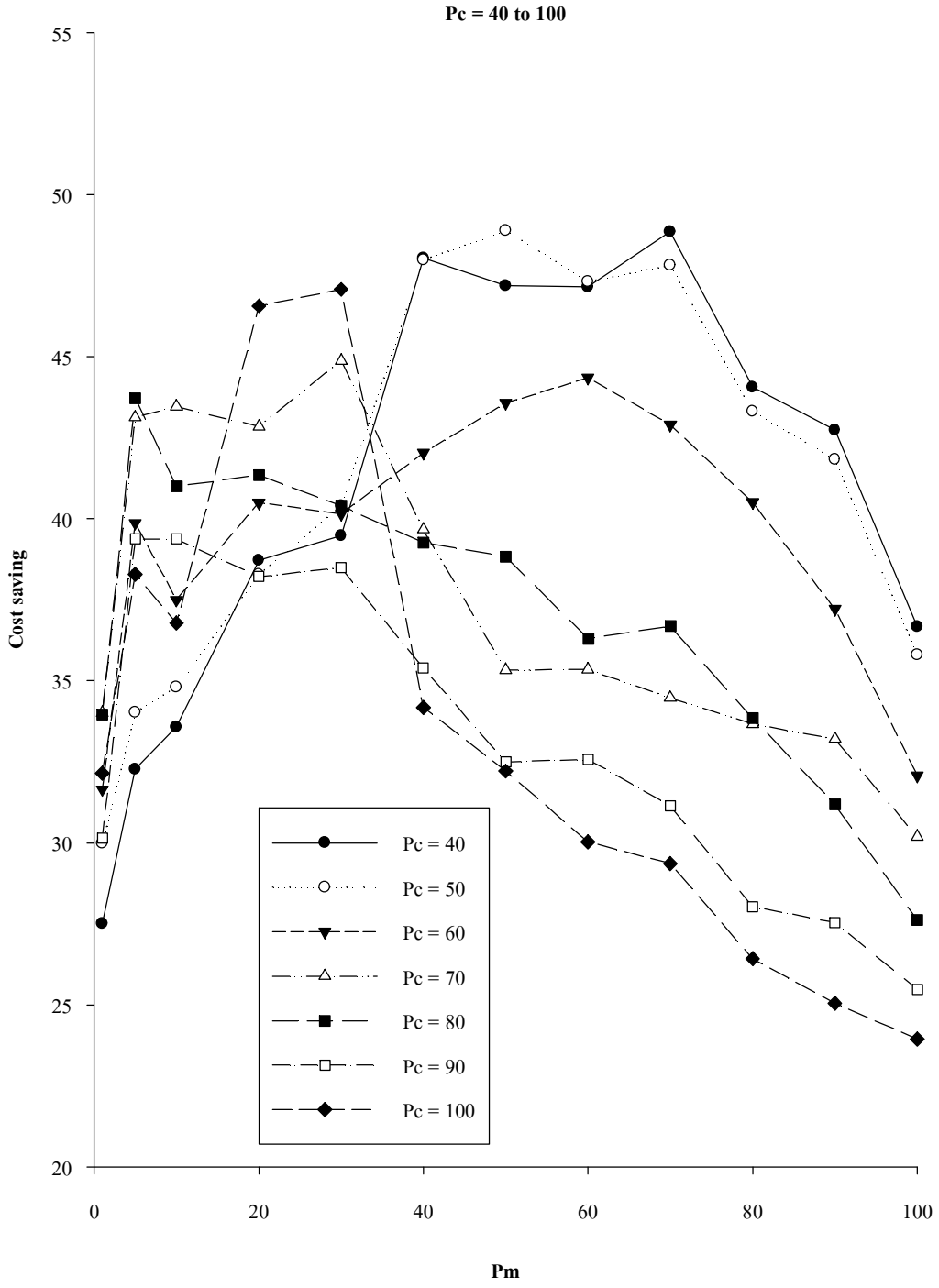
จากผลการทดลองตารางผนวกที่ 3 ภาพที่ 46 และภาพที่ 47 สำหรับปัญหาขนาด 60 จุดยอด พบว่าเมื่อค่า Pc เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Pc ในช่วง 0.20 ถึง 0.60 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pc ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลง และเมื่อค่า Pm เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่า Pm ในช่วง 0.30 ถึง 0.70 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pm ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลงเช่นเดียวกัน ส่วนเวลาการหาคำตอบใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง และค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้

จากผลการทดลองตารางผนวกที่ 4 ภาพที่ 48 และภาพที่ 49 สำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด พบว่าเมื่อค่า Pc เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Pc ในช่วง 0.30 ถึง 0.50 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pc ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลง และเมื่อค่า Pm เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่า Pm ในช่วง 0.40 ถึง 0.70 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pm ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นช่วงของค่า Pc และ Pm ที่ให้ค่า Cost saving ที่ดีจะแคบกว่าปัญหาขนาด 60 จุดยอด ส่วนเวลาการหาคำตอบใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง และค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้

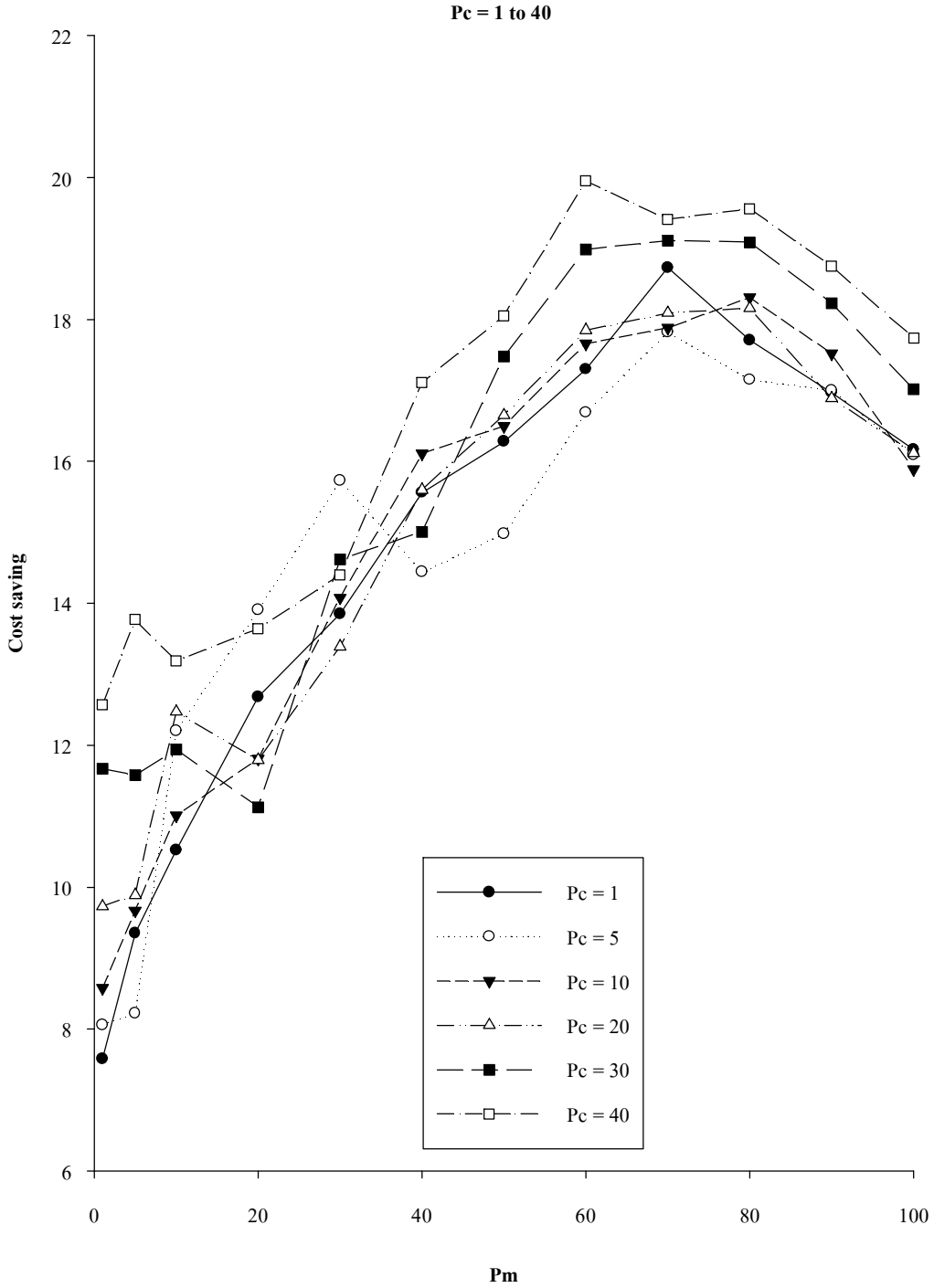
จากผลการทดลองตารางผนวกที่ 5 ภาพที่ 50 และภาพที่ 51 สำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด พบว่าเมื่อค่า Pc เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Pc ในช่วง 0.30 ถึง 0.50 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pc ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลง และเมื่อค่า Pm เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่า Pm ในช่วง 0.60 ถึง 0.80 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pm ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นช่วงของค่า Pm ที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่ดีจะแคบกว่าปัญหาขนาด 100 จุดยอด และช่วงของค่า Pm ที่ดี จะสูงกว่าปัญหาขนาด 100 จุดยอด ส่วนเวลาการหาคำตอบใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง และค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้



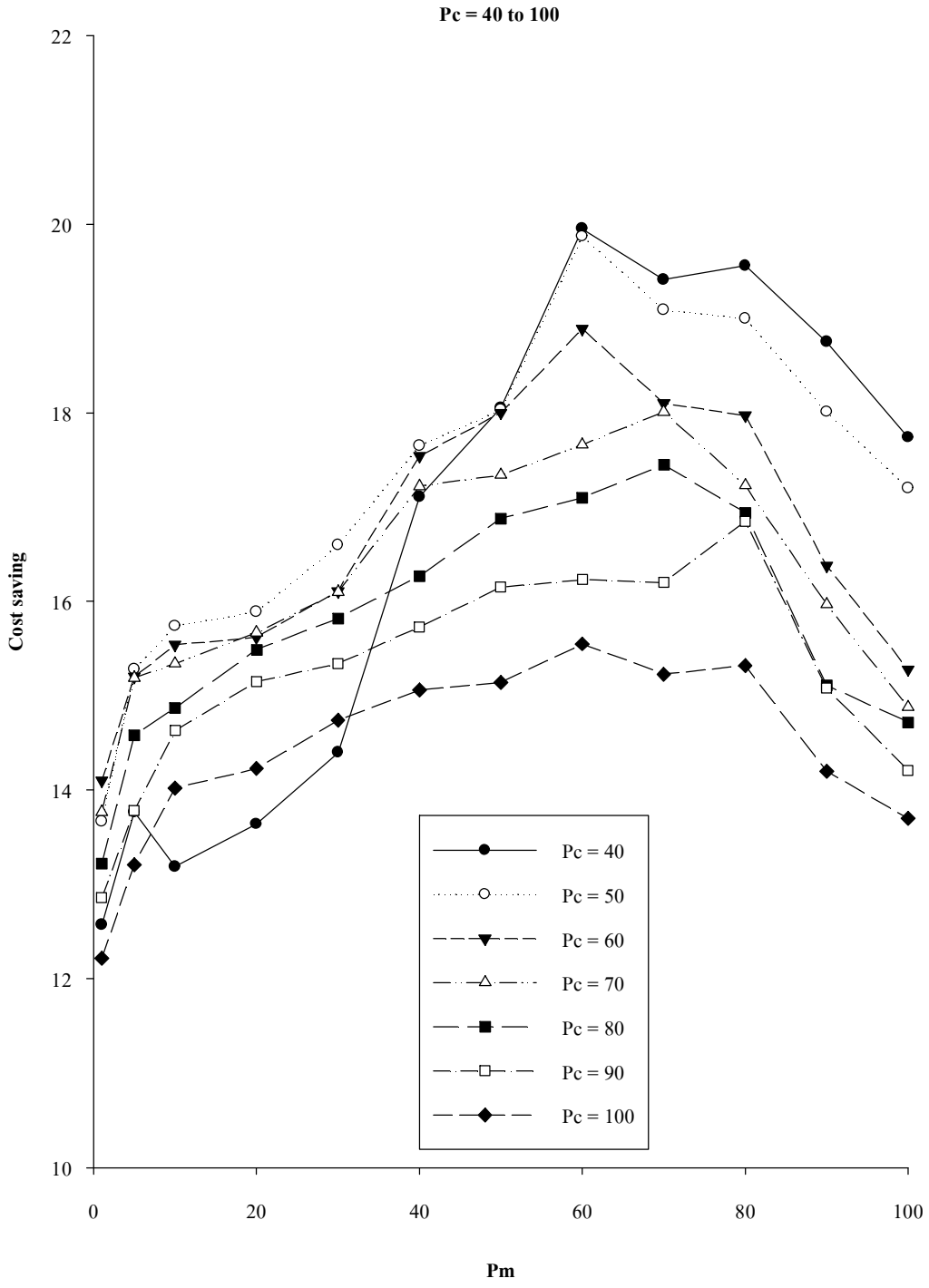
ภาพที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด



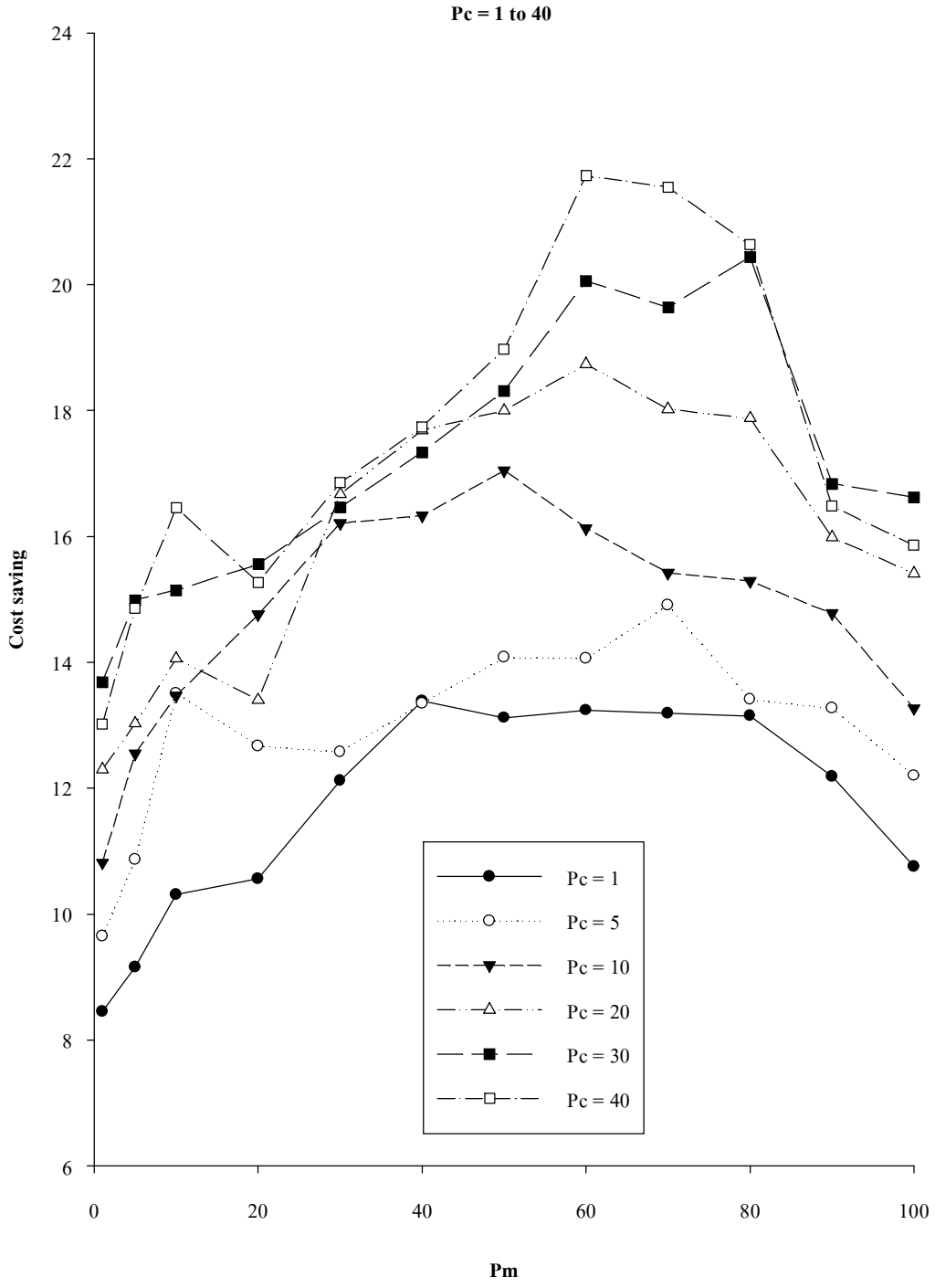
ภาพที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 100 จุดยอด



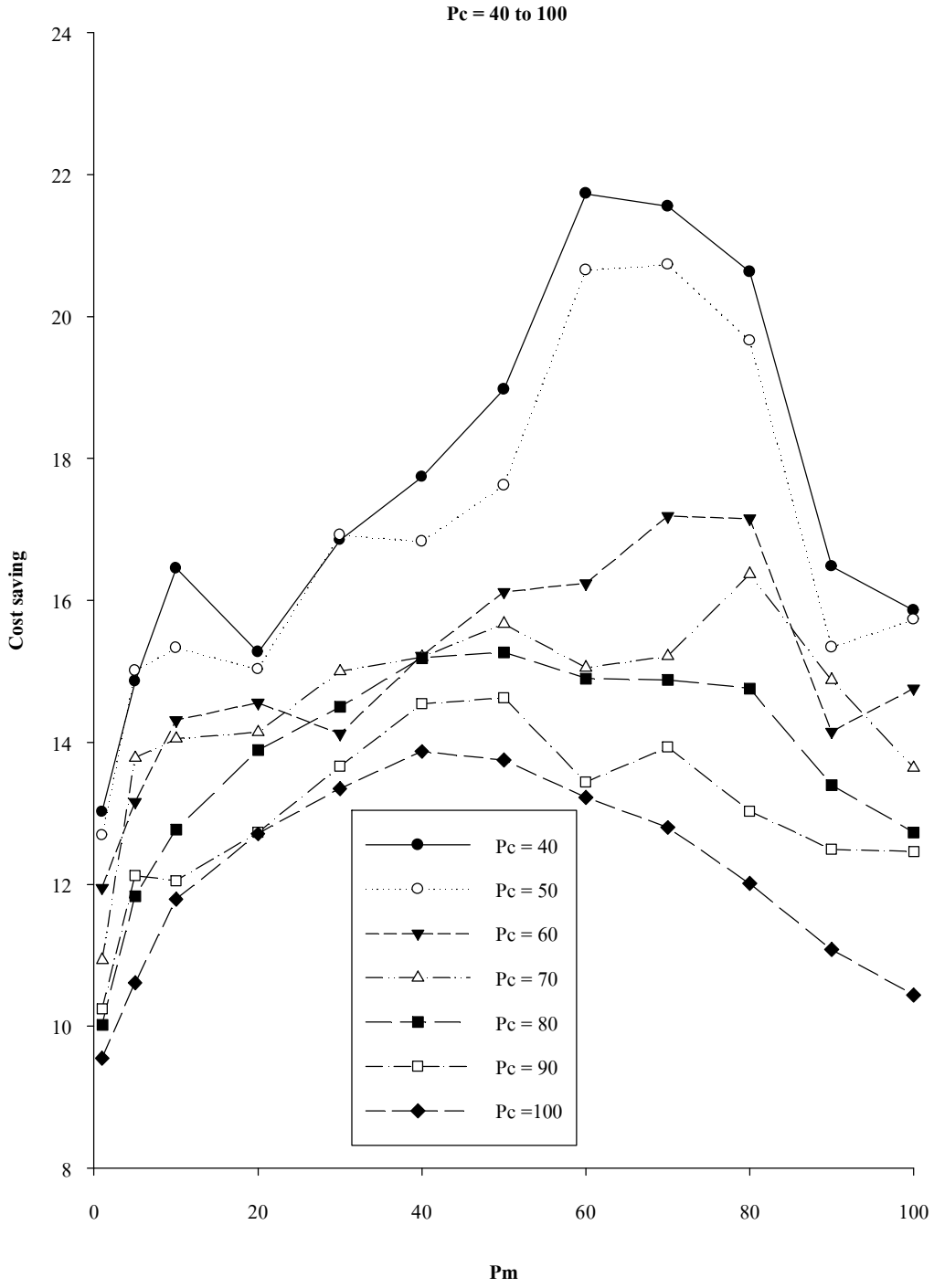
ภาพที่ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด



