บทที่ 5
วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค
(Particle Swarm Optimization Algorithm : PSO)

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนออัลกอริทึมแบบใหม่ที่เรียกว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm : PSO) ซึ่งเป็นการประยุกต์การคัดเลือกคำตอบ โดยใช้หลักความน่าจะเป็น ในบทนี้จะเสนอหลักการวิธีอัลกอริทึม แนวคิดลักษณะการตัดทอนคำตอบอัลกอริทึมและตัวอย่างวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

5.1 แนวคิดวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm : PSO) เป็นการจำลองพฤติกรรมของฝูงนกที่บินไปเป็นกลุ่มด้วยกัน มีการทำงานเป็นแบบสุ่มและทำงานด้วยกลุ่มประชากรที่มีพฤติกรรมทางสังคม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค นี้ได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก และได้ถูกคิดค้นโดย Kennedy and Eberthart (1995)

5.2 หลักการวิธีวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm : PSO) เป็นอัลกอริทึมที่ได้จากการเคลื่อนที่ของฝูงนกหรือฝูงปลา ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้งสองเป็นการเคลื่อนที่แบบกลุ่มย่อยๆ ที่เคลื่อนที่ไปตามเวลา โดยปลาหรือนกสามารถเคลื่อนที่ไปเป็นฝูงแยกตัวออกจากฝูง หรือรวมตัวกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้งได้ ซึ่ง Kennedy and Eberhart (1995) ได้อธิบายเอาไว้ว่าการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเป็นการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม (Stochastic) เป็นวิธีการหาค่าความเหมาะสมโดยอาศัยพื้นฐานของความน่าจะเป็น โดยได้รับแรงจูงใจมาจากพฤติกรรมทางสังคมในการอพยพของฝูงนก และการเรียนรู้ของฝูงปลา ที่อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร แต่ละตัวดำเนินการเรียกว่า “อนุภาค (Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Velocity) ได้ อนุภาคนี้จะรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่ม บินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหาระหว่างบิน อนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะพบคำตอบที่ดีที่สุด จากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization) ขึ้นเพื่อใช้ในปัญหาการจัดตารางระบบผลิต (Liao et al., 2007)

อัลกอริทึม DPSO เป็นการพัฒนามาจากวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค PSO ซึ่งเป็นการดำเนินงานตามความสัมพันธ์ของงาน ในอัลกอริทึม DPSO จะมีประสิทธิภาพมากในการคำนวณความเร็วของอนุภาคและมีการพัฒนาการย้ายอนุภาคให้ดีในลำดับงานใหม่

5.3 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบตัวยูที่มีสถานีงานขนาน

1. การเตรียมข้อมูล (Data Input)

ในการเตรียมข้อมูลรายละเอียดที่ใช้ในวิธี DPSO เพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลจะใช้จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และเวลาที่ใช้จะใช้เวลาเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รวมถึงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การสร้างตัวดำเนินการเริ่มแรก (Initialize Generator) เป็นการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) เพื่อใช้ในการเลือกเส้นทาง ซึ่งค่าในตารางเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ 0 โดยมีขนาดเท่ากับ $n \times n$ เมื่อ n คือ จำนวนเส้นทางทั้งหมดต้องไป

2. การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น (Representation & Initialization)

สร้างสตริงคำตอบเบื้องตันเป็นการสุ่มเลือกเส้นทางจากตารางทิศทางการเดิน โดยทำการสุ่มเลือกที่ละตัว โดยใช้วิธีการสุ่มจำนวน Swarm ฝูงๆ ละ Particle ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น (Initial Population)

3. การประเมินค่า (Evaluation)

คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ต้องการ ในที่นี้จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ จำนวนสถานีงานที่มีสถานีขนาน จำนวนสถานีงาน ความสมดุลระหว่างสถานีงานและความสมดุลภายในสถานีงานของประชากรคำตอบ