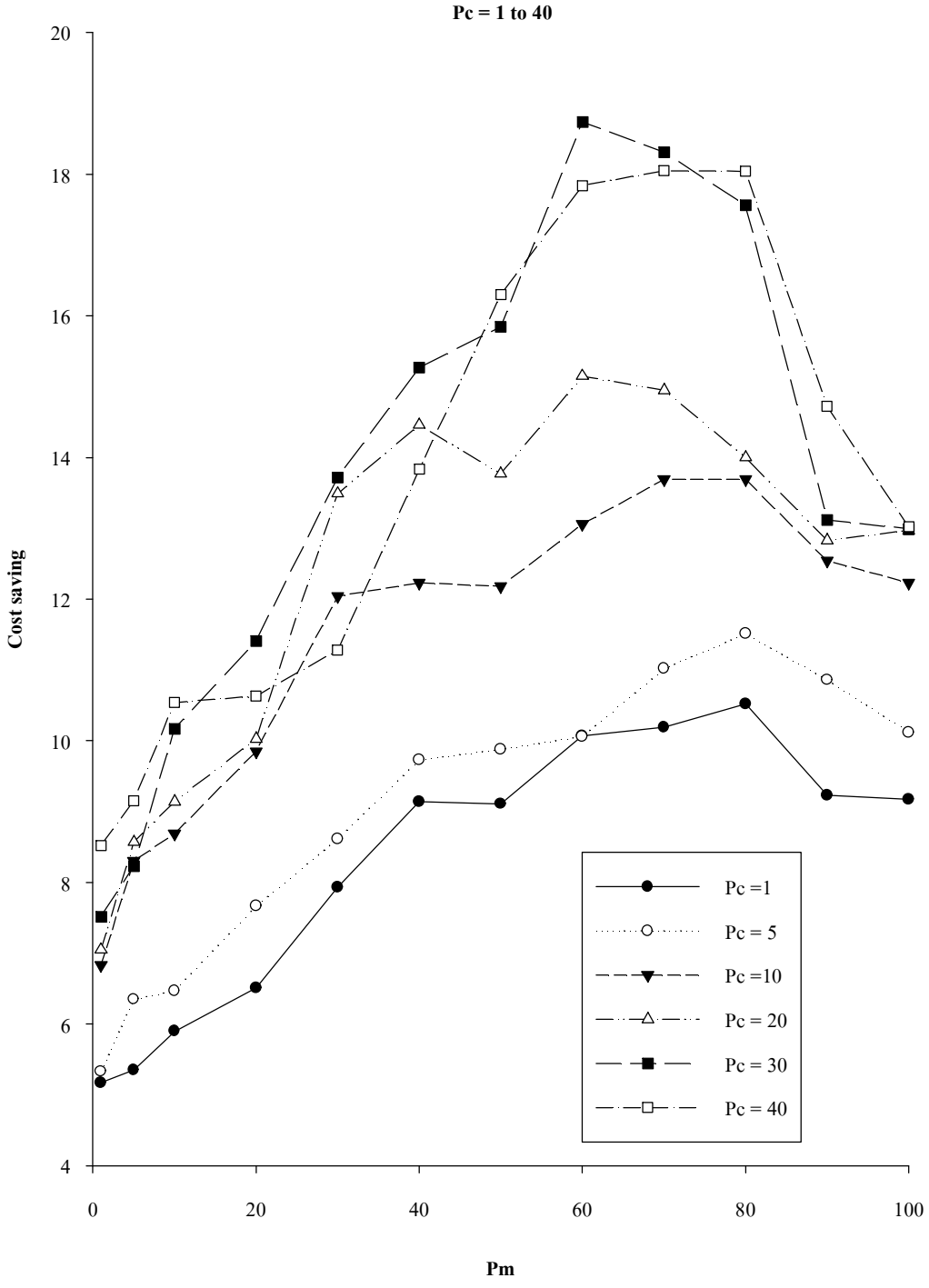
ภาพที่ 51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 600 จุดยอด



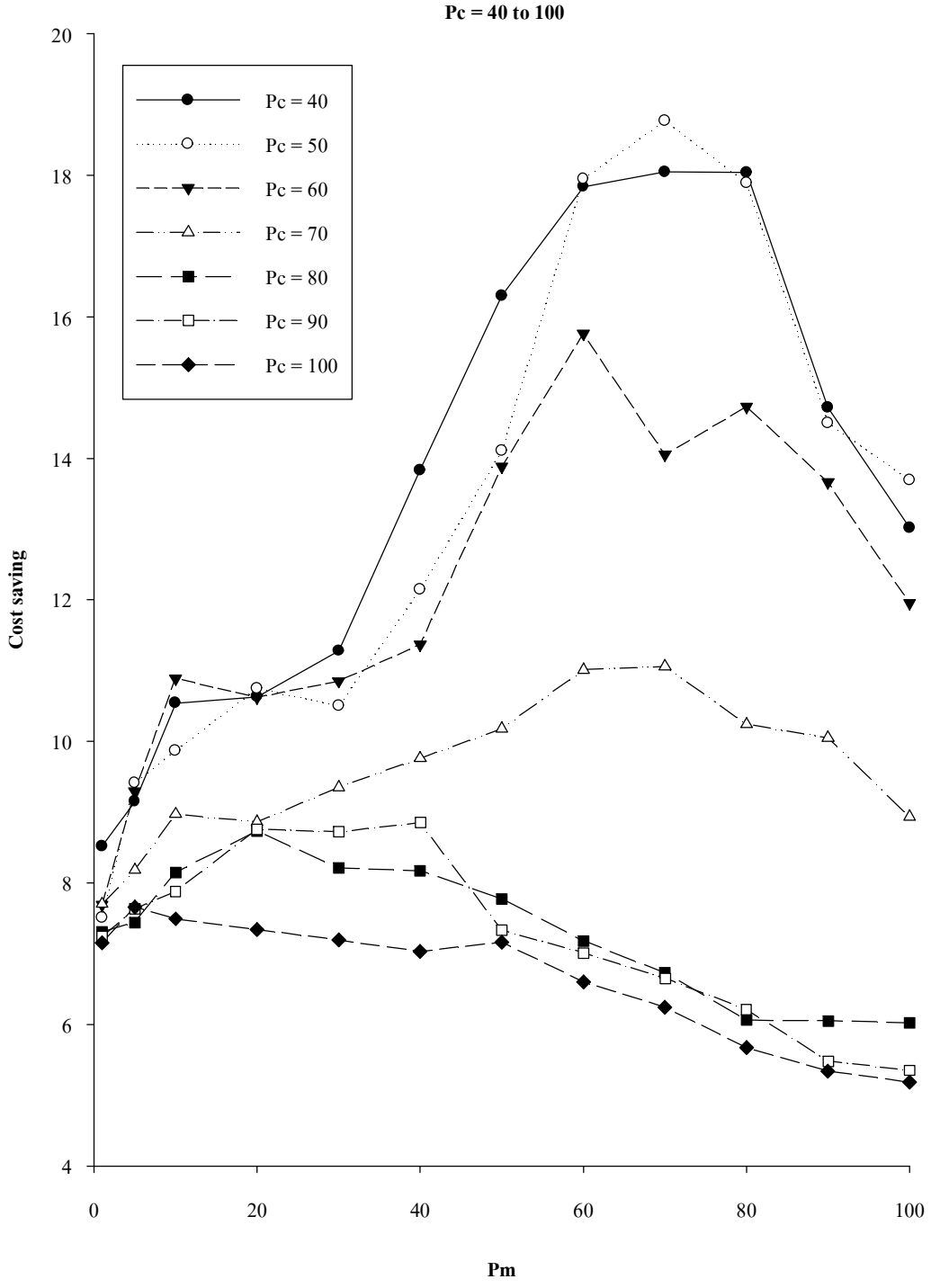
ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด



ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด



ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 40 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด



ภาพที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pm ในช่วงร้อยละ 1 ถึง 100 ค่า Pc ในช่วงร้อยละ 40 ถึง 100 และค่าเดินทางที่ประหยัดได้สำหรับปัญหาขนาด 2,000 จุดยอด

จากผลการทดลองตารางภาคผนวกที่ ก6 และตารางภาคผนวกที่ ก7 และภาพที่ 52 ถึงภาพที่ 55 สำหรับปัญหาขนาด 1,000 จุดยอด และ 2,000 จุดยอด ตามลำดับ พบว่าเมื่อค่า Pc เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้น โดยที่ค่า Pc ในช่วง 0.30 ถึง 0.50 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pc ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลง และเมื่อค่า Pm เพิ่มขึ้น ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ค่า Pm ในช่วง 0.60 ถึง 0.80 เป็นช่วงที่ให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ที่สูง แต่ถ้าเพิ่มค่า Pm ให้สูงกว่านี้จะทำให้ค่าต้นทุนที่ประหยัดได้ลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งทั้งค่า Pc และ Pm เป็นช่วงเดียวกับปัญหาขนาด 600 จุด ส่วนเวลาการหาคำตอบใกล้เคียงกันในทุกการทดลอง และค่าอัตราการลู่เข้ามีแนวโน้มในทางเดียวกับค่าต้นทุนที่ประหยัดได้

ผลการทดลองในการใช้วิธีการ HEGA แก้ปัญหา TSPMR ขนาดใหญ่มาก

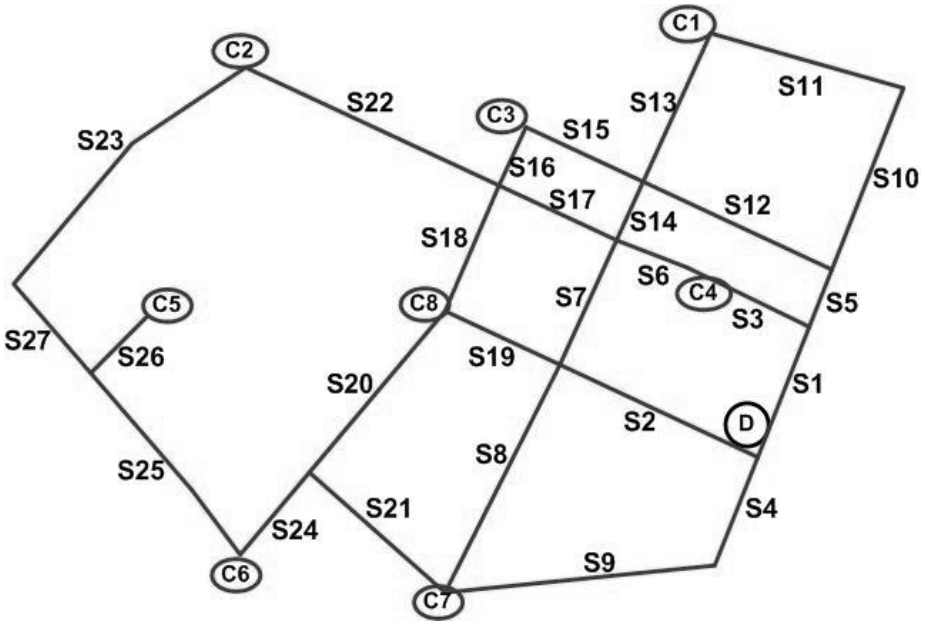
เพื่อเป็นการพิสูจน์ถึงประสิทธภาพของวิธีการ HEGA อีกวิธีหนึ่ง จึงได้ทดลองใช้ HEGA ในการแก้ปัญหา TSPMR ที่มีขนาดใหญ่มาก คือมีจำนวนจุดยอดเท่ากับ 30,000 จุดยอด ซึ่งมากกว่าจำนวนจุดยอดที่มากที่สุดของปัญหา TSP ตัวอย่าง จากข้อมูลของเวปไซต์ TSPLIB โดยกำหนดค่าตัวแปรป้อนเข้าตามผลการทดลองที่ได้ข้างต้น โดยกำหนดให้ขนาดของประชากรเท่ากับหนึ่งในยี่สิบของขนาดของปัญหา ซึ่งเท่ากับ 1,500 โครโมโซม กำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการเท่ากับ 400 รุ่น และกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์เท่ากับร้อยละ 40 และค่าความน่าจะปืนในการข้ามพวกเท่ากับร้อยยละ 70 โดยทำการรันโปรแกรม 5 ครั้ง สามารถหาค่าเฉลี่ยของค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) ได้ร้อยละ 6.07 มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.49 ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) ได้ร้อยละ 5.66 มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.34 และเวลาในการค้นหาคำตอบ (Run time) เท่ากับ 474,655 วินาที หรือเท่ากับ 5.49 วัน มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8,107

การใช้ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบเข้ารหัสผสมแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่งสินค้าและกำหนดสภาพจราจร

การใช้วิธีการ HEGA ที่นำเสนอเพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบรับและส่งสินค้าและกำหนดสภาพจราจร (Pickup and delivery vehicle routing problem with traffic conditions, PDVRPTC) ซึ่งปัญหา PDVRPTC เป็นปัญหาในการจัดเส้นทางของรถขนส่งสินค้าโดยที่รถขนส่งสินค้ามีเงื่อนไขทางด้านความสามารถในการบรรทุกและเวลาที่ใช้ในการขนส่ง การจัดเส้นทางจะ

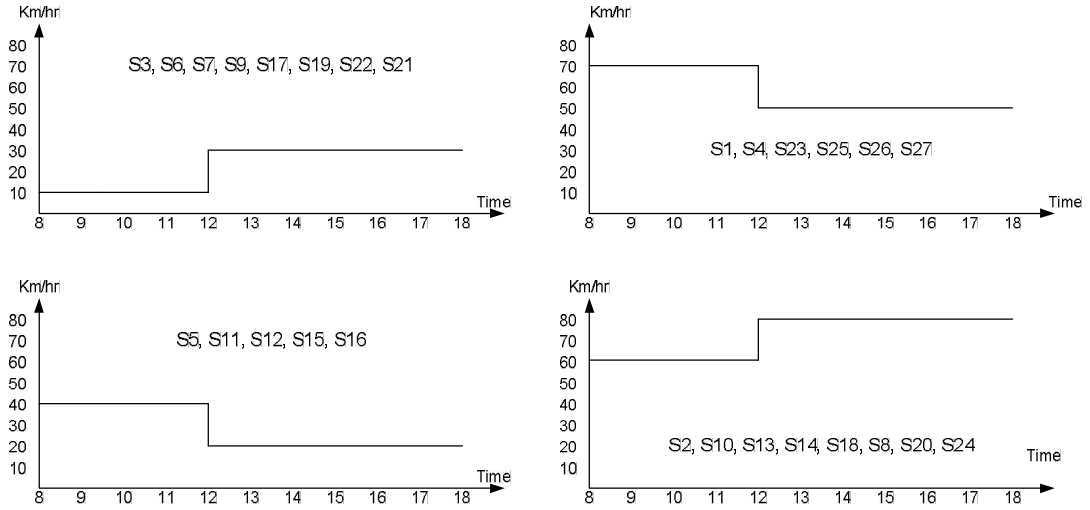
เริ่มต้นด้วยการที่รถขนส่งสินค้าออกจากคลังสินค้า (Depot) แล้วเดินทางไปส่งสินค้าแก่ลูกค้า (Customer) แต่ละรายที่กระจายออกไปในพื้นที่ที่ให้บริการ โดยมีสมมติฐานที่ว่า บริษัทมีข้อมูลความต้องการปริมาณสินค้าของลูกค้าอย่างแน่นอน (Deterministic transport demand) เมื่อรถขนส่งสินค้าส่งสินค้าจนหมดคันแล้วจะกลับมาที่คลังสินค้า โดยกำหนดให้รถขนส่งสินค้ามีขนาดบรรทุก 100 หน่วย

ปัญหาตัวอย่างที่กำหนดขึ้นมีลักษณะเป็นกราฟตามความสัมพันธ์ $G = (V_0, R)$ โดยที่ $V_0 = \{0\} \cup V$ เป็นชุดของลูกค้า ซึ่ง V_0 หมายถึงคลังสินค้า ลูกค้าแต่ละรายจะมีความต้องการที่จะรับสินค้าหรือส่งสินค้าแก่รถขนส่งสินค้นตามความสัมพันธ์ $d_i \geq 0$ และ $p_i \geq 0$ โดยที่คลังสินค้าจะมี $d_0 = p_0 = 0$ ปัญหาตัวอย่างมีลูกค้า 8 ราย (C1-C8) และมีถนน 27 เส้น (S1-S27) รถขนส่งสินค้าออกเดินทางจากคลังสินค้าเวลา 8.00 น. ดังแสดงในภาพที่ 56



ภาพที่ 56 ภาพแสดงปัญหา PDVRPTC ตัวอย่าง

ถนนแต่ละเส้นมีสภาพการจราจรที่แตกต่างกัน ได้แก่ความเร็วเฉลี่ยของรถขนส่งสินค้าในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาในการเดินทาง กำหนดให้ความเร็วรถขนส่งสินค้าบนถนนแต่ละเส้นเปลี่ยนตอน 12.00 น. ดังแสดงในภาพที่ 57 และระยะถนนต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1



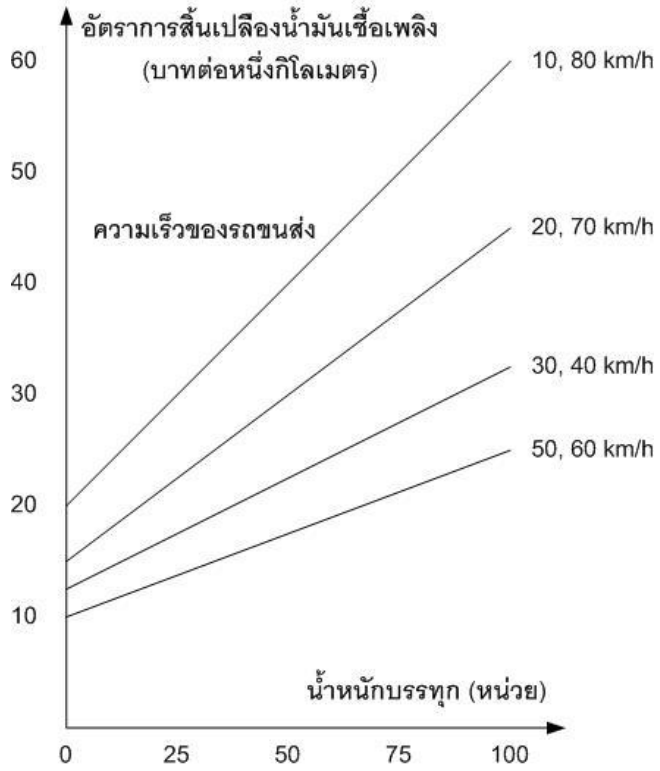
ภาพที่ 57 ความเร็วเฉลี่ยของรถขนส่งสินค้าที่ขึ้นกับช่วงเวลาในการเดินทาง

ตารางที่ 1 ระยะของถนนเส้นต่าง ๆ

ถนน	ระยะทาง (km)	ถนน	ระยะทาง (km)
S1	21.5	S15	16.4
S2	30	S16	8
S3	31.8	S17	16.2
S4	14.2	S18	22.6
S5	8.9	S19	14.4
S6	29.7	S20	31.6
S7	21.4	S21	16.1
S8	34.2	S22	35.4
S9	36.9	S23	10.8
S10	29.9	S24	16.5
S11	32.8	S25	31.7
S12	30.1	S26	12.1
S13	28.2	S27	12.5
S14	7.8		

สมมติให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (บาทต่อหนึ่งกิโลมเตร) แปรผันตรงกับน้ำหนักบรรทุก (หน่วย) และความเร็วเฉลี่ยของรถขนส่งสินค้า (กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ดังแสดงในภาพที่ 58

จากภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงกับความเร็วเฉลี่ยของรถขนส่งสินค้าและน้ำหนักบรรทุกของรถ เป็นไปตามสมการ $Y = mX + A$ โดยที่ m มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้สมมติว่าน้ำมันเชื้อเพลิงราคาลิตรละ 30 บาท



ภาพที่ 58 ภาพแสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกและความเร็วของรถขนส่ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ในสมการคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

ความเร็วของรถยนต์ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	M	A
50, 60	0.15	10.0
30, 40	0.20	12.5
20, 70	0.30	15.0
10, 80	0.40	20.0

เนื่องจากว่าถนนทุกเส้นเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย เส้นทางระหว่างลูกค้าแต่ละรายจึงมีมากกว่า 1 เส้นทาง ในปัญหาตัวอย่างนี้ได้กำหนดเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างลูกค้าเพื่อไม่ให้เส้นทางมีมากเกินไป ดังเช่น เส้นทางระหว่างลูกค้ารายที่ 1 และรายที่ 3 มีถึง 8 เส้นทาง ได้แก่ S13 - S15, S13 - S14 - S17 - S16, S13 - S14 - S7 - S19 - S18 - S16, S11 - S10 - S12 - S15, S11 - S10 - S12 - S15, S11 – S10 – S12 – S14 – S17 – S16, S11 – S10 – S5 – SS3 – S6 – S17 – S16, S11 – S10 – S5 – S1 – S2 – S7 – S17 – S16 ซึ่งมีมากเกินไปและบางเส้นทางไม่น่าจะเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงกำหนดให้เส้นทางที่เป็นไปได้มี 2 เส้นทาง ได้แก่ S13 – S15 และ S13 - S14 - S17 - S16 ส่วนเส้นทางที่เป็นไปได้ระหว่างลูกค้ารายอื่น ๆ ถูกกำหนดในลักษณะเดียวกัน อยู่ในช่วง 2 – 5 เส้นทางที่เป็นไปได้

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการ HEGA ค่าตัวแปรป้องเข้าต่าง ๆ จะกำหนดค่าตามสรุปผลการทดลอง โดยกำหนดให้ค่า N = 10 ค่า G = 300 รุ่น ค่า Pc = 0.5 และค่า Pm = 0.5 โดยแบ่งปัญหาตัวอย่างออกเป็นปัญหาย่อย 16 ปัญหา ที่มีจำนวนลูกค้าตั้งแต่ 5 รายถึง 8 ราย ปริมาณสินค้าที่รถขนส่งสินค้าต้องส่งและรับแตกต่างกันในแต่ละปัญหาย่อย ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งปริมาณที่มีค่าเป็นบวกแสดงถึงปริมาณสินค้าที่ลูกค้าต้องการ และปริมาณที่มีค่าเป็นลบแสดงถึงสินค้าที่ลูกค้าต้องการส่งให้กับรถขนส่งสินค้า แล้วหาค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) และเวลาในการค้นหาคำตอบ (Run time) ในทุกการทดลองจะหาคำตอบ 5 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 3 ผลการทดลองของปัญหา PDVRPTC

จำนวนลูกค้า	ปริมาณการรับและส่งสินค้าของรถขนส่งสินค้า								Cost saving	Conv. Rate	Time
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	(%)	(%)	(Sec.)
5	+0,-20	+25,-0	+0,-30	+10,-10	+25,-0	-	-	-	46.8	43.9	7.6
	+10,-15	+20,-10	+5,-35	+30,-0	+0,-20	-	-	-	48.9	41.5	8.1
	+0,-35	+15,-0	+5,-15	+20,-10	+10,-0	-	-	-	47.1	41.3	7.9
	+15,-0	+0,-20	+15,-0	+0,-25	+0,-30	-	-	-	45.7	38.0	8.4
6	+0,-20	+25,-0	+0,-30	+10,-10	+25,-0	+10,-10	-	-	49.4	41.4	7.9
	+10,-15	+20,-10	+5,-35	+30,-0	+0,-20	+15,-10	-	-	47.0	40.1	8.4
	+0,-35	+15,-0	+5,-15	+20,-10	+10,-0	+0,-30	-	-	48.2	41.3	9.2
	+15,-0	+0,-20	+15,-0	+0,-25	+0,-30	+20,-0	-	-	45.3	39.2	9.8
7	+0,-20	+25,-0	+0,-30	+10,-10	+25,-0	+10,-10	+15,-0	-	47.6	40.5	8.7
	+10,-15	+20,-10	+5,-35	+30,-0	+0,-20	+15,-10	+10,-0	-	45.9	42.6	9.0
	+0,-35	+15,-0	+5,-15	+20,-10	+10,-0	+0,-30	+20,-10	-	46.7	42.2	10.1
	+15,-0	+0,-20	+15,-0	+0,-25	+0,-30	+20,-0	+10,-15	-	40.1	38.9	9.9
8	+0,-20	+25,-0	+0,-30	+10,-10	+25,-0	+10,-10	+15,-0	+0,-15	45.4	40.8	9.9
	+10,-15	+20,-10	+5,-35	+30,-0	+0,-20	+15,-10	+10,-0	+0,-10	47.0	39.7	10.0
	+0,-35	+15,-0	+5,-15	+20,-10	+10,-0	+0,-30	+20,-10	+25,-0	48.6	41.6	9.8
	+15,-0	+0,-20	+15,-0	+0,-25	+0,-30	+20,-0	+10,-15	+5,-10	47.8	41.0	9.6

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวิธีการ HEGA สามารถลดต้นทุนในการขนส่งของปัญหา PDVRPTC ได้ร้อยละ 45.3 - 49.4 การลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีสูงถึงร้อยละ 38.0 - 42.6 และสามารถหาคำตอบได้ภายในเวลาอันรวดเร็ว (ทุกการทดลองใช้เวลาไม่เกิน 10 วินาที)

วิจารณ์

1. ขนาดของประชากร (N) ของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดไม่เกิน 100 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/2) ขนาดของประชากรของปัญหาที่มีขนาดเกินกว่า 100 จุดยอด แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับหนึ่งในสิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/10) และขนาดของประชากรของปัญหาที่มีขนาดเกินกว่า 1,000 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับหนึ่งในยี่สิบของจำนวนจุดยอด (N = VerticeSize/20) ถ้ากำหนดให้ขนาดของประชากรมากกว่านี้ และเวลาในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับขนาดของประชากร ดังแสดงในตารางผนวกที่ 1 และภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 28

2. จำนวนรุ่นวิวัฒนาการ (G) ของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดไม่เกิน 60 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับ 200 รุ่น จำนวนรุ่นวิวัฒนาการของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกินกว่า 60 จุดยอด แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับ 300 รุ่น และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกิน 1,000 จุดยอด ควรจะกำหนดให้เท่ากับ 400 รุ่น ถ้ากำหนดให้จำนวนรุ่นวิวัฒนาการมากกว่านี้ และเวลาการหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับจำนวนรุ่นวิวัฒนาการ ดังแสดงในตารางผนวกที่ 2 และภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 45

3. ความน่าจะเป็นของการข้ามพวก (Pc) ของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดไม่เกิน 100 จุดยอด ควรจะกำหนดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 60 ความน่าจะเป็นของการข้ามพวกของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกิน 100 จุดยอด ควรจะกำหนดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 30 – 50 ถ้ากำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกมากหรือน้อยกว่านี้ คำตอบที่ได้จะแย่ลง ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 ถึงตารางผนวกที่ 7 และภาพที่ 46 ถึงภาพที่ 55 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่า Pc ที่เหมาะสมของวิธีการที่พัฒนาขึ้นแตกต่างจากค่า Pc ที่เหมาะสมของวิธีขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบทั่วไปที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 60 - 95

4. ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Pm) ของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดไม่เกิน 600 จุดยอด ควรจะกำหนดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 30 – 70 ความน่าจะเป็นของการข้ามพวกของปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกิน 600 จุด ควรจะกำหนดให้อยู่ในช่วงร้อยละ 60 – 80 ถ้ากำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกมากหรือน้อยกว่านี้ คำตอบที่ได้จะแย่ลง ดังแสดงในตารางผนวกที่ 3 ถึงตารางผนวกที่ 7 และภาพที่ 46 ถึงภาพที่ 55 และจากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่า Pm ที่เหมาะสมของวิธีการที่พัฒนาขึ้นแตกต่างจากค่า Pm ที่เหมาะสมของวิธีขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบทั่วไปที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0 - 5

5. ค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดี (Convergence rate) แปรผันตรงกับต้นทุนค่าเดินทางที่ประหยัดได้ (Cost saving) และเวลาการหาคำตอบ (Run time) ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกและค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา ขนาดของประชากร และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการ

6. วิธีการ HEGA สามารถแก้ปัญหา TSPMR ที่มีขนาดไม่เกิน 100 จุดยอด ได้ดีมาก โดยสามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 50 สำหรับปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกินกว่า 100 จุดยอด แต่ไม่เกิน 1,000 จุดยอด สามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 20 และสำหรับปัญหา TSPMR ที่มีขนาดเกินกว่า 1,000 จุดยอด จะลดต้นทุนค่าเดินทางได้น้อยกว่าร้อยละ 20

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเข้ารหัสผสมแบบหลายความสัมพันธ์ (HEGA) ที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถหาคำตอบโดยประมาณของปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้นทุนค่าเดินทางที่สามารถลดลงได้มีค่าแปรผกผันกับขนาดของปัญหา เช่น สำหรับปัญหาที่มีขนาดไม่เกิน 100 จุดยอด โดยสามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 50 สำหรับปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ที่มีขนาดระหว่าง 100 ถึง 1,000 จุดยอด สามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้ประมาณร้อยละ 20 และปัญหาการเดินทางของพนักงานขายแบบหลายความสัมพันธ์ที่มีขนาดเกินกว่า 1,000 จุดยอดขึ้นไป สามารถลดต้นทุนค่าเดินทางได้น้อยกว่าร้อยละ 20 สำหรับปัญหาขนาดใหญ่มากที่มีจำนวนจุดยอด 30,000 จุดยอด สามารถลดต้นทุนการเดินทางได้ร้อยละ 6.07

2. พบว่า แม้ค่าร้อยละของต้นทุนการเดินทางที่สามารถลดได้ของปัญหาขนาดใหญ่จะน้อยกว่าค่าร้อยละของต้นทุนการเดินทางที่สามารถลดได้ของปัญหาขนาดเล็ก แต่เมื่อเปรียบเทียบเป็นจำนวนเงินที่ลดลงได้จะมีมูลค่ามากกว่า เนื่องจากปัญหาขนาดใหญ่มีต้นทุนที่สูงกว่ามาก

3. พบว่าค่าอัตราการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีแปรผันตรงกับต้นทุนค่าเดินทางที่ประหยัดได้ และเวลาการหาคำตอบไม่ขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกและค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา ขนาดของประชากร และจำนวนรุ่นวิวัฒนาการ

4. พบว่าค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ที่เหมาะสมของวิธีการ HEGA แตกต่างจากความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ที่เหมาะสมของวิธีขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบทั่วไปที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 60 ถึง 95 และค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกที่เหมาะสมของวิธีการ HEGA แตกต่างจากค่าความน่าจะเป็นของการข้ามพวกที่เหมาะสมของวิธีขั้นตอนวิธีพันธุกรรมแบบทั่วไปที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0 ถึง 5 โดยค่าที่เหมาะสมของตัวป้อนเข้าต่าง ๆ แตกต่างกันไปตามขนาดของปัญหา

ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยต่อไปควรจะพัฒนาการดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งได้แก่ การคัดเลือก การข้ามพวก และการกลายพันธุ์ ให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้น หรือควรจะประยุกต์นำเอาวิธีการ HEGA ที่พัฒนาขึ้นไปแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่าง ๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Abadeh, M. S., J. Habibi, Z. Barzegar and M. Sergi. 2007. A parallel genetic local search algorithm for intrusion detection in computer networks. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 20: 1058–1069.

Abboud, N., M. Inuiguchi, M. Sakawa and Y. Uemura. 1998. Theory and Methodology Manpower allocation using genetic annealing. **European Journal of Operational Research**. 111: 405-420.

Acosta, G. and E. Todorovich. 2003. Genetic algorithms and fuzzy control: a practical synergism for industrial applications. **Computers in Industry**. 52: 83–195.

Affi, Z., Kribi, B. EL. and Romdhane, L. 2007. Advanced mechatronic design using a multi-objective genetic algorithm optimization of a motor-driven four-bar system. **Mechatronics**. 17: 489–500.

Ahuja, R. K., J. B. Orlin and A. Tiwari. 2000. A greedy genetic algorithm for the quadratic assignment problem. **Computers & Operations Research**. 27: 917-934.

Angelov, P. P. and R. A. Buswell. 2003. Automatic generation of fuzzy rule-based models from data by genetic algorithms. **Information Sciences**. 150: 17–31.

Baghmisheh, M. T. V., M. Peimani, M. H. Sadeghi and M. M. Ettefagh. 2007. Crack detection in beam-like structures using genetic algorithms. **Applied Soft Computing**, doi:10.1016/j.asoc.2007.10.003.

Balakrishnana, J., C. H. Cheng, D. G. Conway and C. M. Lau. 2003. A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem. **International Journal of Production Economics**. 86: 107–120.

Balas, E. and N. Christofied. 1981. A restricted lagrangean approach to the traveling salesman problem. **Mathematical Programming**. 21: 19-46.

Baumal, A. E., J. J. McPhee and P.H. Calamai. 1998. Application of genetic algorithms to the design optimization of an active vehicle suspension system. **Computer methods in applied mechanics and engineering**. 163: 87-94.

Begum, M., G. K. I. Mann and R. G. Gosine. 2008. Integrated fuzzy logic and genetic algorithmic approach for simultaneous localization and mapping of mobile robots. **Applied Soft Computing**. 8: 150–165.

Brisa, R., E. Chatelet and F. Yalaoui. 2003. New method to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems. **Reliability Engineering and System Safety**. 82: 247–255.

Bruno, L., G. Felice, L. Pagnotta, A. Poggialini and G. Stigliano. 2008. Elastic characterization of orthotropic plates of any shape via static testing. **International Journal of Solids and Structures**. 45: 908–920.

Boulif, M. and K. Atif. 2008. A new fuzzy genetic algorithm for the dynamic bi-objective cell formation problem considering passive and active strategies. **International Journal of Approximate Reasoning**. 47: 141–165.

Burguburu, S. and A. L. Pape. 2003. Improved aerodynamic design of turbomachinery bladings by numerical optimization**. Aerospace Science and Technology**. 7: 277–287.

Canyurt, O. E. 2004. Fatigue strength estimation of adhesively bonded tubular joint using genetic algorithm approach. **International Journal of Mechanical Sciences**. 46: 359–370.

Carballido, J. A., I. Ponzoni and N. B. Brignole. 2007. CGD-GA: A graph-based genetic algorithm for sensor network design**. Information Sciences**. 177: 5091–5102.

Carter, A. E. and C. T. Ragsdale. 2006. A new approach to solving the multiple traveling salesperson problem using genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**. 175: 246–257.

Cen, L. 2007. Frequency response masking filter design using an oscillation search genetic algorithm. **Signal Processing**. 87: 3086–3095.

Chaibakhsh, A., A. Ghaffari, S. A. Moosavian. 2007. A simulated model for a once-through boiler by parameter adjustment based on genetic algorithms. **Simulation Modelling Practice and Theory**. 15: 1029–1051.

Chang, P. C., J. C. Hsieh and Y. W. Wang. 2003. Genetic algorithms applied in BOPP film scheduling problems: minimizing total absolute deviation and setup times. **Applied Soft Computing**. 3: 139–148.

Chao, D., C. Ye and H. Miao. 2007. Two-Level Genetic Algorithm for Clustered Traveling Salesman Problem with Application in Large-Scale TSPs. **Tsinghua Science and Technology**. 12: 459-465.

Chatterjee, S., C. Carrera and L. Lynch. 1996. Genetic algorithms and traveling salesman problems. **European Journal of Operational Research**. 93: 490–510.

Chen, C. Y. and R. C. Hwang. 2007. A new variable topology for evolutionary hardware design. **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2007.09.017.

Chen, K. J. and P. Ji. 2007. A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval. **Expert Systems with Applications**. 33: 1004–1010.

Chen,K. Z. and X. A. Feng. 2003. Solid model reconstruction from engineering paper drawings using Genetic Algorithms. **Computer-Aided Design**. 35: 1235–1248.

Chen, L. H. and H. D. Hsiao. 2007. Feature selection to diagnose a business crisis by using a real GA-based support vector machine: An empirical study. **Expert Systems with Applications**. doi:10.1016/j.eswa.2007.08.010.

Chen, J. S., J. C. H. Pan and C. M. Lin. 2008. A hybrid genetic algorithm for the re-entrant flow-shop scheduling problem. **Expert Systems with Applications**. 34: 570–577.

Cheng, J. 2007. Hybrid genetic algorithms for structural reliability analysis. **Computers and Structures**. 85: 1524–1533.

Chien, W. T. and C. Y. Chou. 2001. The prediction model for machinability of 304 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. 118: 442-447.

Chiou, Y. C. and L. W. Lan. 2001. Theory and Methodology: Genetic clustering algorithm. **European Journal of Operation Research**. 135: 413-427.

Cho, H. K. and R. E. Rowlands. 2007. Reducing tensile stress concentration in perforated hybrid laminate by genetic algorithm. **Composites Science and Technology**. 67: 2877–2883.

Choi, I. C., S. I. Kim and H. S. Kim. 2003. A genetic algorithm with a mixed region search for the asymmetric traveling salesman problem. **Computers & Operations Research**. 30: 773–786.

Christofied, N. and S. Eilon. 1972. Algorithms for large scale traveling salesman problems. **Operation Research Quarterly**. 23: 511-518.