4. การหาค่าที่เหมาะสม (Pareto Based Approach)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ที่มีการจัดลำดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรงให้คำตอบที่ได้จากประชากรทั้งหมด โดยจะถูกจัดแบ่งเป็นกลุ่ม กลุ่มที่มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นกลุ่มที่ดีที่สุด

5. การคัดเลือกคำตอบ (Selection)

การคัดเลือกคำตอบเป็นการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Local Best Solution : Lbest) และคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในประชากรทั้งหมด (Global Best Solution : Gbest) โดยการคัดเลือกจากคำตอบที่ทำการจักกลุ่มแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting แล้วโดยเลือกกลุ่มที่น้อยที่สุดในแต่ละฝูงมาเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Lbest) และกลุ่มที่น้อยที่สุดของประชากรมาเป็นคำตอบที่ดีที่สุดในประชากรทั้งหมด (Gbest) และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในประชากรทั้งหมดโดยเลือกเฉพาะกลุ่มที่ดีสุดในประชากรในการเก็บค่า

6. การปรับปรุงตาราง (Update Matrix)

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จะใช้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Gbest) ในการปรับปรุงดังนี้

6.1 การกำหนดค่าอนุภาค

การกำหนดค่าอนุภาคเป็นปัญหาการจัดแบบ Flowshop โดยจะแสดงลำดับงาน n เป็นตัวแปร โดยอัลกอริทึม PSO จะมีขั้นตอนการทำแบบ “Job-to-Position” สำหรับอนุภาค โดยค่าอนุภาคที่ได้จะอยู่ในรูปของตารางตำแหน่ง (Position Matrix)

6.2 การปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

กำหนดให้ Velocity ของอนุภาคเป็นค่า i คือ $V_i^t = \left(v_{i11}^t, v_{i12}^t, \ldots, v_{iinn}^t\right), v_{jki}^t \in R$ เมื่อ v_{ijk}^t คือ Velocity ของงานที่ j ของอนุภาคที่ i

การเคลื่อนที่ของ Velocity ของอนุภาคสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i,j)}\right) + c_2 r_2 \left(G_{(i,j)} - X_{(i,j)}\right) \tag{5.1}$$

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \tag{5.2}$$

เมื่อ $V_{(i,j)}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฝูงที่ j รอบที่ i

$X_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคในฝูงที่ j รอบที่ i

$P_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของฝูง (Lbest)

$G_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด (Gbest)

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มในช่วง (0, 1)

c_1 และ c_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor)

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

จากสมการที่ (5.1) จะเป็นสมการการปรับปรุงค่าการเคลื่อนที่ ส่วนสมการที่ (5.2) จะเป็นการอัพเดทสมการที่ (5.1) จากนั้นทำการปรับค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้เป็นค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ Sigmoid Function เพื่อใช้ในการสุ่มสตริงคำตอบในรอบถัดไป โดยตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้ในรอบนี้ จะกลายเป็นตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรอบก่อนหน้า เมื่อทำการพิจารณาในรอบถัดไป

6.3 Sigmoid Function

อนุภาคแต่ละอนุภาคจะทำการเคลื่อนย้ายตามการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการปรับปรุงสมการ (5.1) ซึ่งถ้าค่าการเคลื่อนที่มีค่าสูงจะสามารถทำการเลือกได้ดีกว่าค่าที่มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงได้กำหนดเงื่อนไขในการเลือกของแต่ละอนุภาคโดยใช้สมการที่ (5.3) ทำการปรับปรุงค่าการเคลื่อนที่ที่จะใช้ในการเลือกให้มีค่าอยู่ระหว่าง [0,1]