Chu, B., D. Kim, D. Hong, J. Park, J. T. Chung, J. H. Chung and T. H. Kim. 2008. GA-based fuzzy controller design for tunnel ventilation systems. **Automation in Construction**. 17: 130–136.

Coley, D. A. 1999. **An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers**. World Scientific Publishing.

Cui, X., S. Wang and S. J. Hu. 2008. A method for optimal design of automotive body assembly using multi-material construction. **Materials and Design**. 29: 381–387.

Dantzig, G. B., D. R. Fulkerson and S.M. Johnson. 1954. Solution of a Large Scale Travelling Salesman Problem. **Operation Research.** 2: 393–410.

Das, S. and A. Konar. 2007. A swarm intelligence approach to the synthesis of two-dimensional IIR filters. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 20: 1086–1096.

Davis, L. 1985. Job shop scheduling with genetic algorithms. In: **Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms**, London, pp. 136–140.

Duan, G. and Y. Yu. 2003. Power distribution system optimization by an algorithm for capacitated Steiner tree problems with complex-flows and arbitrary cost functions. **Electrical Power and Energy Systems**. 25: 515–523.

El-Zonkoly, E. M. 2005. Power system model validation for power quality assessment applications using genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**. 29: 941–944.

Epstein, B. and S. Peigin. 2007. Accurate CFD driven optimization of lifting surfaces for wing-body configuration. **Computers & Fluids.** 36: 1399–1414.

Fischetti, M. and P. Toth. 1992. An additive bounding procedure for the asymmetric traveling salesman problem. **Mathematical Programing**. 53: 173-197.

Fischetti, M. and P. Toth. 1997. A polyhedral approach to the asymmetric traveling salesman problem**. Management Science**. 43: 1520-1536.

Gendreau, M., A. Hertz and G. Laporte. 1992. New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. **Management Science**. 43: 1520-1536.

Geroa, M. B. P., A. B. Garc and J. J. Coz. 2006. Design optimization of 3D steel structures: Genetic algorithms vs. classical techniques. **Journal of Constructional Steel Research**. 62: 1303–1309.

Gholap, A. K. and J. A. Khan. 2007. Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators. **Applied Energy**. 84: 1226–1239.

Glover, F. 1977. Heuristic for integer programming using surrogate constraints. **Decision Science.** 8: 156-166.

Glover, F. 1989. Tabu search, Part 1. **ORSA Journal of Computing**. 1: 190-206.

Glover, F. 1990. Tabu search, Part 2. **ORSA Journal of Computing**. 1: 4-32.

Goldberg, D. E. 1989. **Genetic algorithm in search, optimization and machine learning**. Addison Wesley.

Goldberg, D. E. and R. J. Lingle. 1985. Alleles, loci, and the traveling salesman problem. In: **Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms**, London, pp. 154–159.

Golden, B. L., and W. R. Stewart. 1985. Empirical analysis of heuristics. **The Traveling Salesman Problem**. John Wiley & Sons, Chichester.

Gomez, A., Q. I. Fernandez, D. D. L. F. Garcıa and P. J. Garcıa. 2003. Using genetic algorithms to resolve layout problems in facilities where there are aisles. **International Journal of Production Economics**. 84: 271–282.

Gong, D., G. Yamazaki, M. Gen and W. Xu. 1999. A genetic algorithm method for one dimensional machine location problems. **International Journal of Production Economics**. 60: 337-342.

Gopal, A. V. and P. V. Rao. 2003. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. 43: 1327–1336.

Grady, S. A., M. Y. Hussaini and M. M. Abdullah. 2005. Placement of wind turbines using genetic algorithms. **Renewable Energy**. 30: 259–270.

GrOschel, M. 1980. On the symmetric traveling salesman problem: Solution of a 120-city problem. **Mathematical Programing**. 12: 61-77.

GrOschel, M. and O. Holland. 1991. Solution of a large-scale traveling salesman problems. **Mathematical Programming**. 51: 141-202.

He, R. S. and S. F. Hwang. 2007. Identifying damage in spherical laminate shells by using a hybrid real-parameter genetic algorithm. **Composite Structures**. 80: 32–41.

Hilmann, J., M. Paas, A. Haenschke and T. Vietor. 2007. Automatic concept model generation for optimization and robust design of passenger cars. **Advances in Engineering Software**. 38: 795–801.

Ho, W., G. T. Ho, P. Ji and H C. Lau. 2007. A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. doi:10.1016/j.engappai.2007.06.001.

Hopfield, J. J. and D. W. Tank. 1985. Neural computation of decisions in optimization problem. Bio. **Cybern**. 52:141-152.

Howe, M. S. 2007. The genetically optimized tunnel-entrance hood. **Journal of Fluids and Structures**. 23: 1231–1250.

Hua, C. Y. and H. Y. Chang. 2008. Dynamic programming decision path encoding of genetic algorithms for production allocation problems. **Computers & Industrial Engineering**. 54: 53–65.

Huang, M. L. and Y. H. Hung. 2008. Combining radial basis function neural network and genetic algorithm to improve HDD driver IC chip scale package assembly yield. **Expert Systems with Applications**. 34: 588–595.

Juang, Y. S., S. S. Lin and H. P. Kao. 2007. An adaptive scheduling system with genetic algorithms for arranging employee training programs. **Expert Systems with Applications**. 33: 642–651.

Karp, R. M. 1979. A patching algorithm for the nonsymmetric traveling-salesman problem. **SIAM Journal of Computing**. 8: 561-573.

Kaveh, A. and H. A. R. Bondarabadyb. 2003. A hybrid graph-genetic method for domain decomposition. **Finite Elements in Analysis and Design**. 39: 1237–1247.

Khorsanda, A. R., R. Mohammad and T. Akbarzadeh. 2007. Multi-objective meta level soft computing-based evolutionary structural design. **Journal of the Franklin Institute**. 344: 595–612.

Kim, D. and J. Park. 2007. Application of adaptive control to the fluctuation of engine speed at idle. **Information Sciences**. 177: 3341–3355.

Kim, G. H., J. E. Yoon, S. H. An, H. H. Cho and K. I. Kang. 2004. Neural networkmodel incorporating a genetic algorithm in estimating construction costs. **Building and Environment.** 39: 1333 – 1340.

Kim, K. J. and H. Ahn. 2008. A recommender system using GA K-means clustering in an online shopping market. **Expert Systems with Applications**. 34: 1200–1209.

Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, Jr. and M. P. Vecchi. 1983. Optimization by simulated annealing**. Science**. 222: 671-680.

Knosala, R. and T. Wal. 2001. A production scheduling problem using genetic algorithm. **Journal of Materials Processing Technology**. 109: 90–95.

Ko, C. H. and M. Y. Cheng. 2003. Hybrid use of AI techniques in developing construction management tools. **Automation in Construction**. 12: 271– 281.

Kripakaran, P., A. Gupta and J. W. Baugh. 2007. A novel optimization approach for minimum cost design of trusses**. Computers and Structures**. 85: 1782–1794.

Kwon, S. H., H. T. Kim and M. K. Kang. 2005. Determination of the candidate arc set for the asymmetric traveling salesman problem. **Computers & Operations Research**. 32: 1045–1057.

Kwon, Y. D., S. B. Kwon, S. B. Jin and J. Y. Kim. 2003. Convergence enhanced genetic algorithm with successive zooming method for solving continuous optimization problems. **Computers and Structures**. 81: 1715–1725.

Laszlo, M. and S. Mukherjee. 2007. A genetic algorithm that exchanges neighboring centers for k-means clustering. **Pattern Recognition Letters**. 28: 2359–2366.

Liatsis, P. and H. M. Tawfik. 1999. Two-dimensional road shape optimization using genetic algorithms. **Mathematics and Computers in Simulation**. 51: 19-31.

Liaw, C. F. 2000. Theory and Methodology: A hybrid genetic algorithm for the open shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**. 124: 28-42.

Lin, S. and B. W. Kerninghan. 1973. An effective heuristics algorithm for the traveling salesman problem. **Operation Research**. 21: 498-516.

Lee, Z. J., S. F. Su, C. C. Chuang and K. H. Liu. 2008. Genetic algorithm with ant colony optimization (GA-ACO) for multiple sequence alignment. **Applied Soft Computing**. 8: 55–78.

Lep, M. and M. Sejnoha. 2003. New approach to optimization of reinforced concrete beams. **Computers and Structures**. 81: 1957–1966.

Lysgaard, J. 1999. Cluster based branching for the asymmetric traveling salesman problem. **European Journal of Operation Research**. 119: 314-325.

Madadi, R. R. and C. Balaji. 2007. Optimization of the location of multiple discrete heat sources in a ventilated cavity using artificial neural networks and micro genetic algorithm. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2007.08.033.

Marimuthua, S., S.G. Ponnambalamb and N. Jawahar. 2008. Evolutionary algorithms for scheduling m-machine flow shop with lot streaming. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. 24: 125–139.

Mawdesleya, M. J. and S. H. Al-Jibouri. 2003. Proposed genetic algorithms for construction site layout. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 16: 501–509.

Miller, D. L. and J. F. Penky. 1989. Results from a parallel branch and bound algorithm for solving large asymmetric traveling salesman problems. **Operation Research Letter**. 8: 129-135.

Mitsi, S., K. D. Bouzakis, D. Sagris and G. Mansour. 2008. Determination of optimum robot base location considering discrete end-effector positions by means of hybrid genetic algorithm. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**. 24: 50–59.

Moon, C., J. Kim, G. Choi and Y. Seo. 2002. An efficient genetic algorithm for the traveling problem with precedence constraints. **European Journal of Operational Research**. 140: 606–617.

Muhl, E., P. Charpentierb and F. Chaxel. 2003. Optimization of physical flows in an automotive manufacturing plant: some experiments and issues. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 16: 293–305.

Oliver, I., Smith, D., Holland, J., 1987. A study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem. In: **Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms**, London, pp. 224–230.

Ostermark, R. 1999. Solving a nonlinear non-convex trim loss problem with a genetic hybrid algorithm. **Computers & Operations Research**. 26: 623-635.

Padberg, M. W. and G. Rinaldi. 1987. Optimization of a 532-city symmetric traveling salesman problem by branch-and-cut. **Operation Research Letter**. 6: 1-7.

Parappagoudar, M. B., D. K. Pratihar and G. L. Datta. 2008. Forward and reverse mappings in green sand mould system using neural networks. **Applied Soft Computing**. 8: 239–260.

Patvichaichod., S. and P. Visuwan. 2007. Traveling salesman problem with traffic condition. In: **Proceedings of The 2nd International Conference on Operations and Supply Chain Management**. Bangkok, Thailand. pp. 1067-1073.

Patvichaichod., S. and P. Visuwan. 2008. Pickup and delivery traveling salesman problem with traffic conditions**. Kaetsart journal; Natural science**. 42: 387-395.

Pawar, P. M. and R. Ganguli. 2003. Genetic fuzzy system for damage detection in beams and helicopter rotor blades. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. 192: 2031–2057.

Poursamad, A. 2007. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles. **Control Engineering Practice**. doi:10.1016/j.conengprac.2007.10.003.

Pina, J. M. And P. U. Lima. 2003. A glass furnace operation system using fuzzy modelling and genetic algorithms for performance optimization. **Engineering Applications of Artificial Intelligence.** 16: 681–690.

Righini, G. and M. Trubian. 2004. A note on the approximation of the asymmetric traveling salesman problem. **European Journal of Operational Research**. 153: 255–265.

Rosenkrantz, G., R. E. Stearns and P. M. Lewis. 1977. An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. **SIAM journal on Computing**. 6: 563-581.

Roya, A., M. K. Maitib, S. Kara and M. Maitic. 2007. Two storage inventory model with fuzzy deterioration over a random planning horizon. **Mathematical and Computer Modelling**. 46: 1419–1433.

Samanta, B. 2004. Gear fault detection using artificial neural networks and support vector machines with genetic algorithms. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 18: 625–644.

Sarkar, B., L. K. Singh and D. Sarkar. 2003. Approximation of digital curves with line segments and circular arcs using genetic algorithms. **Pattern Recognition Letters**. 24: 2585–2595.

Schmitt, L., and M. Amini. 1998. Performance characteristics of alternative genetic algorithmic approaches to the traveling salesman problem using path representation: An empirical study. **European Journal of Operational Research**. 108: 551–570.

Shahrokhi, A. and A. Jahangirian. 2007. Airfoil shape parameterization for optimum Navier–Stokes design with genetic algorithm**. Aerospace Science and Technology**. 11: 443–450.

Shiau, D. F., S. C. Cheng and Y. M. Huang. 2008. Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**. 34: 1133–1143.

Silva, V. V. R., P. J. Fleming, J. Sugimoto and R. Yokoyama. 2008. Multiobjective optimization using variable complexity modelling for control system design. **Applied Soft Computing**. 8: 392–401.

Suresh, S., P.B. Sujit and A.K. Rao. 2007. Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design. **Composite Structures**. 81: 598–605.

Syswerda, G. 1989. Uniform crossover in genetic algorithms. In: **Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms**, Los Altos, pp. 502–508.

TSPLIB. **http://elib.zib.de/pub/mp-testdata/tsp/tsplib/tsplib.html**, June 21, 2008.

Torbati, M. M., A. J. Keane, S. J. Elliott, M. J. Brennan and E. Rogers. 2003. Passive vibration control of a satellite boom structure by geometric optimization using genetic algorithm. **Journal of Sound and Vibration**. 267: 879–892.

Ugur, A. 2008. Path planning on a cuboid using genetic algorithms. **Information Sciences**. 178: 3275–3287.

Wang, H.S. 2008. Configuration change assessment: Genetic optimization approach with fuzzy multiple criteria for part supplier selection decisions. **Expert Systems with Applications**. 34: 1541–1555.

Wang, J., and M. Ghosn. 2005. Linkage-shredding genetic algorithm for reliability assessment of structural systems. **Structural Safety**. 27: 49–72.

Wang, Y. Z. 2003. Using genetic algorithm methods to solve course scheduling problems. **Expert Systems with Applications**. 25: 39–50.

Worden, K., G. Manson, G. Hilson and S.G. Pierce. 2008. Genetic optimisation of a neural damage locator. **Journal of Sound and Vibration**. 309: 529–544.

Wu, Z., G. Ding, K. Wang and M. Fukaya. 2007. Application of a genetic algorithm to optimize the refrigerant circuit of fin-and-tube heat exchangers for maximum heat transfer or shortest tube. **International Journal of Thermal Sciences**, doi:10.1016/j.ijthermalsci. 2007.08.005.

Valdevit, L., A. Pantano, H. A. Stone and A. G. Evans. 2006. Optimal active cooling performance of metallic sandwich panels with prismatic cores. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 49: 3819–3830.

Yang, J., C. Wua, H. P. Lee and Y. Liang. 2008. Solving traveling salesman problems using generalized chromosome genetic algorithm. **Progress in Natural Science**. 18: 887–892.

Yoshimoto, F., T. Haradab and Y. Yoshimoto. 2003. Data fitting with a spline using a real-coded genetic algorithm. **Computer-Aided Design**. 35: 751–760.

Zhang, B., H. F. Teng and Y. J. Shi. 2008. Layout optimization of satellite module using soft computing techniques. **Applied Soft Computing**. 8: 507–521.

Zhang, L., N. Zhang, F. Zhao and Y. Chen. 2004. A genetic-algorithm-based experimental technique for determining heat transfer coefficient of exterior wall surface. **Applied Thermal Engineering**. 24: 339–349.

Zhang, P., T. D. Bui and C. Y. Suen. 2007. A novel cascade ensemble classifier system with a high recognition performance on handwritten digits. **Pattern Recognition**. 40: 3415 – 3429.

Zhou, G., H. Min and M. Gen. 2003. A genetic algorithm approach to the bi-criteria allocation of customers to warehouses. **International Journal of Production Economics**. 86: 35–45.

Zhu, K., H. Guo, F. Diao and S. Xu. 2008. A better estimate to the contribution rate of education on economic growth in China from 1999 to 2003. **Expert Systems with Applications**. 34: 1371–1383.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดลองหาขนาดของประชากร (N) ที่เหมาะสม

VerticeSize		ขนาดของประชากร (N)					
		VerticeSize / 10	VerticeSize / 5	VerticeSize / 2	VerticeSize	2 x VerticeSize	3 VerticeSize
20	Cost Saving (%)	45.13 (9.41)	47.93 (6.11)	**62.78 (3.87)**	64.34 (1.58)	65.63 (4.17)	65.83 (2.96)
	Conv. Rate (%)	38.18 (14.78)	42.09 (7.56)	**42.24 (8.49)**	53.28 (1.66)	58.13 (6.33)	58.77 (5.24)
	Run Time (วินาที)	0.39 (0.05)	0.39 (0.05)	**0.77 (0.06)**	1.54 (0.11)	3.09 (0.55)	4.63 (0.15)
40	Cost Saving (%)	34.09 (5.79)	47.94 (1.68)	**57.91 (1.12)**	59.21 (2.07)	61.09 (2.51)	62.07 (1.06)
	Conv. Rate (%)	29.11 (4.56)	40.75 (3.77)	**45.44 (1.39)**	47.04 (4.00)	47.37 (2.25)	48.61 (4.50)
	Run Time (วินาที)	0.39 (0.08)	1.16 (0.08)	**3.09 (0.25)**	5.79 (0.12)	11.96 (0.59)	18.13 (0.55)
60	Cost Saving (%)	36.15 (6.28)	44.02 (2.78)	**54.62 (0.85)**	56.11 (4.88)	56.20 (1.65)	57.46 (2.28)
	Conv. Rate (%)	30.12 (5.25)	35.95 (4.16)	**41.12 (1.31)**	46.11 (7.57)	46.28 (2.48)	48.71 (4.31)
	Run Time (วินาที)	1.16 (0.32)	2.31 (0.17)	**6.56 (0.62)**	13.12 (0.54)	26.62 (0.04)	40.12 (0.49)
80	Cost Saving (%)	36.26 (3.95)	40.13 (0.84)	**48.42 (3.39)**	48.84 (2.66)	51.52 (1.52)	52.54 (2.53)
	Conv. Rate (%)	27.70 (6.66)	29.29 (1.00)	**39.41 (3.16)**	35.59 (3.48)	42.77 (2.86)	45.71 (4.39)
	Run Time (วินาที)	2.31 (0.10)	4.24 (0.62)	**11.19 (0.53)**	23.15 (0.23)	46.68 (0.55)	71.76 (0.19)
100	Cost Saving (%)	32.55 (3.39)	38.12 (5.07)	**42.43 (0.99)**	44.96 (1.34)	45.02 (2.26)	47.03 (1.95)
	Conv. Rate (%)	25.84 (2.14)	28.06 (4.42)	**32.44 (2.07)**	34.97 (2.81)	39.81 (1.55)	43.56 (2.34)
	Run Time (วินาที)	3.47 (0.06)	7.33 (0.35)	**19.29 (0.64)**	35.58 (0.77)	79.09 (0.54)	121.91 (0.48)

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

VerticeSize		ขนาดของประชากร (N)					
		VerticeSize / 20	VerticeSize / 10	VerticeSize / 5	VerticeSize / 4	VerticeSize / 2	VerticeSize
200	Cost Saving (%)	22.10 (3.04)	**29.13 (3.68)**	31.19 (3.27)	31.64 (1.63)	33.94 (1.85)	34.24 (1.09)
	Conv. Rate (%)	16.73 (1.56)	**16.64 (2.98)**	24.99 (2.77)	24.45 (1.64)	27.22 (2.34)	29.53 (0.61)
	Run Time (วินาที)	8.1 (0.09)	**15.05 (0.19)**	30.48 (1.09)	40.12 (0.55)	81.4 (0.55)	165.51 (1.90)
400	Cost Saving (%)	16.94 (1.70)	**19.57 (1.14)**	20.61 (1.02)	21.07 (1.36)	21.66 (2.12)	22.29 (1.25)
	Conv. Rate (%)	11.66 (1.04)	**11.18 (0.86)**	14.78 (0.78)	15.68 (2.39)	18.2 (2.55)	21.27 (1.63)
	Run Time (วินาที)	32.79 (0.94)	**64.04 (0.59)**	131.17 (0.47)	164.74 (1.55)	338.73 (1.81)	685.57 (1.44)
600	Cost Saving (%)	13.38 (0.2)	**17.39 (1.14)**	19.27 (1.56)	20.08 (2.04)	20.42 (3.11)	23.0 (0.37)
	Conv. Rate (%)	9.29 (0.42)	**12.40 (0.98)**	12.84 (1.09)	14.27 (1.76)	14.86 (2.88)	17.29 (0.7)
	Run Time (วินาที)	72.15 (1.45)	**158.18 (1.09)**	306.33 (1.60)	391.98 (2.64)	774.69 (3.32)	1611.88 (10.54)
800	Cost Saving (%)	12.6 (0.73)	**15.3 (0.92)**	16.11 (0.25)	17.23 (1.59)	17.99 (0.45)	17.97 (0.43)
	Conv. Rate (%)	8.23 (0.88)	**10.01 (0.94)**	10.7 (0.97)	12.7 (1.59)	13.13 (0.69)	14.7 (0.84)
	Run Time (วินาที)	129.24 (1.94)	**279.32 (1.75)**	572.15 (2.56)	712.58 (6.52)	1500.39 (12.3)	3026.23 (9.81)
1000	Cost Saving (%)	10.8 (1.8)	**13.75 (1.65)**	15.08 (1.18)	15.56 (0.91)	15.39 (0.84)	15.96 (0.92)
	Conv. Rate (%)	7.12 (1.82)	**9.57 (1.88)**	10.36 (0.82)	10.73 (1.08)	10.33 (0.31)	11.65 (1.39)
	Run Time (วินาที)	212.19 (1.82)	**441.36 (5.51)**	898.53 (5.20)	1142.36 (6.62)	2322.15 (10.10)	4797.07 (8.93)

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

VerticeSize		ขนาดของประชากร (N)				
		VerticeSize / 50	VerticeSize / 20	VerticeSize / 10	VerticeSize / 5	VerticeSize / 2
1500	Cost Saving (%)	7.3 (0.57)	**9.94 (0.69)**	10.96 (1.88)	11.16 (0.83)	11.51 (0.70)
	Conv. Rate (%)	5.04 (0.38)	**7.07 (0.58)**	6.61 (1.43)	7.09 (0.25)	8.7 (0.60)
	Run Time (วินาที)	181.71 (2.38)	**522.76 (2.90)**	1059.41 (5.77)	2188.66 (11.48)	5484.95 (15.67)
2000	Cost Saving (%)	6.71 (0.2)	**9.39 (0.77)**	9.89 (0.45)	10.09 (0.63)	11.02 (0.15)
	Conv. Rate (%)	5.12 (0.5)	**4.91 (0.82)**	5.85 (0.26)	6.34 (1.01)	8.26 (0.29)
	Run Time (วินาที)	324.85 (1.97)	**926.31 (3.93)**	1871.53 (1.59)	4000 (9.87)	9971.84 (15.96)
2500	Cost Saving (%)	6.13 (0.51)	**8.96 (0.29)**	9.14 (1.3)	9.2 (0.67)	9.37 (0.05)
	Conv. Rate (%)	4.4 (0.82)	**4.88 (0.14)**	6.07 (1.3)	5.92 (0.48)	5.95 (0.56)
	Run Time (วินาที)	545.14 (10.33)	**1553.63 (14.03)**	2985.34 (19.91)	6096.84 (11.19)	19366.51 (35.81)
3000	Cost Saving (%)	4.99 (0.25)	**7.38 (0.75)**	7.75 (0.82)	8.09 (0.75)	8.17 (0.43)
	Conv. Rate (%)	3.59 (0.20)	**4.77 (0.87)**	4.70 (0.73)	5.13 (0.81)	4.71 (0.56)
	Run Time (วินาที)	854.17 (5.02)	**2141.59 (3.37)**	4381.94 (9.94)	8878.86 (36.91)	28826 (58.09)

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดลองหาจำนวนรุ่นการวิวัฒนาการ (G) ที่เหมาะสม

VerticeSize		จำนวนรุ่นการวิวัฒนาการ					
		100	200	300	400	500	600
20	Cost Saving (%)	39.4 (2.48)	**55.71 (3.71)**	54.2 (2.42)	55.74 (8.86)	54.81 (3.99)	54.59 (2.88)
	Conv. Rate (%)	24.58 (6.54)	**38.95 (9.62)**	44.63 (2.19)	37.12 (9.8)	34.22 (7.89)	48.49 (10.71)
	Run Time (วินาที)	0.39 (0.12)	**0.39 (0.06)**	0.40 (0.05)	0.41 (0.09)	0.77 (0.20)	1.16 (0.09)
40	Cost Saving (%)	38.43 (2.21)	**46.98 (2.1)**	48.74 (2.05)	48.54 (2.58)	49.17 (2.88)	48.93 (1.14)
	Conv. Rate (%)	25.73 (2.15)	**37.77 (2.36)**	36.36 (3.75)	38.49 (4.31)	44.99 (4.99)	38.55 (1.84)
	Run Time (วินาที)	0.77 (0.05)	**1.54 (0.13)**	1.93 (0.25)	2.70 (0.55)	3.47 (0.12)	3.86 (0.50)
60	Cost Saving (%)	34.69 (1.19)	**43.47 (2.68)**	43.09 (0.7)	43.86 (1.02)	43.84 (2.82)	43.59 (2.21)
	Conv. Rate (%)	23.03 (2.51)	**32.66 (5.38)**	33.01 (1.18)	35.79 (0.42)	35.65 (4.07)	38.19 (1.07)
	Run Time (วินาที)	1.16 (0.10)	**3.09 (0.45)**	4.24 (0.51)	5.79 (0.08)	7.33 (0.33)	8.49 (0.55)
80	Cost Saving (%)	32.2 (2.1)	35.89 (1.31)	**42.76 (2.96)**	42.08 (1.15)	43.55 (0.97)	43.04 (2.52)
	Conv. Rate (%)	20.1 (2.86)	24.02 (1.09)	**33.98 (4.11)**	32.57 (2.48)	33.68 (4.2)	39.57 (3.87)
	Run Time (วินาที)	2.70 (0.66)	5.02 (1.05)	**7.72 (1.00)**	8.42 (0.72)	13.12 (0.76)	15.82 (0.35)
100	Cost Saving (%)	31.16 (3.93)	30.42 (0.76)	**40.77 (1.06)**	41.29 (1.36)	41.48 (1.67)	41.87 (1.54)
	Conv. Rate (%)	19.56 (1.67)	21.09 (2.04)	**31.53 (0.58)**	30.14 (3.13)	35.38 (0.61)	37.13 (2.8)
	Run Time (วินาที)	3.86 (0.42)	7.72 (0.84)	**12.35 (0.73)**	16.2 (1.25)	20.06 (0.55)	24.31 (0.81)

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

VerticeSize		จำนวนรุ่นการวิวัฒนาการ					
		100	200	300	400	500	600
200	Cost Saving (%)	15.88 (0.19)	18.55 (3.13)	**24.37 (1.31)**	22.83 (1.4)	27.94 (1.06)	25.1 (2.56)
	Conv. Rate (%)	8.37 (2.59)	11.98 (3.31)	**18.89 (2.16)**	16.21 (0.62)	21.4 (0.62)	18.24 (2.23)
	Run Time (วินาที)	3.09 (0.78)	6.17 (1.76)	**9.26 (0.90)**	13.12 (0.86)	16.2 (1.01)	18.9 (0.50)
400	Cost Saving (%)	13.34 (0.41)	14.69 (2.13)	**19.21 (1.45)**	19.76 (0.60)	20.07 (1.07)	19.16 (0.95)
	Conv. Rate (%)	7 (2.17)	8.56 (2.32)	**11.49 (0.27)**	11.99 (0.25)	13.51 (1.28)	13.84 (0.27)
	Run Time (วินาที)	13.12 (0.74)	25.46 (0.58)	**38.58 (0.65)**	51.31 (0.50)	63.66 (1.02)	76.77 (0.59)
600	Cost Saving (%)	11.33 (0.73)	11.63 (1.65)	**15.63 (1.95)**	16.07 (2.09)	16.28 (0.7)	17.62 (0.22)
	Conv. Rate (%)	6.39 (1.39)	8.77 (1.07)	**8.5 (1.48)**	10.59 (3.13)	11.14 (0.66)	13.04 (0.64)
	Run Time (วินาที)	31.25 (0.59)	62.5 (0.93)	**94.52 (0.88)**	124.61 (0.82)	154.32 (0.59)	185.57 (0.35)
800	Cost Saving (%)	10.07 (0.93)	10.55 (1.01)	**12.05 (1.64)**	12.64 (0.6)	12.09 (1.14)	12.13 (0.87)
	Conv. Rate (%)	4.66 (0.83)	5.18 (0.53)	**6.63 (1.74)**	7.31 (0.99)	9.44 (0.87)	10.35 (1.07)
	Run Time (วินาที)	56.71 (1.20)	113.04 (0.95)	**168.98 (0.80)**	226.47 (0.51)	282.02 (1.09)	344.91 (0.78)
1000	Cost Saving (%)	10.23 (0.66)	11.79 (0.75)	**12.14 (1.04)**	12.28 (0.91)	12.40 (0.37)	12.56 (0.42)
	Conv. Rate (%)	6.08 (0.67)	6.62 (0.72)	**6.22 (0.36)**	7.79 (0.64)	9.53 (0.58)	8.05 (0.39)
	Run Time (วินาที)	89.51 (0.50)	179.01 (0.55)	**268.13 (1.10)**	356.10 (0.75)	444.44 (0.94)	537.42 (0.55)

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

VerticeSize		จำนวนรุ่นการวิวัฒนาการ					
		100	200	300	400	500	600
1500	Cost Saving (%)	7.07 (0.37)	7.24 (0.53)	8.19 (0.65)	**9.37 (0.84)**	9.63 (0.81)	9.11 (0.27)
	Conv. Rate (%)	4.07 (0.71)	5.33 (0.48)	5.70 (0.78)	**5.91 (0.82)**	7.31 (0.87)	6.27 (0.44)
	Run Time (วินาที)	106.87 (0.95)	209.49 (1.40)	314.05 (1.02)	**420.91 (0.57)**	538.58 (1.55)	630.4 (1.44)
2000	Cost Saving (%)	6.72 (0.33)	7.36 (0.83)	8.34 (1.05)	**8.97 (0.10)**	8.96 (0.67)	9.27 (1.24)
	Conv. Rate (%)	3.67 (0.64)	5.04 (0.35)	4.14 (0.34)	**4.86 (0.20)**	6.36 (0.34)	5.81 (1.16)
	Run Time (วินาที)	188.02 (0.89)	374.23 (1.90)	557.48 (1.72)	**756.17 (3.04)**	937.11 (6.08)	1115.74 (7.14)
2500	Cost Saving (%)	6.36 (0.35)	6.43 (0.67)	6.81 (0.58)	**7.36 (0.43)**	7.40 (0.25)	7.50 (0.77)
	Conv. Rate (%)	3.8 (0.19)	3.56 (0.36)	3.9 (0.56)	**4.03 (0.56)**	5.18 (0.78)	4.98 (0.45)
	Run Time (วินาที)	301.7 (2.50)	615.35 (14.28)	900.85 (3.04)	**1198.69 (4.63)**	1500.39 (6.65)	1988.45 (12.11)
3000	Cost Saving (%)	5.10 (0.53)	5.77 (0.68)	6.13 (0.23)	**6.85 (0.44)**	6.91 (1.04)	6.98 (0.35)
	Conv. Rate (%)	2.31 (0.79)	4.13 (0.65)	4.5 (0.65)	**3.86 (0.88)**	2.75 (0.74)	4.73 (0.30)
	Run Time (วินาที)	436.34 (0.88)	875 (5.00)	1315.2 (6.71)	**1748.07 (9.46)**	2184.03 (7.13)	2599.92 (4.26)

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสม สำหรับ VerticeSize = 60, PopulationSize = 30, Generation = 300

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.01	Cost Saving (%)	24.28 (1.48)	30.99 (4.98)	36.45 (2.44)	41.27 (3.45)	42.16 (5.39)	44.69 (3.96)
	Conv. Rate (%)	7.52 (3.42)	17.06 (6.39)	21.98 (1.66)	29.48 (3.03)	28.93 (1.96)	33.54 (5.13)
	Run Time (วินาที)	3.78 (0.11)	4.31 (0.21)	4.06 (0.88)	4.76 (0.33)	4.02 (0.34)	3.66 (0.52)
0.05	Cost Saving (%)	24.00 (2.03)	33.01 (4.14)	36.90 (5.00)	39.48 (4.08)	43.58 (0.52)	45.72 (2.14)
	Conv. Rate (%)	14.64 (3.22)	20.17 (2.80)	25.76 (3.54)	29.11 (1.93)	33.87 (1.22)	34.90 (1.95)
	Run Time (วินาที)	4.20 (0.44)	3.77 (0.41)	3.69 (0.51)	4.28 (0.15)	4.71 (0.32)	3.70 (0.11)
0.10	Cost Saving (%)	25.32 (4.68)	33.61 (5.14)	41.60 (0.62)	45.95 (3.01)	44.80 (1.99)	42.91 (0.41)
	Conv. Rate (%)	12.50 (2.85)	15.20 (0.77)	24.34 (1.09)	27.52 (5.84)	31.01 (1.53)	34.29 (1.07)
	Run Time (วินาที)	3.75 (0.30)	4.47 (0.06)	4.33 (0.35)	4.29 (0.64)	3.58 (0.77)	4.09 (0.54)
0.20	Cost Saving (%)	26.12 (2.38)	33.12 (4.38)	42.30 (1.09)	46.55 (3.14)	**50.44 (1.09)**	**51.57 (2.75)**
	Conv. Rate (%)	14.21 (4.65)	19.97 (3.89)	30.85 (1.68)	36.45 (1.93)	**40.72 (3.27)**	**37.92 (3.09)**
	Run Time (วินาที)	4.65 (0.25)	3.47 (0.34)	4.18 (0.45)	3.87 (0.19)	**4.09 (0.65)**	**4.03 (0.37)**
0.30	Cost Saving (%)	32.11 (1.48)	37.47 (3.42)	35.99 (1.48)	43.52 (1.11)	**50.23 (1.56)**	**50.17 (2.45)**
	Conv. Rate (%)	18.14 (2.2)	25.16 (3.21)	24.26 (3.97)	33.34 (1.13)	**35.11 (3.09)**	**39.42 (2.23)**
	Run Time (วินาที)	3.27 (0.55)	4.60 (0.55)	4.73 (0.55)	4.11 (0.55)	**4.19 (0.93)**	**4.70 (0.88)**
0.40	Cost Saving (%)	35.88 (2.54)	38.06 (1.30)	40.02 (2.65)	41.51 (4.09)	**51.86 (5.47)**	**49.12 (2.13)**
	Conv. Rate (%)	23.41 (2.21)	27.37 (1.28)	24.93 (3.82)	31.02 (4. 5)	**30.57 (5.33)**	**36.66 (2.82)**
	Run Time (วินาที)	3.88 (0.28)	3.30 (0.36)	3.53 (0.93)	4.28 (1.01)	**4.37 (0.63)**	**4.71 (0.82)**

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	Cost Saving (%)	44.78 (1.7)	44.65 (3.67)	43.09 (3.88)	40.78 (3.67)	38.67 (1.02)	30.5 (2.55)
	Conv. Rate (%)	38.26 (2.17)	37.48 (4.02)	37.19 (2.96)	35.90 (2.96)	33.99 (1.27)	30.85 (1.28)
	Run Time (วินาที)	4.28 (0.35)	4.83 (0.18)	4.07 (0.47)	4.11 (1.75)	3.30 (0.53)	3.83 (0.75)
0.05	Cost Saving (%)	44.61 (2.1)	44.20 (2.93)	42.65 (1.63)	42.85 (5.08)	39.25 (2.79)	35.10 (0.85)
	Conv. Rate (%)	31.64 (3.82)	39.35 (3.07)	35.95 (2.38)	34.46 (5.24)	34.63 (4.17)	30.45 (3.68)
	Run Time (วินาที)	4.33 (0.58)	4.09 (0.10)	3.77 (1.25)	3.59 (0.58)	4.19 (0.83)	4.64 (0.25)
0.10	Cost Saving (%)	43.39 (4.19)	46.22 (4.14)	46 (1.81)	44.31 (1.69)	41.22 (2.49)	40.09 (2.0)
	Conv. Rate (%)	31.38 (6.4)	37.02 (2.62)	36.91 (1.35)	38.89 (2.35)	35.85 (3.46)	34.66 (2.78)
	Run Time (วินาที)	4.91 (0.48)	4.24 (0.47)	3.77 (0.53)	3.94 (0.29)	4.17 (0.45)	3.95 (0.33)
0.20	Cost Saving (%)	**50.9 (2.94)**	**52.52 (1.48)**	**52.59 (1.21)**	49.12 (0.36)	49.2 (1.86)	49.15 (1.91)
	Conv. Rate (%)	**36.04 (3.53)**	**39.9 (1.01)**	**38.63 (1.48)**	38.2 (2.89)	35.81 (2.20)	32.09 (0.47)
	Run Time (วินาที)	**4.09 (0.30)**	**4.19 (0.62)**	**4.70 (0.97)**	4.11 (0.36)	3.89 (0.58)	4.65(0.99)
0.30	Cost Saving (%)	**51.41 (1.61)**	**51.7 (2.61)**	**50.43 (1.23)**	49.93 (1.72)	47.14 (2.15)	45.10 (3.71)
	Conv. Rate (%)	**37.41 (3.13)**	**37.36 (2.31)**	**39.36 (1.38)**	36.90 (2.94)	35.48 (3.66)	33.89 (4.69)
	Run Time (วินาที)	**4.72 (0.53)**	**3.97 (0.55)**	**3.69 (0.29)**	3.09 (0.22)	3.70 (0.55)	4.73 (0.59)
0.40	Cost Saving (%)	**50.33 (0.77)**	**51.30 (2.93)**	**50.81 (2.41)**	51.61 (3.08)	44.73 (4.74)	41.81 (4.99)
	Conv. Rate (%)	**39.79 (1.91)**	**39.46 (5.42)**	**39.68 (2.26)**	36.06 (5.27)	33.3 (7.5)	31.24 (5.33)
	Run Time (วินาที)	**4.66 (0.45)**	**3.72 (0.50)**	**4.89 (0.83)**	4.09 (0.82)	4.31 (0.22)	4.10 (0.47)