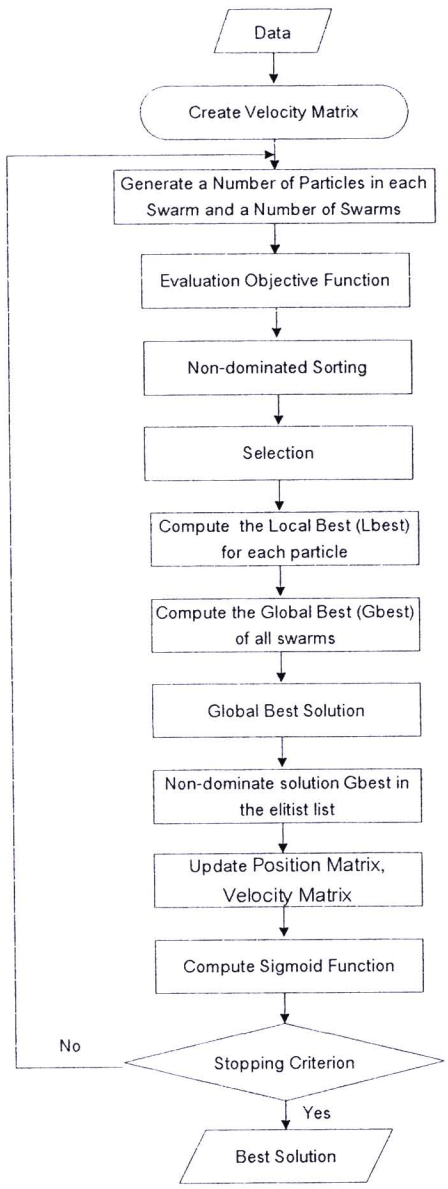
$$s\left(V_{(i,j)}\right) = \frac{1}{1+\exp\left(-V_{(i,j)}\right)} \tag{5.3}$$

7. **เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด** (Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population)

นำคำตอบที่ได้จากการเก็บค่าที่ดีที่สุดของประชากรไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากการเก็บค่าที่ดีที่สุดของประชากรในรอบก่อนหน้า โดยจะนำคำตอบที่ได้มาหา Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด และทำการเก็บค่าที่ได้จากกลุ่มคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อนำใช้ในรอบต่อไป

8. **สิ้นสุดกระบวนการ** (Stopping Criteria)

เมื่อการคำนวณตามขั้นตอนครบแล้ว ดูว่าครบตามจำนวนเจนเนอเรชันที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ครบให้วนใหม่ซ้ำอีกจนกว่าจะครบตามเจนเนอเรชันที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำคำตอบที่ได้จากการเก็บค่าที่ดีที่สุดมาเป็นคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

5.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในการแก้ปัญหาสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนาน

จากขั้นตอนของวิธีวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ที่ได้นำเสนอขั้นตอนมาทั้งหมด สามารถนำมาทดลองใช้แก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนานของปัญหา Jackson (1956) มีงานทั้งหมด 11 งาน จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ A, B และ C มีรอบเวลาในการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 6 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของแต่ละงานดังนี้

5.4.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

5.4.1.1 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ DPSO ที่ใช้ในตัวอย่าง

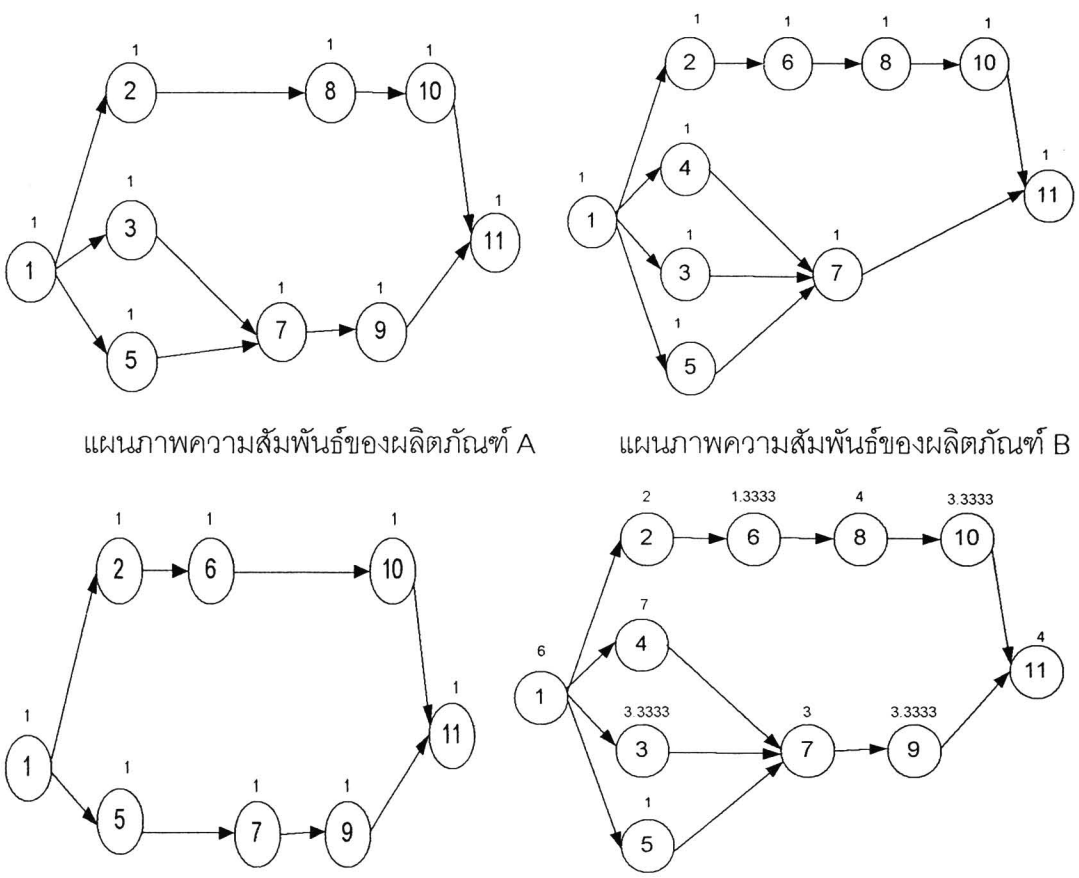
1. จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarm) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3

2. จำนวนฝูง (Number of Swarms) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2

3. น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight : w) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

4. ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor : c_1, c_2) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1

5.4.1.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Combined Relations Precedence Diagram) แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 5.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Combined Relations Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 11 ขั้นงานของ Jackson (1956)

5.4.1.3 การหาเวลาทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน จากปัญหาตัวอย่างขนาด 11 ขั้นงานของ Jackson (1956) ได้ทำการประยุกต์เวลาการทำงานจากเดิมงานที่ 4 มีเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ B เท่ากับ 7 และผลิตภัณฑ์ A, C มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ B เกินรอบเวลาในการทำงานในแต่ละสถานี (Cycle Time = 6) งานที่ 4 จึงสามารถมีสถานีขนานได้ จึงทำการปรับค่าเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ในงานที่ 4 จากเดิมที่มีเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ A เท่ากับ 7 ผลิตภัณฑ์ B เท่ากับ 0 และผลิตภัณฑ์ C เท่ากับ 0 ให้มีเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุดคือ 7 ทั้งหมด ดังนั้นงานที่ 4 จะมีเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C เท่ากับ 7 จากนั้นจึงทำการจัดงานลงสถานีงานโดยจะใช้ค่าเฉลี่ยเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดจากเวลาที่ได้ทำการปรับแล้ว (Modified Time Model) ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เวลาในการผลิตสินค้าชนิด A, B และ C ในแต่ละขั้นงาน

Task	Time Model (Jackson, 1956)			Modified Time Model			สถานีงานขนาน	Mean
	A	B	C	A	B	C		
1	6	6	6	6	6	6	-	6.0000
2	2	2	2	2	2	2	-	2.0000
3	5	5	0	5	5	0	-	3.3333
4	***0***	***7***	***0***	***7***	***7***	***7***	***1***	***7***
5	1	1	1	1	1	1	-	1.0000
6	0	2	2	0	2	2	-	1.3333
7	3	3	3	3	3	3	-	3.0000
8	6	6	0	6	6	0	-	4.0000
9	5	0	5	5	0	5	-	3.3333
10	5	5	0	5	5	0	-	3.3333
11	4	4	4	4	4	4	-	4.0000