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.50	Cost Saving (%)	34.8 (3.06)	42.06 (0.47)	43.69 (4.03)	47.69 (3.74)	**50.54 (1.4)**	**50.23 (3.55)**
	Conv. Rate (%)	25.82 (2.99)	29.55 (2.31)	32.47 (1.78)	34.76 (5.66)	**36.1 (1.97)**	**38.33 (3.91)**
	Run Time (วินาที)	4.01 (0.36)	4.21 (0.71)	4.20 (0.55)	3.98 (0.22)	**4.71 (0.55)**	**4.29 (0.35)**
0.60	Cost Saving (%)	33.77 (3.88)	39.5 (2.13)	40.95 (2.27)	44.0 (2.59)	**49.83 (0.87)**	**48.97 (1.08)**
	Conv. Rate (%)	22.86 (5.74)	28.36 (1.73)	31.38 (2.72)	31.73 (3.21)	**40.98 (2.33)**	**39.01 (3.18)**
	Run Time (วินาที)	3.85 (0.23)	3.98 (0.84)	4.01 (0.72)	4.71 (0.23)	**3.69 (0.77)**	**4.17 (0.37)**
0.70	Cost Saving (%)	32.33 (1.62)	40.31 (0.73)	42.93 (5.04)	42.16 (2.13)	43.68 (1.77)	43.32 (4.36)
	Conv. Rate (%)	23.59 (2.41)	28.84 (3.63)	32.14 (7.38)	32.49 (0.8)	39.36 (2.33)	39.73 (4.76)
	Run Time (วินาที)	4.13 (0.36)	4.23 (0.75)	3.77 (0.28)	4.07 (0.29)	4.91 (0.18)	4.86 (0.55)
0.80	Cost Saving (%)	32.16 (4.57)	39.24 (4.26)	40.02 (1.38)	41.05 (2.65)	43.00 (1.01)	45.53 (1.31)
	Conv. Rate (%)	25.71 (5.47)	27.95 (4.82)	34.23 (2.26)	35.35 (1.35)	41.69 (0.56)	41.93 (2.4)
	Run Time (วินาที)	3.47 (0.0)	4.19 (0.82)	4.36 (0.51)	3.53 (0.20)	4.36 (0.62)	4.15 (1.10)
0.90	Cost Saving (%)	31.84 (2.29)	35.15 (3.4)	37.24 (2.03)	36.04 (2.46)	43.09 (2.7)	43.45 (4.07)
	Conv. Rate (%)	24.69 (0.84)	32.54 (3.88)	36.02 (4.47)	37.36 (5.04)	39.37 (4.33)	39.64 (5.72)
	Run Time (วินาที)	4.19 (0.35)	4.16 (0.32)	4.31 (0.17)	4.56 (0.62)	4.12 (0.54)	3.62 (0.04)
1.00	Cost Saving (%)	29.57 (0.4)	32.01 (3.1)	35.55 (2.37)	37.44 (6.34)	40.6 (2.9)	41.86 (2.71)
	Conv. Rate (%)	26.32 (1.51)	26.95 (2.46)	31.28 (3.08)	36.73 (5.43)	43.16 (2.99)	40.35 (2.3)
	Run Time (วินาที)	3.74 (0.35)	4.17 (0.41)	3.74 (0.52)	4.62 (0.65)	4.21 (0.32)	4.10 (0.74)

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.50	Cost Saving (%)	**49.47 (1.75)**	**50.03 (2.6)**	**50.33 (0.88)**	49.04 (3.67)	42.23 (1.86)	43.78 (2.41)
	Conv. Rate (%)	**43.0 (1.88)**	**38.13 (3.8)**	**40.42 (0.69)**	45.29 (5.89)	38.78 (6.68)	35.07 (2.37)
	Run Time (วินาที)	**4.91 (0.49)**	**4.27 (0.91)**	**4.11 (0.30)**	4.99 (0.34)	3.79 (1.20)	4.10 (0.34)
0.60	Cost Saving (%)	**48.38 (2.08)**	**48.81 (1.26)**	**48.76 (4.15)**	45.49 (2.27)	42.46 (1.22)	38.34 (1.63)
	Conv. Rate (%)	**41.73 (0.57)**	**37.01 (6.18)**	**43.99 (4.19)**	40.19 (3.44)	35.79 (2.33)	35.02 (2.23)
	Run Time (วินาที)	**4.20 (0.14)**	**4.04 (0.55)**	**4.85 (1.16)**	3.87 (0.62)	4.10 (0.85)	4.09 (0.66)
0.70	Cost Saving (%)	44.84 (2.88)	44.05 (2.93)	43.01 (3.08)	41.7 (1.71)	39.83 (0.95)	35.62 (2.94)
	Conv. Rate (%)	39.03 (0.47)	38.27 (0.43)	40.36 (2.69)	38.74 (4.08)	38.53 (1.38)	35.34 (4.22)
	Run Time (วินาที)	4.06 (1.07)	4.29 (0.24)	4.37 (0.26)	3.58 (0.83)	3.47 (0.08)	4.22 (0.77)
0.80	Cost Saving (%)	46.78 (7.82)	47.58 (1.13)	43.18 (0.16)	41.47 (1.96)	34.34 (3.14)	30.27 (3.47)
	Conv. Rate (%)	38.41 (8.36)	42.47 (1.53)	43.81 (3.16)	41.8 (4.21)	39.87 (5.53)	34.17 (4.77)
	Run Time (วินาที)	4.07 (0.93)	4.17 (1.02)	3.59 (0.37)	3.94 (0.94)	3.86 (0.91)	4.26 (1.09)
0.90	Cost Saving (%)	44.64 (1.46)	45.48 (1.58)	42.61 (2.48)	39.59 (2.1)	33.81 (2.46)	30.02 (0.1)
	Conv. Rate (%)	43.58 (1.73)	38.93 (1.93)	32.95 (3.62)	30.51 (2.28)	26.54 (2.26)	25.4 (2.44)
	Run Time (วินาที)	4.12 (0.49)	4.24 (0.62)	4.19 (0.53)	4.15 (0.23)	4.68 (0.55)	4.76 (0.19)
1.00	Cost Saving (%)	42.82 (2.28)	42.34 (3.34)	40.60 (2.9)	34.56 (0.94)	31.66 (2.74)	28.79 (3.5)
	Conv. Rate (%)	43.12 (1.65)	39.88 (4.17)	35.31 (5.34)	35.00 (1.31)	26.72 (3.98)	20.23 (6.85)
	Run Time (วินาที)	3.74 (0.25)	4.14 (0.55)	4.45 (1.66)	3.29 (0.22)	4.13 (0.15)	4.45 (1.36)

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสม สำหรับ VerticeSize = 100, PopulationSize = 50, Generation = 300

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.01	Cost Saving (%)	20.25 (1.68)	23.82 (0.87)	29.35 (1.92)	31.11 (1.66)	33.19 (1.08)	36.64 (1.83)
	Conv. Rate (%)	8.28 (1.97)	14.65 (1.55)	17.84 (0.96)	24.17 (2.37)	24.96 (1.46)	26.65 (5.2)
	Run Time (วินาที)	20.61 (0.73)	21.30 (0.92)	19.11 (0.25)	19.23 (1.59)	19.99 (0.45)	20.97 (0.43)
0.05	Cost Saving (%)	21.17 (1.73)	24.96 (1.43)	31.51 (3.03)	33.6 (2.31)	34.65 (0.59)	36.65 (4.48)
	Conv. Rate (%)	8.44 (1.85)	11.93 (2.76)	21.65 (2.08)	22.22 (2.94)	27.71 (2.08)	26.93 (6.68)
	Run Time (วินาที)	19.29 (0.42)	21.40 (0.98)	20.84 (1.09)	20.27 (0.73)	20.86 (0.78)	21.29 (0.70)
0.10	Cost Saving (%)	24.25 (0.82)	25.94 (2.21)	31.38 (4.68)	35.88 (3.82)	36.04 (0.77)	37.05 (2.38)
	Conv. Rate (%)	13.85 (0.99)	14.33 (1.01)	18.25 (4.32)	26.08 (4.93)	26.94 (2.14)	28.64 (2.86)
	Run Time (วินาที)	20.70 (0.66)	20.29 (1.05)	21.41 (1.16)	19.59 (0.45)	19.77 (0.86)	20.71 (0.39)
0.20	Cost Saving (%)	25.96 (1.61)	30.0 (3.22)	33.84 (3.72)	36.04 (1.39)	35.99 (1.73)	37.09 (1.45)
	Conv. Rate (%)	15.2 (2.96)	18.7 (0.35)	21.36 (5.02)	25.66 (3.73)	24.73 (2.67)	27.18 (1.64)
	Run Time (วินาที)	20.13 (0.41)	20.93 (0.11)	21.78 (0.47)	19.34 (0.58)	20.63 (1.07)	21.83 (0.96)
0.30	Cost Saving (%)	28.01 (4.33)	31.56 (1.74)	33.63 (2.99)	36.43 (3.42)	42.84 (1.91)	**48.85 (0.21)**
	Conv. Rate (%)	14.22 (3.63)	19.96 (3.9)	22.99 (3.7)	24.4 (5.53)	32.83 (1.08)	**32.07 (1.28)**
	Run Time (วินาที)	19.31 (0.10)	19.24 (0.62)	20.19 (0.53)	20.15 (0.23)	19.68 (0.55)	**21.76 (0.19)**
0.40	Cost Saving (%)	27.51 (1.45)	32.27 (0.48)	33.58 (2.53)	38.72 (0.83)	39.48 (4.37)	**48.04 (2.96)**
	Conv. Rate (%)	15.65 (0.83)	20.87 (2.42)	23.51 (2.92)	27.67 (1.89)	31.58 (4.87)	**30.35 (2.0)**
	Run Time (วินาที)	20.66 (1.04)	21.18 (0.86)	21.78 (0.78)	20.68 (1.39)	21.20 (0.55)	**21.27 (1.63)**

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	Cost Saving (%)	35.1 (0.78)	35.63 (2.52)	34.32 (0.88)	31.7 (2.36)	28.39 (1.07)	27.09 (1.96)
	Conv. Rate (%)	30.74 (1.56)	31.6 (1.52)	30.88 (0.96)	23.24 (3.41)	20.16 (1.5)	13.46 (2.82)
	Run Time (วินาที)	21.73 (1.56)	20.64 (0.98)	21.99 (0.77)	20.45 (1.64)	19.22 (0.24)	20.53 (0.61)
0.05	Cost Saving (%)	36.59 (2.0)	37.44 (1.69)	35.85 (2.46)	32.93 (0.4)	31.75 (2.85)	28.75 (3.51)
	Conv. Rate (%)	29.05 (2.47)	32.87 (1.66)	30.95 (2.91)	24.3 (1.96)	25.53 (3.92)	14.93 (4.69)
	Run Time (วินาที)	19.23 (0.88)	20.01 (0.94)	20.70 (0.97)	21.47 (1.19)	20.13 (0.69)	21.7 (1.04)
0.10	Cost Saving (%)	40.1 (0.7)	40.12 (2.38)	40.76 (0.37)	36.7 (2.13)	36.7 (0.58)	33.61 (2.3)
	Conv. Rate (%)	32.54 (1.11)	27.72 (4.47)	34.25 (1.36)	30.16 (1.22)	28.5 (2.26)	20.4 (3.87)
	Run Time (วินาที)	19.22 (0.56)	20.75 (0.77)	21.44 (1.09)	20.04 (1.10)	21.97 (0.25)	21.61 (0.52)
0.20	Cost Saving (%)	42.91 (1.31)	42.29 (0.84)	42.29 (2.18)	43.24 (1.04)	40.69 (2.06)	35.22 (3.24)
	Conv. Rate (%)	32.15 (1.97)	34.74 (1.01)	32.77 (0.9)	34.04 (2.85)	26.1 (1.81)	28.59 (5.32)
	Run Time (วินาที)	20.55 (0.39)	20.12 (1.07)	21.43 (0.99)	21.96 (1.34)	20.02 (1.26)	21.03 (0.95)
0.30	Cost Saving (%)	**48.34 (2.08)**	**48.54 (1.15)**	**47.45 (3.93)**	43.87 (3.11)	41.34 (1.98)	35.71 (1.25)
	Conv. Rate (%)	**29.75 (4.95)**	**34.86 (1.4)**	**35.66 (3.55)**	32.62 (2.56)	31.83 (2.33)	28.25 (2.43)
	Run Time (วินาที)	**19.11 (0.08)**	**20.62 (0.95)**	**20.06 (0.10)**	21.77 (0.73)	21.1 (1.04)	21.72 (1.25)
0.40	Cost Saving (%)	**47.19 (2.48)**	**47.15 (2.03)**	**48.86 (1.83)**	44.06 (2.43)	42.74 (2.04)	36.67 (1.51)
	Conv. Rate (%)	**33.08 (4.56)**	**33.06 (2.57)**	**32.91 (3.3)**	32.41 (2.65)	30.27 (0.79)	30.20 (1.52)
	Run Time (วินาที)	**20.48 (1.09)**	**20.12 (0.55)**	**21.4 (0.65)**	20.51 (1.90)	20.49 (0.55)	21.19 (0.20)

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.50	Cost Saving (%)	29.98 (1.86)	34.03 (2.64)	34.81 (1.27)	38.28 (2.33)	40.4 (1.43)	**47.99 (1.28)**
	Conv. Rate (%)	15.35 (2.27)	23.96 (3.97)	25.73 (1.06)	28.99 (2.82)	31.05 (3.32)	**29.68 (3.52)**
	Run Time (วินาที)	211.71 (1.38)	22.76 (0.90)	20.41 (1.77)	21.66 (1.48)	19.95 (0.67)	**21.04 (0.38)**
0.60	Cost Saving (%)	31.65 (2.01)	39.87 (2.55)	37.5 (1.89)	40.5 (1.49)	40.15 (2.95)	42.03 (1.78)
	Conv. Rate (%)	19.53 (3.16)	24.09 (3.66)	24.25 (3.71)	30.87 (1.94)	29.98 (3.97)	32.71 (3.64)
	Run Time (วินาที)	20.08 (0.86)	20.75 (0.65)	21.84 (1.18)	19.56 (0.91)	19.39 (0.84)	20.96 (0.92)
0.70	Cost Saving (%)	34.01 (2.78)	43.13 (0.58)	43.46 (0.57)	42.85 (0.34)	44.88 (2.08)	39.67 (4.28)
	Conv. Rate (%)	21.32 (4.05)	28.61 (1.32)	28.68 (2.95)	29.9 (1.34)	28.0 (1.75)	31.04 (3.39)
	Run Time (วินาที)	19.59 (0.20)	19.77 (0.87)	20.70 (0.73)	19.13 (0.81)	21.71 (0.56)	21.71 (0.20)
0.80	Cost Saving (%)	33.96 (3.23)	43.73 (2.26)	41.0 (4.45)	41.35 (1.28)	40.4 (3.14)	39.27 (3.51)
	Conv. Rate (%)	19.48 (4.37)	24.67 (2.86)	25.71 (3.02)	32.96 (0.9)	30.19 (5.04)	33.73 (4.31)
	Run Time (วินาที)	20.87 (0.55)	21.71 (0.38)	20.76 (0.90)	21.41 (1.77)	21.66 (1.48)	20.95 (1.67)
0.90	Cost Saving (%)	30.15 (2.75)	39.38 (1.32)	39.37 (2.87)	38.21 (3.11)	38.49 (1.87)	35.4 (5.81)
	Conv. Rate (%)	14.93 (3.22)	30.69 (2.08)	27.75 (4.8)	31.51 (3.39)	27.12 (3.68)	33.61 (7.83)
	Run Time (วินาที)	20.72 (0.75)	19.12 (0.42)	20.49 (1.15)	21.72 (0.73)	20.49 (0.83)	21.41 (0.40)
1.00	Cost Saving (%)	32.15 (2.17)	38.29 (2.56)	36.78 (2.28)	46.57 (0.77)	47.08 (1.43)	34.18 (1.27)
	Conv. Rate (%)	14.07 (1.31)	25.68 (2.21)	26.89 (2.78)	30.93 (1.87)	30.14 (2.06)	31.97 (1.36)
	Run Time (วินาที)	19.12 (0.84)	20.57 (0.88)	20.46 (0.52)	20.73 (1.04)	20.34 (0.31)	21.65 (1.49)

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.50	Cost Saving (%)	**48.89 (2.18)**	**47.32 (2.49)**	**47.82 (3.31)**	43.32 (1.86)	41.83 (1.35)	35.8 (1.55)
	Conv. Rate (%)	**31.72 (2.84)**	**38.18 (2.47)**	**34.66 (3.52)**	32.16 (2.65)	32.64 (1.06)	31.20 (3.05)
	Run Time (วินาที)	**20.07 (0.58)**	**21.61 (1.43)**	**19.09 (0.25)**	20.70 (0.60)	20.49 (0.55)	21.10 (0.60)
0.60	Cost Saving (%)	43.57 (2.38)	44.35 (5.54)	42.9 (2.37)	40.51 (3.52)	37.22 (1.19)	32.08 (0.96)
	Conv. Rate (%)	34.06 (2.4)	35.56 (5.79)	35.38 (3.21)	34.74 (5.01)	32.02 (0.84)	30.82 (2.15)
	Run Time (วินาที)	20.94 (0.70)	19.57 (1.14)	20.61 (1.02)	21.07 (1.36)	21.66 (1.12)	21.29 (1.25)
0.70	Cost Saving (%)	35.33 (3.63)	35.35 (2.31)	34.47 (2.63)	33.67 (1.11)	33.20 (1.94)	30.19 (1.32)
	Conv. Rate (%)	34.76 (4.19)	34.09 (0.96)	35.75 (2.11)	33.98 (1.22)	31.19 (1.89)	28.13 (2.45)
	Run Time (วินาที)	20.39 (0.77)	19.39 (0.45)	20.09 (0.33)	21.02 (0.15)	19.49 (0.55)	21.15 (0.46)
0.80	Cost Saving (%)	38.83 (3.0)	36.3 (3.27)	36.69 (1.48)	33.85 (2.48)	31.19 (3.11)	27.62 (1.34)
	Conv. Rate (%)	34.29 (5.63)	33.89 (4.44)	31.06 (1.75)	30.04 (2.72)	29.52 (2.75)	26.93 (2.2)
	Run Time (วินาที)	20.43 (0.82)	20.88 (0.64)	21.37 (1.43)	20.92 (0.48)	20.95 (0.66)	20.57 (0.75)
0.90	Cost Saving (%)	32.5 (0.4)	32.57 (1.73)	31.14 (2.14)	28.03 (3.6)	27.54 (2.17)	25.48 (1.8)
	Conv. Rate (%)	35.97 (1.13)	35.95 (1.45)	33.13 (2.29)	32.97 (4.39)	29.55 (3.84)	26.35 (1.72)
	Run Time (วินาที)	20.12 (0.85)	21.57 (0.48)	20.36 (0.82)	20.73 (1.08)	20.63 (0.91)	21.65 (0.39)
1.00	Cost Saving (%)	32.21 (4.27)	30.03 (3.62)	29.36 (0.96)	26.42 (3.74)	25.05 (2.42)	23.95 (1.73)
	Conv. Rate (%)	30.2 (4.6)	29.11 (3.39)	28.93 (1.29)	28.41 (2.87)	25.53 (0.86)	24.60 (3.27)
	Run Time (วินาที)	20.71 (0.24)	19.45 (0.37)	21.89 (1.45)	21.09 (0.63)	21.42 (0.75)	21.49 (0.95)

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 600, PopulationSize = 60, Generation = 300