5.4.1.4 สร้างตาราง Precedence Matrix Font **และ** Precedence Matrix Back จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม รูปที่ 5.2 จะได้ดังตารางที่ 5.2-5.3

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

5.4.2 สุ่มสตริงคำตอบเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าสตริงเริ่มต้นในแต่ละฝูงมาฝูงละ 1 ตัว แล้วจึงทำการสร้างตำแหน่งของสตริงในแต่ละฝูงที่กำหนด และจึงทำการสร้างทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้น ซึ่งจะมีขนาด $n \times n$ โดยที่ n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด ตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0

First Swarm:

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

Second Swarm:

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

ตารางที่ 5.4 ตารางตำแหน่งของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.5 ตารางตำแหน่งของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

ขั้นตอนที่ 2 ทำการแปลงสตริงคำตอบเริ่มต้นไปเป็นลำดับงานเพื่อนำไปจัดลงสถานีงาน โดยสร้างให้ครบทุกอนุภาคในแต่ละฝูง โดยพิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหน้างาน (Forward Work) และตำแหน่งข้างหลังงาน (Backward Work) ก่อนโดยไม่ผิดความสัมพันธ์ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

สตริงคำตอบที่ 1: ลำดับงานที่ 1

1. ทำการเลือกงานจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ในตารางที่ 5.2 และความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ในตารางที่ 5.3 ที่มีผลรวมของคอลัมน์เท่ากับ 0 พบว่าขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้าในตารางที่ 5.2 คือขั้นงานที่ 1 และในตารางที่ 5.3 คืองานที่ 11 เป็นขั้นงานทีสามารถเลือกได้

2. ขั้นงานที่สามารถเลือกลงลำดับงานที่ 1 ได้คือขั้นงานที่ 1 และ 11 พิจารณาจากสตริงคำตอบเริ่มต้นในการเลือกงานจากสตริงคำตอบที่ 1 ตามตำแหน่งของงานที่สามารถเลือกได้ งานที่ถูกสุ่มเลือกงานจากตาราง Sigmoid นำมาจัดลงลำดับขั้นงานก่อน โดยในที่นี้สุ่มได้ขั้นงานที่ 1

3. ปรับปรุงตารางของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) โดยทำการเปลี่ยนเป็น 0 ในแถวที่ 1 ทั้งแถว และให้คอลัมน์ที่ 1 เป็น 1 ทั้งหมด ส่วนในตารางความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ทำการเปลี่ยนให้คอลัมน์ที่ 1 เป็น 1 ทั้งหมดและในแถวที่ 1 ให้เปลี่ยนเป็น 0 ทั้งแถว

ตารางที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ทำการปรับปรุงครั้งที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
2	***1***	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	***1***	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	***1***	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ทำการปรับปรุงครั้งที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
2	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	***1***	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	***1***	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	***1***	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	***1***	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	***1***	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0

4. จะได้สตริงคำตอบที่ 1 ในลำดับงานที่ 1 คือ 1

สตริงคำตอบที่ 1: ลำดับงานที่ 2

1. ทำการเลือกงานจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ที่ทำการปรับปรุงครั้งที่ 1 ในตารางที่ 5.6 และความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ในตารางที่ 5.7 ที่มีผลรวมของคอลัมน์เท่ากับ 0 พบว่าขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้าในตารางที่ 5.6 คือขั้นงานที่ 2, 3, 4, 5 และในตารางที่ 5.7 คืองานที่ 11 เป็นขั้นงานทีสามารถเลือกได้

2. ขั้นงานที่สามารถเลือกลงลำดับงานที่ 2 ได้คือขั้นงานที่ 2, 3, 4, 5 และ 11 พิจารณาจากสตริงคำตอบเริ่มต้นในการเลือกงานจากสตริงคำตอบที่ 1 ตามตำแหน่งของงานที่สามารถเลือกได้ งานที่ถูกสุ่มเลือกงานจากตาราง Sigmoid นำมาจัดลงลำดับขั้นงานก่อน โดยในที่นี้สุ่มได้ขั้นงานที่ 4

3. ปรับปรุงตารางของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) โดยทำการเปลี่ยนเป็น 0 ในแถวที่ 4 ทั้งแถว และให้คอลัมน์ที่ 4 เป็น 1 ทั้งหมด ส่วนในตารางความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ทำการเปลี่ยนให้คอลัมน์ที่ 4 เป็น 1 ทั้งหมดและในแถวที่ 4 ให้เปลี่ยนเป็น 0 ทั้งแถว

ตารางที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ทำการปรับปรุงครั้งที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	***1***	0	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	***1***	0	0	1	0	0	0	0
4	***0***	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
5	1	0	0	***1***	0	0	1	0	0	0	0
6	1	0	0	***1***	0	0	0	1	0	0	0
7	1	0	0	***1***	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	1	0
9	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	1
10	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	1
11	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back) ทำการปรับปรุงครั้งที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
4	***0***	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
5	1	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	1	***1***	1	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	***1***	0	1	0	0	0	0	0
9	1	0	0	***1***	0	0	1	0	0	0	0
10	1	0	0	***1***	0	0	0	1	0	0	0
11	1	0	0	***1***	0	0	0	0	1	1	0

4. จะได้สตริงคำตอบที่ 1 ในลำดับงานที่ 2 คือ 1, 4

ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งงานทุกงานถูกกำหนดลงในสตริงคำตอบของลำดับขั้นงานโดยสามารถสรุปเป็นตารางการคัดเลือกของลำดับขั้นงานที่ 1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.10 การคัดเลือกลำดับขั้นงานในสตริงที่ 1

No	ลำดับขั้นงานข้างหน้า	ลำดับขั้นงานข้างหลัง	Selected
1	1	11	1
2	2, 3, 4, 5	11	4
3	2, 3, 5	11	3
4	2, 5	11	5
5	2, 7	11	7
6	2, 9	11	9
7	2	11	2
8	6	11	6
9	8	11	8
10	10	11	10
11	11	11	11

ทำการหาลำดับขั้นงานในการทำงานโดยใช้วิธีการข้างต้น จะได้สตริงลำดับงานทั้ง 2 ตัว ดังนี้

First Swarm:

Task Sequence 11 = [1 4 3 5 7 9 2 6 8 10 11]

Second Swarm:

Task Sequence 21 = [11 1 5 10 8 2 9 3 6 4 7]

จากลำดับงานที่ 1 จะทำการจัดลงสถานีงาน เพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีรอบเวลาในการทำงาน (Cycle Time) เท่ากับ 6 วิธีการจัดสรรงานลงในสถานีงานนั้นจะต้องพิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถมีสถานีงานแบบขนานได้ จากตารางที่ 5.11 พบว่างานที่ 4 สา่มารถจัดเป็นสถานีงานแบบขนานได้ 1 สถานีเนื่องจากเวลาการทำงานของงานที่ 4 มีเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ซึ่งเกินรอบเวลาการทำงานที่กำหนด (Cycle Time) จึงทำการเพิ่มสถานีงานอีก 1 สถานี (สถานีงานแบบขนาน) เมื่อสถานีงานนั้นมีงานที่ 4 ทำงานอยู่ในสถานี (ในที่นี้จะกำหนดให้สถานีการทำงานไม่เกิน 2 สถานีงานเมื่อรวมกับสถานีงานที่เป็นแบบขนาน) และจะมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 12 โดยจะทำการจัดสรรสถานีงานได้ดังนี้

ตารางที่ 5.11 การคัดเลือกลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1

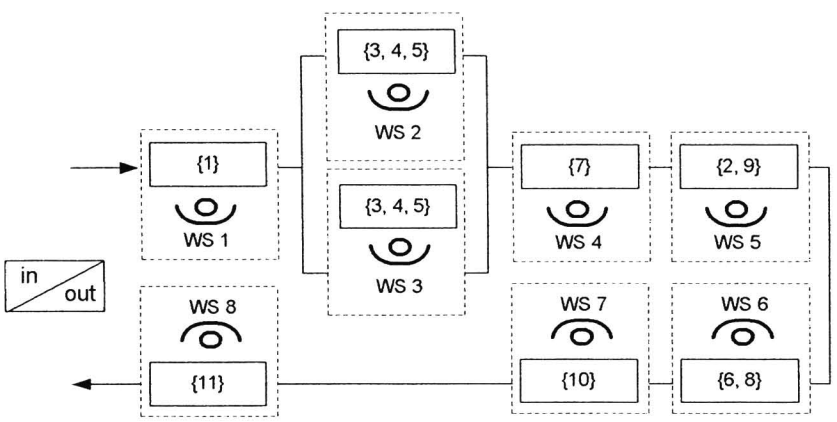
ขั้นงาน	เวลางานเฉลี่ย	เวลาเริ่มการทำงาน	เวลารวม	สถานีงานที่	Cycle Time
1	6	0	6	1	6
4*	7	0	7	2	12
3	3.3333	7	10.3333	2	
5	1	10.3333	11.3333	2	
7	3	11.3333	14.3333	เกินเวลา	
7	3	0	3	3	6
9	3.3333	3	6.3333	เกินเวลา	
9	3.3333	0	3.3333	4	6
2	2	3.3333	5.3333	4	
6	1.3333	5.3333	6.6666	เกินเวลา	
6	1.3333	0	1.3333	5	6
8	4	1.3333	5.3333	5	
10	3.3333	5.3333	8.3333	เกินเวลา	

ตารางที่ 5.11 การคัดเลือกลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลางานเฉลี่ย	เวลาเริ่มการทำงาน	เวลารวม	สถานีงานที่	Cycle Time
10	3.3333	0	3.3333	6	6
11	4	3.3333	7.3333	เกินเวลา	
11	4	0	4	7	6

**เนื่องจากงานที่ 4 สามารถมีสถานีงานขนานได้ 1 สถานีงาน Cycle Time จะเท่ากับ 12*

จากตารางที่ 5.11 จะได้สถานีงานทั้งหมด 8 สถานีงาน (มี 1 สถานีงานเป็นสถานีขนาน) ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 สายการประกอบตัวยูที่มีสถานีงานขนานของสตริงคำตอบที่ 1

เมื่อจัดขั้นงานลงสถานีงาน จึงทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าวัตถุประสงค์ทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนสถานีงานมีจำนวนน้อยที่สุด ความสมดุลระหว่างสถานีงานและความสมดุลภายในสถานีงาน ดังนี้

กำหนดให้

LL คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด (รวมสถานีงานขนานด้วย)

M คือ จำนวนผลิตภัณฑ์

D_m คือ ความต้องการของผลิตภัณฑ์ m

q_m คือ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ m ในสายการประกอบ

$$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^{M} D_m} \quad ;0 \le q_m \le 1 \ and \ \sum_{m=1}^{M} q_m = 1$$

s_{km} คือ เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ m ในสถานีงาน k

IT คือ เวลาว่างงานเฉลี่ยของสายการประกอบ $IT = \sum_{k=1}^{LL}\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}$

S_{km} คือ สัดส่วนของเวลาว่างงานในสถานีงาน k ในผลิตภัณฑ์ m

$$S_{km} = \begin{cases} 0 & if \sum_{m=1}^{M} q_m s_{km} \\ \dfrac{q_m s_{km}}{\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}}, & ortherwise \end{cases}$$

1. จำนวนสถานีงานน้อยที่สุดน้อยที่สุด

$$f_1(X) = Minimum\ N_w \tag{5.4}$$

2. ความสมดุลระหว่างสถานีงาน

$$f_2(X) = Minimum\ B_b = \frac{LL}{LL-1}\sum_{k=1}^{LL}\left[\frac{\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}}{IT} - \frac{1}{LL}\right]^2 \tag{5.5}$$