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.01	Cost Saving (%)	7.58 (0.64)	9.35 (1.60)	10.52 (1.71)	12.68 (1.09)	13.85 (0.27)	15.56 (1.13)
	Conv. Rate (%)	2.26 (0.73)	2.77 (0.30)	4.36 (0.77)	7.51 (1.43)	9.23 (0.46)	10.12 (0.56)
	Run Time (วินาที)	93.11 (0.74)	93.5 (0.45)	93.27 (1.09)	92.73 (0.66)	92.74 (0.98)	92.11 (1.01)
0.05	Cost Saving (%)	8.06 (0.43)	8.22 (0.22)	12.20 (1.42)	13.91 (1.44)	15.73 (1.48)	14.44 (0.86)
	Conv. Rate (%)	2.47 (0.43)	3.48 (0.36)	5.03 (0.23)	5.56 (1.42)	10.52 (1.50)	9.75 (0.96)
	Run Time (วินาที)	92.73 (0.56)	93.19 (0.98)	92.73 (0.75)	93.71 (0.61)	95.45 (0.74)	92.73 (0.55)
0.10	Cost Saving (%)	8.58 (0.61)	9.67 (0.58)	11.01(0.76)	11.81 (0.87)	14.08 (3.11)	16.11 (0.73)
	Conv. Rate (%)	3.44 (0.59)	3.07 (0.47)	5.59 (1.22)	5.96 (1.26)	8.90 (3.15)	9.53 (0.29)
	Run Time (วินาที)	92.50 (0.09)	93.77 (0.32)	93.89 (0.55)	92.50 (0.60)	93.34 (0.77)	92.73 (0.81)
0.20	Cost Saving (%)	9.73 (1.52)	9.89 (1.94)	12.47 (0.68)	11.79 (0.83)	13.39 (1.00)	15.6 (0.29)
	Conv. Rate (%)	3.85 (1.52)	4.75 (1.34)	6.00 (0.35)	6.5 (1.12)	9.32 (1.18)	9.90 (0.09)
	Run Time (วินาที)	93.89 (0.77)	93.50 (0.74)	94.81 (1.27)	93.5 (0.30)	94.10 (0.45)	92.54 (0.42)
0.30	Cost Saving (%)	11.67 (0.28)	11.58 (0.47)	11.94 (1.03)	11.13 (0.43)	14.62 (1.63)	15.01 (0.62)
	Conv. Rate (%)	4.76 (0.53)	6.46 (0.19)	5.76 (1.09)	5.51 (0.41)	8.61 (0.9)	10.15 (0.52)
	Run Time (วินาที)	91.59 (0.49)	93.11 (0.75)	94.27 (0.55)	92.34 (0.35)	93.11 (0.55)	92.34 (0.93)
0.40	Cost Saving (%)	12.57 (0.29)	13.77 (0.83)	13.19 (1.32)	13.64 (0.24)	14.40 (0.54)	17.11 (0.96)
	Conv. Rate (%)	7.07 (0.26)	6.44 (0.99)	7.71 (1.43)	7.6 (0.64)	9.11 (0.91)	11.68 (0.19)
	Run Time (วินาที)	93.11 (0.35)	93.11 (0.61)	92.73 (0.49)	92.34 (0.70)	92.34 (0.44)	92.73 (0.51)

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	Cost Saving (%)	16.28 (0.41)	17.30 (0.23)	18.73 (0.93)	17.71 (0.98)	16.97 (0.60)	16.17 (1.21)
	Conv. Rate (%)	10.73 (0.29)	9.40 (0.28)	12.88 (0.55)	12.35 (0.97)	12.72 (1.01)	13.83 (1.02)
	Run Time (วินาที)	94.73 (0.98)	94.11 (0.34)	94.78 (0.77)	94.11 (0.46)	93.54 (0.19)	94.73 (0.59)
0.05	Cost Saving (%)	14.98 (1.3)	16.69 (0.84)	17.82 (3.03)	17.15 (0.09)	17.00 (1.06)	16.09 (1.06)
	Conv. Rate (%)	4.75 (1.87)	11.58 (0.37)	12.83 (2.36)	11.9 (0.24)	13.74 (1.34)	14.88 (1.09)
	Run Time (วินาที)	93.73 (0.95)	93.73 (0.05)	94.50 (0.18)	94.11 (0.74)	93.99 (0.19)	95.79 (0.17)
0.10	Cost Saving (%)	16.50 (0.99)	17.66 (1.02)	17.88 (1.75)	18.31 (1.83)	17.52 (1.20)	15.89 (1.01)
	Conv. Rate (%)	9.93 (1.26)	12.72 (1.34)	12.93 (2.01)	14.42 (1.89)	14.79 (1.45)	14.86 (1.88)
	Run Time (วินาที)	94.87 (0.24)	93.11 (0.45)	93.11 (0.51)	94.00 (0.12)	93.75 (0.44)	93.99 (0.38)
0.20	Cost Saving (%)	16.65 (1.05)	17.85 (0.87)	18.09 (1.43)	18.16 (1.23)	16.89 (0.76)	16.12 (1.72)
	Conv. Rate (%)	9.78 (1.54)	12.82 (1.55)	12.83 (0.83)	13.69 (1.80)	13.92 (0.81)	14.55 (0.67)
	Run Time (วินาที)	93.53 (0.62)	95.13 (0.61)	94.26 (0.41)	94.77 (0.36)	93.63 (0.17)	94.83 (0.45)
0.30	Cost Saving (%)	17.48 (1.33)	**18.99 (1.10)**	**19.11 (0.79)**	**19.09 (0.88)**	18.23 (1.62)	17.02 (1.86)
	Conv. Rate (%)	12.44 (1.31)	**14.88 (1.07)**	**15.72 (0.69)**	**15.45 (0.95)**	15.45 (1.46)	15.33 (1.71)
	Run Time (วินาที)	93.45 (0.41)	**93.19 (0.49)**	**94.36 (0.71)**	**94.11 (0.77)**	94.16 (0.53)	93.66 (0.48)
0.40	Cost Saving (%)	18.05 (1.57)	**19.95 (0.89)**	**19.41 (0.74)**	**19.56 (1.01)**	18.75 (1.85)	17.74 (1.48)
	Conv. Rate (%)	12.79 (0.89)	**15.75 (1.45)**	**14.89 (0.77)**	**15.11 (1.20)**	15.89 (1.32)	15.03 (1.65)
	Run Time (วินาที)	94.65 (0.23)	**94.78 (0.98)**	**94.64 (0.19)**	**94.59 (0.33)**	94.18 (0.14)	94.44 (0.72)

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.50	Cost Saving (%)	13.67 (0.84)	15.28 (0.45)	15.74 (1.44)	15.89 (1.23)	16.60 (0.84)	17.65 (0.66)
	Conv. Rate (%)	7.89 (0.64)	8.12 (0.82)	8.55 (1.72)	10.73 (1.28)	12.81 (1.97)	14.02 (1.43)
	Run Time (วินาที)	94.60 (0.76)	94.61 (0.15)	95.10 (0.78)	94.72 (0.33)	94.18 (0.09)	94.84 (0.29)
0.60	Cost Saving (%)	14.10 (1.06)	15.20 (0.78)	15.54 (1.54)	15.62 (0.65)	16.11 (1.76)	17.54 (0.83)
	Conv. Rate (%)	7.22 (1.37)	8.92 (2.01)	11.44 (1.64)	11.83 (0.77)	12.54 (1.83)	13.66 (1.43)
	Run Time (วินาที)	94.77 (0.80)	94.91 (0.15)	93.77 (0.54)	94.85 (0.82)	95.11 (0.49)	95.24 (0.36)
0.70	Cost Saving (%)	13.77 (0.72)	15.19 (1.05)	15.34 (1.56)	15.67 (0.54)	16.10 (0.77)	17.22 (1.62)
	Conv. Rate (%)	11.78 (0.87)	11.41 (0.77)	12.38 (1.71)	12.43 (1.20)	13.09 (0.43)	13.12 (0.99)
	Run Time (วินาที)	95.21 (0.94)	95.18 (0.79)	94.72 (0.47)	94.55 (0.48)	95.10 (1.20)	95.20 (0.78)
0.80	Cost Saving (%)	13.22 (1.45)	14.58 (0.44)	14.87 (0.77)	15.49 (0.81)	15.82 (0.23)	16.27 (1.29)
	Conv. Rate (%)	8.23 (0.85)	11.88 (1.39)	9.92 (1.86)	11.80 (0.92)	12.29 (2.05)	13.33 (1.54)
	Run Time (วินาที)	95.23 (1.02)	95.74 (0.63)	95.30 (0.26)	95.72 (1.04)	95.10 (0.77)	94.88 (1.03)
0.90	Cost Saving (%)	12.86 (0.76)	13.78 (1.30)	14.63 (1.75)	15.15 (0.65)	15.34 (1.22)	15.73 (1.81)
	Conv. Rate (%)	6.88 (1.74)	7.39 (1.75)	8.66 (1.84)	9.53 (1.22)	7.29 (0.95)	11.89 (1.76)
	Run Time (วินาที)	95.20 (1.32)	95.80 (0.97)	95.71 (0.24)	95.33 (0.86)	95.00 (0.07)	94.79 (0.88)
1.00	Cost Saving (%)	12.22 (1.02)	13.21 (0.98)	14.02 (1.64)	14.23 (0.77)	14.74 (0.32)	15.06 (0.87)
	Conv. Rate (%)	5.26 (1.48)	7.63 (1.25)	7.59 (0.92)	8.21 (1.16)	9.44 (1.18)	10.44 (1.23)
	Run Time (วินาที)	95.83 (0.15)	95.73 (1.01)	94.62 (0.15)	95.77 (0.63)	95.24 (0.36)	95.66 (0.13)

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.50	Cost Saving (%)	18.03 (1.11)	**19.87 (0.49)**	**19.09 (0.91)**	**19.00 (1.13)**	18.01 (1.79)	17.20 (2.01)
	Conv. Rate (%)	14.11 (0.78)	**14.81 (0.67)**	**15.20 (1.03)**	**15.09 (0.70)**	14.56 (1.11)	14.63 (1.76)
	Run Time (วินาที)	95.73 (0.56)	**95.11 (0.49)**	**95.91 (0.22)**	**95.23 (0.38)**	95.47 (0.85)	95.20 (8.7)
0.60	Cost Saving (%)	18.00 (0.69)	18.89 (1.34)	18.10 (0.99)	17.97 (0.44)	16.38 (1.27)	15.28 (1.67)
	Conv. Rate (%)	14.20 (1.44)	14.67 (1.03)	15.00 (1.44)	14.89 (0.86)	13.79 (1.55)	13.33 (0.99)
	Run Time (วินาที)	96.12 (0.58)	96.65 (0.64)	95.43 (0.63)	95.46 (0.56)	95.33 (0.62)	95.44 (0.73)
0.70	Cost Saving (%)	17.34 (1.78)	17.66 (0.81)	18.01 (1.75)	17.23 (1.09)	15.97 (1.76)	14.88 (1.42)
	Conv. Rate (%)	13.77 (1.03)	13.81 (1.66)	13.81 (0.64)	13.95 (1.52)	13.10 (0.93)	12.76 (0.49)
	Run Time (วินาที)	95.45 (0.75)	95.64 (0.34)	9554 (0.26)	96.33 (0.68)	95.53 (0.46)	94.77 (0.54)
0.80	Cost Saving (%)	16.88 (1.05)	17.10 (1.33)	17.45 (0.78)	16.94 (1.50)	15.11 (1.52)	14.72 (0.97)
	Conv. Rate (%)	13.53 (1.22)	13.97 (1.03)	14.33 (0.68)	13.94 (0.69)	12.80 (0.40)	12.31 (1.47)
	Run Time (วินาที)	95.67 (0.77)	95.68 (0.78)	94.75 (0.45)	96.75 (0.33)	95.85 (0.75)	95.95 (0.88)
0.90	Cost Saving (%)	16.15 (0.75)	16.23 (0.73)	16.20 (1.44)	16.85 (1.00)	15.08 (1.93)	14.21 (1.39)
	Conv. Rate (%)	13.40 (0.89)	13.23 (1.39)	13.76 (1.07)	13.69 (0.89)	13.05 (0.65)	12.42 (1.76)
	Run Time (วินาที)	96.20 (0.76)	95.64 (0.52)	95.87 (0.88)	94.73 (0.34)	95.82 (0.37)	96.28 (0.95)
1.00	Cost Saving (%)	15.14 (0.99)	15.55 (1.56)	15.23 (0.84)	15.32 (0.79)	14.20 (2.14)	13.70 (2.06)
	Conv. Rate (%)	13.05 (1.43)	13.04 (1.55)	13.10 (1.00)	13.33 (1.63)	12.48 (1.30)	12.03 (1.48)
	Run Time (วินาที)	95.95 (0.47)	95.84 (0.48)	96.84 (0.85)	96.37 (0.90)	95.45 (0.74)	95.86 (0.67)

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 1,000 PopulationSize = 100, Generation = 300

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.01	Cost Saving (%)	8.45 (1.25)	9.16 (0.32)	10.31 (0.17)	10.56 (0.62)	12.12 (0.54)	13.39 (1.07)
	Conv. Rate (%)	4.08 (0.36)	4.21 (0.71)	4.60 (0.55)	4.98 (0.22)	5.71 (0.55)	6.29 (0.35)
	Run Time (วินาที)	269.35 (2.27)	269.96 (2.97)	271.73 (1.06)	288.99 (1.32)	270.05 (1.32)	269.68 (2.52)
0.05	Cost Saving (%)	9.65 (0.83)	10.87 (1.42)	13.51 (0.92)	12.67 (0.39)	12.58 (0.87)	13.35 (0.60)
	Conv. Rate (%)	5.77 (0.88)	5.45 (0.13)	6.95 (0.27)	6.04 (0.59)	6.83 (0.87)	6.97 (0.28)
	Run Time (วินาที)	269.86 (1.74)	268.36 (1.73)	265.38 (2.72)	271.73 (1.21)	273.98 (2.33)	267.01 (2.18)
0.10	Cost Saving (%)	10.82 (0.99)	12.55 (0.31)	13.47 (1.78)	14.76 (0.63)	16.21 (0.97)	16.33 (0.91)
	Conv. Rate (%)	5.01 (0.78)	5.13 (0.58)	6.46 (0.57)	7.85 (0.34)	7.88 (0.08)	6.67 (0.28)
	Run Time (วินาที)	271.65 (2.01)	268.87 (2.05)	267.5 (1.09)	270.5 (1.49)	270.15 (2.95)	271.03 (1.78)
0.20	Cost Saving (%)	12.30 (0.28)	13.03 (0.72)	14.06 (0.47)	13.40 (1.22)	16.67 (0.45)	17.69 (0.46)
	Conv. Rate (%)	6.74 (0.35)	6.17 (0.41)	7.74 (0.52)	7.62 (0.65)	8.21 (0.32)	8.10 (0.74)
	Run Time (วินาที)	265.33 (1.62)	267.31 (0.73)	267.93 (1.04)	270.16 (2.13)	269.68 (1.77)	268.32 (1.36)
0.30	Cost Saving (%)	13.69 (1.43)	14.99 (0.88)	15.15 (0.13)	15.56 (1.74)	16.46 (1.03)	17.34 (1.98)
	Conv. Rate (%)	6.47 (0.10)	7.19 (0.82)	7.36 (0.51)	7.53 (0.20)	8.36 (0.62)	8.15 (1.10)
	Run Time (วินาที)	271.84 (2.29)	265.15 (1.40)	267.24 (2.03)	266.04 (2.46)	269.09 (2.7)	270.45 (2.07)
0.40	Cost Saving (%)	13.02 (0.65)	14.86 (1.41)	16.45 (1.63)	15.27 (0.48)	16.85 (0.75)	17.74 (1.04)
	Conv. Rate (%)	6.29 (0.42)	7.40 (0.98)	8.84 (1.09)	7.27 (0.73)	7.86 (0.78)	8.29 (0.70)
	Run Time (วินาที)	264.25 (0.82)	265.94 (2.21)	271.38 (1.68)	273.88 (1.82)	266.04 (0.77)	267.05 (2.38)

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	Cost Saving (%)	13.12 (0.49)	13.24 (1.62)	13.19 (0.53)	13.15 (0.23)	12.19 (1.08)	10.76 (0.19)
	Conv. Rate (%)	6.91 (0.49)	6.27 (0.91)	6.11 (0.30)	5.99 (0.34)	5.79 (1.20)	4.88 (0.29)
	Run Time (วินาที)	271.72 (1.84)	268.18 (1.47)	272.66 (2.52)	271.16 (1.65)	272.64 (1.06)	270.20 (3.05)
0.05	Cost Saving (%)	14.08 (0.56)	14.06 (0.57)	14.91 (1.03)	13.41 (1.65)	13.27 (0.79)	12.20 (0.55)
	Conv. Rate (%)	7.38 (0.28)	7.81 (0.26)	7.76 (0.15)	6.49 (0.27)	6.20 (0.22)	5.34 (0.63)
	Run Time (วินาที)	267.73 (0.57)	268.01 (2.18)	266.99 (2.19)	270.19 (0.44)	268.79 (2.33)	270.02 (2.23)
0.10	Cost Saving (%)	17.05 (0.38)	16.13 (0.48)	15.42 (0.69)	15.29 (50.89)	14.78 (6.68)	13.27 (1.00)
	Conv. Rate (%)	8.33 (0.63)	8.35 (0.31)	6.47 (0.63)	6.67 (1.11)	6.20 (0.94)	7.19 (1.32)
	Run Time (วินาที)	265.57 (2.38)	267.35 (0.54)	269.9 (2.37)	270.51 (1.52)	273.22 (1.19)	272.08 (0.96)
0.20	Cost Saving (%)	18.00 (1.33)	18.74 (1.04)	18.02 (0.75)	17.88 (0.54)	15.99 (0.73)	15.41 (0.45)
	Conv. Rate (%)	8.74 (0.25)	8.14 (0.55)	7.45 (0.66)	8.29 (0.22)	7.13 (0.15)	6.45 (0.36)
	Run Time (วินาที)	265.84 (2.88)	266.05 (1.93)	270.01 (1.08)	272.7 (1.41)	271.83 (0.95)	271.62 (2.94)
0.30	Cost Saving (%)	18.31 (0.62)	**20.06 (0.86)**	**19.64 (0.57)**	**20.44 (1.02)**	16.84 (0.91)	16.62 (1.46)
	Conv. Rate (%)	9.07 (0.93)	**10.17 (1.02)**	**9.59 (0.37)**	**10.94 (0.94)**	8.86 (0.91)	7.26 (1.09)
	Run Time (วินาที)	270.64 (1.46)	**268.48 (1.58)**	**271.61 (1.48)**	**271.59 (1.81)**	272.81 (2.46)	272.02 (1.71)
0.40	Cost Saving (%)	18.97 (1.35)	**21.73 (1.14)**	**21.55 (1.26)**	**20.63 (0.33)**	16.48 (0.37)	15.86 (1.22)
	Conv. Rate (%)	8.23 (0.88)	**11.01 (0.94)**	**10.70 (0.97)**	**9.47 (1.19)**	8.13 (0.69)	6.71 (1.04)
	Run Time (วินาที)	270.14 (0.70)	**271.12 (1.38)**	**273.76 (0.37)**	**269.47 (2.02)**	266.7 (0.58)	270.61 (2.03)

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.50	Cost Saving (%)	12.69 (1.03)	15.01 (0.84)	15.33 (1.76)	15.03 (1.64)	16.92 (0.98)	16.83 (1.35)
	Conv. Rate (%)	6.31 (0.10)	7.24 (0.62)	7.19 (0.53)	6.15 (0.23)	8.68 (0.55)	8.76 (0.19)
	Run Time (วินาที)	267.51 (1.45)	267.27 (0.48)	268.58 (2.53)	268.72 (0.83)	270.48 (1.37)	270.04 (1.96)
0.60	Cost Saving (%)	11.95 (1.27)	13.16 (0.32)	14.31 (0.87)	14.56 (0.62)	14.12 (0.54)	15.22 (1.19)
	Conv. Rate (%)	5.38 (0.72)	6.40 (0.98)	7.84 (1.09)	7.27 (0.73)	8.86 (0.78)	8.02 (0.84)
	Run Time (วินาที)	270.01 (0.72)	271.23 (0.75)	268.77 (2.28)	269.07 (1.29)	271.91 (1.18)	271.66 (1.12)
0.70	Cost Saving (%)	10.93 (0.54)	13.78 (0.64)	14.05 (0.99)	14.14 (0.90)	15.00 (0.53)	15.20 (1.34)
	Conv. Rate (%)	5.14 (0.38)	6.29 (0.96)	7.84 (0.72)	7.04 (0.39)	7.99 (0.73)	7.09 (0.45)
	Run Time (วินาที)	268.77 (1.28)	270.22 (1.39)	271.36 (2.02)	265.66 (1.73)	264.73 (2.67)	271.18 (1.64)
0.80	Cost Saving (%)	10.02 (1.38)	11.83 (0.93)	12.77 (1.24)	13.89 (1.61)	14.50 (0.72)	15.19 (1.17)
	Conv. Rate (%)	5.82 (0.99)	5.55 (0.31)	6.47 (0.78)	6.76 (0.66)	7.11 (0.97)	7.33 (0.91)
	Run Time (วินาที)	265.2 (2.96)	270.71 (2.35)	271.36 (2.02)	265.66 (2.73)	268.73 (2.67)	271.18 (1.64)
0.90	Cost Saving (%)	10.24 (1.03)	12.12 (1.00)	12.05 (0.50)	12.73 (0.77)	13.66 (1.21)	14.54 (1.03)
	Conv. Rate (%)	5.08 (0.86)	6.75 (0.65)	6.84 (1.18)	6.56 (0.91)	7.39 (0.84)	7.96 (0.92)
	Run Time (วินาที)	270.01 (2.78)	268.13 (1.58)	271.46 (2.57)	272.85 (1.34)	269.88 (2.08)	269.67 (2.28)
1.00	Cost Saving (%)	9.55 (0.37)	10.61 (0.82)	11.79 (0.61)	12.71 (1.06)	13.35 (0.73)	13.87 (1.42)
	Conv. Rate (%)	4.71 (0.47)	4.95 (0.82)	5.23 (0.26)	5.35 (1.35)	6.69 (0.56)	6.93 (0.46)
	Run Time (วินาที)	265.65 (1.83)	270.87 (2.42)	273.51 (2.92)	271.67 (1.89)	271.58 (1.87)	270.35 (2.00)

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.50	Cost Saving (%)	17.62 (1.46)	**20.65 (1.52)**	**20.73 (0.34)**	**19.66 (1.42)**	15.34 (0.63)	15.73 (1.11)
	Conv. Rate (%)	9.11 (0.08)	**10.62 (0.95)**	**10.06 (0.10)**	**10.77 (0.73)**	8.1 (1.04)	7.72 (0.25)
	Run Time (วินาที)	269.19 (1.48)	**267.15 (2.03)**	**263.86 (1.83)**	**272.06 (2.43)**	271.74 (2.04)	270.67 (1.51)
0.60	Cost Saving (%)	16.12 (0.29)	16.24 (0.62)	17.19 (0.53)	17.15 (0.23)	14.15 (0.95)	14.76 (0.19)
	Conv. Rate (%)	8.23 (0.88)	9.01 (0.94)	9.70 (0.97)	8.47 (0.19)	7.98 (03.97)	6.07 (1.04)
	Run Time (วินาที)	269.06 (1.07)	271.29 (2.24)	268.37 (1.26)	270.58 (0.83)	269.39 (0.84)	267.22 (0.77)
0.70	Cost Saving (%)	15.67 (0.72)	15.05 (1.27)	15.21 (1.52)	16.37 (1.75)	14.88 (1.08)	13.64 (0.65)
	Conv. Rate (%)	6.91 (0.31)	6.29 (0.84)	7.29 (0.18)	8.24 (1.04)	7.69 (1.06)	6.22 (0.24)
	Run Time (วินาที)	272.15 (1.97)	269.74 (1.01)	266.77 (0.99)	268.04 (2.85)	269.1 (1.81)	268.59 (1.32)
0.80	Cost Saving (%)	15.27 (0.71)	14.90 (1.30)	14.88 (0.69)	14.76 (1.44)	13.4 (0.14)	12.73 (1.04)
	Conv. Rate (%)	7.09 (0.88)	6.13 (0.81)	6.42 (0.69)	6.29 (0.89)	5.78 (0.68)	5.07 (0.37)
	Run Time (วินาที)	267.15 (1.97)	268.74 (1.01)	270.77 (0.89)	268.04 (2.85)	268.1 (1.81)	268.59 (2.32)
0.90	Cost Saving (%)	14.63 (0.92)	13.44 (0.68)	13.93 (1.21)	13.03 (0.39)	12.49 (0.87)	12.46 (0.62)
	Conv. Rate (%)	7.94 (0.70)	6.57 (1.14)	6.61 (1.02)	5.07 (0.36)	5.66 (0.12)	5.29 (0.25)
	Run Time (วินาที)	268.33 (2.63)	270.35 (2.31)	269.47 (2.63)	268.67 (1.11)	265.20 (1.94)	266.19 (1.32)
1.00	Cost Saving (%)	13.75 (1.11)	13.22 (0.19)	12.80 (0.62)	12.01 (0.39)	11.08 (1.13)	10.44 (0.80)
	Conv. Rate (%)	6.41 (1.36)	6.47 (0.53)	5.81 (0.16)	5.8 (0.21)	4.87 (0.53)	4.17 (0.77)
	Run Time (วินาที)	269.08 (2.56)	265.06 (2.57)	272.91 (3.03)	267.41 (2.65)	270.27 (0.79)	270.20 (1.52)

ตารางผนวกที่ 7 การทดลองหาค่า Pc และค่า Pm ที่เหมาะสมของปัญหาที่มี VerticeSize = 2,000ม PopulationSize = 100, Generation = 400

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.01	Cost Saving (%)	5.17 (0.38)	5.35 (0.54)	5.90 (0.37)	6.51 (0.52)	7.93 (0.72)	9.14 (0.15)
	Conv. Rate (%)	3.06 (0.41)	3.56 (0.79)	3.38 (0.21)	3.74 (0.41)	3.90 (0.94)	4.48 (0.66)
	Run Time (วินาที)	750.94 (4.70)	749.57 (3.14)	750.61 (4.02)	751.07 (2.36)	753.09 (4.22)	753.70 (5.55)
0.05	Cost Saving (%)	5.33 (0.63)	6.35 (0.31)	6.47 (0.63)	7.67 (1.11)	8.61 (0.78)	9.73 (0.74)
	Conv. Rate (%)	3.76 (0.19)	3.09 (0.36)	3.75 (0.11)	3.98 (0.22)	4.06 (0.27)	4.35 (0.51)
	Run Time (วินาที)	750.39 (3.77)	749.39 (3.45)	760.09 (5.33)	761.02 (5.15)	754.09 (3.82)	744.31 (4.22)
0.10	Cost Saving (%)	6.83 (0.30)	8.30 (0.27)	8.69 (0.48)	9.85 (0.48)	12.04 (0.67)	12.23 (1.16)
	Conv. Rate (%)	3.29 (0.63)	3.89 (0.44)	4.06 (0.75)	4.04 (0.72)	5.29 (0.89)	6.78 (0.68)
	Run Time (วินาที)	750.43 (4.82)	752.88 (3.64)	747.37 (4.43)	756.92 (3.48)	754.99 (2.34)	743.79 (5.20)
0.20	Cost Saving (%)	7.05 (0.74)	8.57 (0.73)	9.14 (1.14)	10.03 (0.63)	13.49 (0.27)	14.46 (1.22)
	Conv. Rate (%)	3.97 (0.13)	3.95 (0.45)	4.13 (0.29)	4.97 (0.39)	5.19 (0.44)	5.79 (0.33)
	Run Time (วินาที)	751.12 (3.85)	744.57 (3.48)	753.36 (4.82)	740.73 (5.08)	743.87 (2.62)	744.10 (3.85)
0.30	Cost Saving (%)	7.52 (1.11)	8.23 (0.56)	10.17 (0.45)	11.41 (1.61)	13.72 (0.83)	15.27 (0.48)
	Conv. Rate (%)	3.34 (0.13)	4.11 (0.29)	4.42 (0.23)	5.41 (0.13)	6.67 (0.89)	7.27 (0.73)
	Run Time (วินาที)	744.11 (3.55)	744.19 (2.93)	751.70 (4.88)	756.72 (3.53)	748.68 (5.39)	745.88 (2.82)
0.40	Cost Saving (%)	8.52 (1.11)	9.15 (0.23)	10.54 (1.03)	10.63 (0.92)	11.28 (1.33)	13.83 (0.70)
	Conv. Rate (%)	4.34 (0.15)	4.99 (0.34)	4.96 (0.92)	5.94 (0.70)	5.99 (0.82)	7.29 (0.63)
	Run Time (วินาที)	751.11 (4.35)	746.16 (2.65)	759.67 (2.28)	758.33 (2.63)	743.66 (3.48)	750.43 (3.82)

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.01	Cost Saving (%)	9.11 (0.48)	10.07 (0.42)	10.19 (0.48)	10.52 (1.01)	9.23 (0.56)	9.17 (0.45)
	Conv. Rate (%)	4.14 (0.42)	4.16 (0.21)	5.26 (0.97)	4.34 (0.13)	4.11 (0.29)	3.42 (0.23)
	Run Time (วินาที)	751.27 (3.75)	754.60 (4.93)	746.73 (3.38)	741.37 (3.17)	744.19 (3.93)	754.70 (2.88)
0.05	Cost Saving (%)	9.88 (0.54)	10.06 (1.30)	11.02 (0.65)	11.51 (1.09)	10.86 (0.47)	10.12 (1.13)
	Conv. Rate (%)	4.41 (0.21)	4.37 (0.28)	5.93 (0.82)	5.02 (0.25)	4.57 (0.33)	4.66 (0.82)
	Run Time (วินาที)	743.88 (4.28)	753.30 (2.36)	753.53 (2.93)	744.28 (2.01)	748.37 (2.63)	745.71 (2.82)
0.10	Cost Saving (%)	12.18 (1.06)	13.06 (0.47)	13.69 (1.03)	13.69 (0.74)	12.54 (1.04)	12.23 (0.55)
	Conv. Rate (%)	6.82 (0.99)	6.55 (0.31)	5.47 (0.78)	5.76 (0.66)	5.10 (0.937)	5.33 (0.91)
	Run Time (วินาที)	741.01 (4.36)	744.21 (4.71)	754.20 (4.55)	763.98 (5.22)	755.71 (3.75)	747.29 (3.35)
0.20	Cost Saving (%)	13.77 (0.88)	15.15 (1.13)	14.95 (1.27)	14.0 (0.59)	12.83 (0.87)	12.97 (1.08)
	Conv. Rate (%)	5.86 (0.74)	7.36 (0.73)	7.38 (0.72)	6.73 (0.21)	6.98 (0.33)	5.01 (0.18)
	Run Time (วินาที)	759.85 (5.23)	748.98 (5.84)	749.01 (2.72)	755.71 (2.23)	767.69 (3.77)	744.17 (2.37)
0.30	Cost Saving (%)	15.85 (0.75)	**18.74 (1.04)**	**18.31 (0.87)**	**17.56 (0.62)**	13.12 (0.54)	12.99 (1.48)
	Conv. Rate (%)	7.86 (0.78)	**8.29 (0.70)**	**7.84 (1.09)**	**7.27 (0.73)**	6.86 (0.78)	5.26 (0.97)
	Run Time (วินาที)	766.04 (2.77)	**757.05 (4.38)**	**758.77 (4.28)**	**749.07 (2.29)**	742.91 (4.18)	744.73 (4.55)
0.40	Cost Saving (%)	16.3 (1.27)	**17.84 (1.29)**	**18.05 (0.36)**	**18.04 (0.90)**	14.72 (0.53)	13.02 (0.65)
	Conv. Rate (%)	7.89 (0.44)	**8.69 (0.84)**	**8.84 (0.72)**	**8.04 (0.39)**	7.99 (0.73)	7.43 (0.82)
	Run Time (วินาที)	752.88 (3.64)	**756.19 (4.35)**	**761.36 (2.02)**	**749.66 (3.73)**	750.73 (2.67)	744.53 (3.93)

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.01	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
0.50	Cost Saving (%)	7.51 (1.09)	9.41 (0.65)	9.87 (0.42)	10.75 (1.11)	10.50 (0.49)	12.15 (0.23)
	Conv. Rate (%)	3.02 (0.35)	4.49 (0.27)	4.93 (0.46)	4.41 (0.36)	4.87 (0.94)	6.47 (0.19)
	Run Time (วินาที)	743.28 (4.01)	750.19 (4.44)	761.35 (4.00)	754.08 (2.56)	747.56 (3.91)	749.58 (5.83)
0.60	Cost Saving (%)	7.69 (0.74)	9.29 (0.89)	10.89 (1.61)	10.62 (1.46)	10.85 (0.34)	11.37 (1.75)
	Conv. Rate (%)	3.76 (0.66)	4.67 (0.11)	5.76 (0.66)	5.26 (0.49)	5.90 (0.34)	6.24 (0.84)
	Run Time (วินาที)	743.98 (3.22)	748.51 (1.52)	745.66 (2.73)	752.02 (1.71)	749.13 (2.81)	754.04 (2.85)
0.70	Cost Saving (%)	7.70 (0.59)	8.18 (0.34)	8.97 (0.51)	8.86 (1.22)	9.35 (1.28)	9.76 (1.44)
	Conv. Rate (%)	3.73 (0.21)	3.29 (0.22)	4.86 (0.20)	4.71 (0.64)	5.96 (0.91)	5.29 (0.89)
	Run Time (วินาที)	761.71 (3.23)	747.7 (2.41)	756.17 (3.04)	739.61 (2.03)	742.41 (3.77)	754.04 (2.85)
0.80	Cost Saving (%)	7.31 (0.73)	7.44 (1.02)	8.15 (0.95)	8.73 (1.10)	8.21 (0.72)	8.17 (0.16)
	Conv. Rate (%)	3.84 (0.63)	4.94 (0.94)	4.98 (0.97)	4.72 (0.25)	4.51 (0.39)	4.98 (0.22)
	Run Time (วินาที)	746.23 (3.75)	744.59 (3.81)	749.39 (3.84)	750.67 (5.51)	755.72 (4.73)	751.02 (3.15)
0.90	Cost Saving (%)	7.24 (1.26)	7.63 (0.33)	7.88 (1.08)	8.76 (0.79)	8.72 (0.65)	8.85 (0.48)
	Conv. Rate (%)	2.95 (0.82)	3.47 (0.19)	3.60 (0.75)	4.07 (0.64)	4.93 (0.82)	4.04 (0.72)
	Run Time (วินาที)	754.19 (2.82)	759.47 (6.02)	755.71 (3.56)	749.22 (3.77)	744.53 (2.93)	750.92 (5.48)
1.00	Cost Saving (%)	7.15 (0.48)	7.66 (1.42)	7.49 (1.14)	7.34 (0.65)	7.19 (1.03)	7.03 (0.61)
	Conv. Rate (%)	2.54 (0.28)	3.77 (0.73)	3.19 (0.14)	3.22 (0.24)	3.47 (0.78)	3.97 (0.39)
	Run Time (วินาที)	754.16 (4.32)	742.06 (2.43)	751.66 (6.48)	758.59 (4.32)	754.20 (4.55)	749.73 (3.08)

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

Pc		Pm					
		0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
0.50	Cost Saving (%)	14.11 (0.48)	**17.95 (1.27)**	**18.77 (1.24)**	**17.89 (0.61)**	14.50 (0.72)	13.69 (1.03)
	Conv. Rate (%)	7.14 (0.25)	**7.98 (0.72)**	**8.47 (0.78)**	**8.76 (0.66)**	7.97 (0.97)	6.47 (0.78)
	Run Time (วินาที)	753.27 (3.55)	**754.01 (3.72)**	**756.36 (2.02)**	**745.66 (2.73)**	742.73 (2.67)	740.20 (2.55)
0.60	Cost Saving (%)	13.88 (1.54)	15.76 (1.15)	14.05 (0.50)	14.73 (0.77)	13.66 (1.21)	11.95 (1.27)
	Conv. Rate (%)	7.41 (0.21)	7.99 (0.19)	6.84 (0.18)	6.56 (0.91)	7.39 (0.84)	6.38 (0.72)
	Run Time (วินาที)	755.88 (3.28)	764.85 (2.16)	744.46 (2.57)	751.85 (3.34)	756.88 (2.98)	743.01 (2.72)
0.70	Cost Saving (%)	10.18 (1.06)	11.01 (1.08)	11.06 (0.86)	10.24 (1.62)	10.05 (0.93)	8.93 (1.04)
	Conv. Rate (%)	4.82 (0.99)	5.36 (0.69)	6.17 (0.72)	4.27 (0.91)	4.27 (0.43)	4.14 (0.38)
	Run Time (วินาที)	750.01 (3.36)	748.37 (3.26)	740.48 (2.58)	741.18 (3.47)	751.29 (3.24)	755.77 (3.28)
0.80	Cost Saving (%)	7.77 (0.68)	7.18 (0.16)	6.73 (1.14)	6.06 (0.57)	6.05 (0.13)	6.02 (0.38)
	Conv. Rate (%)	5.86 (0.74)	5.81 (0.16)	4.01 (0.94)	5.81 (0.26)	3.47 (0.53)	3.23 (0.26)
	Run Time (วินาที)	753.85 (4.23)	747.59 (3.37)	741.12 (3.38)	744.01 (2.18)	750.17 (4.02)	752.36 (2.51)
0.90	Cost Saving (%)	7.33 (0.62)	7.01 (0.48)	6.65 (0.52)	6.21 (0.97)	5.48 (0.58)	5.35 (0.60)
	Conv. Rate (%)	4.59 (0.41)	3.95 (0.62)	3.62 (0.95)	3.88 (0.08)	3.93 (0.93)	2.97 (0.28)
	Run Time (วินาที)	756.13 (4.36)	760.19 (2.53)	741.15 (4.03)	755.15 (2.95)	754.24 (5.62)	742.01 (2.18)
1.00	Cost Saving (%)	7.16 (0.57)	6.60 (0.69)	6.24 (0.62)	5.67 (0.45)	5.34 (0.24)	5.18 (0.68)
	Conv. Rate (%)	3.71 (0.47)	3.31 (0.34)	3.01 (0.44)	3.21 (0.32)	3.88 (0.17)	2.20 (0.44)
	Run Time (วินาที)	753.47 (4.01)	754.45 (4.66)	751.29 (2.24)	752.68 (2.77)	754.14 (5.55)	749.22 (3.19)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายสุภัทร พัฒน์วิชัยโชติ
เกิดวันที่	26 กรกฎาคม 2520
สถานที่เกิด	อำเภอนครหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	วศ. บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
	วศ. ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลนของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) พ.ศ. 2547