3. ความสมดุลภายในสถานีงาน

$$f_3(X) = Minimum\ B_w = \frac{M}{LL(M-1)}\sum_{k=1}^{LL}\sum_{m=1}^{M}\left(S_{km} - \frac{1}{M}\right)^2 \tag{5.6}$$

สตริงคำตอบที่ 1 จะมีสถานีงานทั้งหมดเท่ากับ 8

$$f_1(X) = Minimum\ N_w = 8$$

ความสมดุลระหว่างสถานีงานในวัตถุประสงค์ที่ 2 มีวิธีการคำนวณดังนี้

ค่า LL จะมีค่าเท่ากับ $N_w = 8$

กำหนดให้ค่า D_m มีค่าเท่ากับ $D_A = 1,\ D_B = 1,\ D_C = 1$

ค่า q_m มีวิธีการคำนวณดังนี้

ผลิตภัณฑ์ A $\quad q_A = \dfrac{1}{(1+1+1)} = 0.3333$

ผลิตภัณฑ์ B $\quad q_B = \dfrac{1}{(1+1+1)} = 0.3333$

ผลิตภัณฑ์ C $\quad q_C = \dfrac{1}{(1+1+1)} = 0.3333$

ค่า s_{km} เป็นการหาเวลาว่างงานในสถานีงานแต่ละผลิตภัณฑ์สามารถหาได้ดังนี้

ตารางที่ 5.12 ตารางการหาค่า s_{km}

สถานีงาน	งาน	Cycle Time	s_{km}			$q_m s_{km}$			$\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}$
			A	B	C	A	B	C	
1	1	6	0	0	0	0	0	0	0
2	3, 4, 5	12	0	0	4	0	0	1.3332	1.3332
3	7	6	3	3	3	0.9999	0.9999	0.9999	2.9997
4	2, 9	6	0	4	0	0	1.3332	0	1.3332
5	6, 8	6	0	0	4	0	0	1.3332	1.3332
6	10	6	1	1	0	0.3333	0.3333	0	0.6666
7	11	6	2	2	2	0.6666	0.6666	0.6666	1.9998

ค่า $IT = \sum_{k=1}^{LL} \sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}$

$$= [0 + 1.3332 + 2.9997 + 1.3332 + 1.3332 + 0.6666 + 1.9998] = 9.6657$$

ค่า $\left[\frac{\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}}{IT} - \frac{1}{LL} \right]^2$ ทุกสถานีงาน

สถานีงานที่ 1 : $\left[\frac{0}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0156$

สถานีงานที่ 2 : $\left[\frac{1.3332}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0002$

สถานีงานที่ 3 : $\left[\frac{2.9997}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0344$

สถานีงานที่ 4 : $\left[\frac{1.3332}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0002$

สถานีงานที่ 5 : $\left[\frac{1.3332}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0002$

สถานีงานที่ 6 : $\left[\frac{0.6666}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0031$

สถานีงานที่ 7 : $\left[\frac{1.9998}{9.6657} - \frac{1}{8} \right]^2 = 0.0067$

ดังนั้น $$\sum_{k=1}^{LL}\left[\frac{\sum_{m=1}^{M} q_m s_{km}}{IT}-\frac{1}{LL}\right]^2 = 0.0603$$

ดังนั้นค่าวัตถุประสงค์ที่ 2 จะมีค่าเท่ากับ

$$B_b = \frac{8}{8-1}\times 0.0603 = 0.0689$$

$$f_2(X) = Minimum\ B_b = 0.0689$$

ความสมดุลภายในสถานีงานในวัตถุประสงค์ที่ 3 มีวิธีการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 5.13 ตารางการคำนวณค่า B_w

สถานีงาน	งาน	$\left(S_{km}-\frac{1}{M}\right)^2$			Total
		A	B	C	
1	1	0.1111	0.1111	0.1111	0.3333
2	3, 4, 5	0.1111	0.1111	0.4444	0.6667
3	7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	2, 9	0.1111	0.4444	0.1111	0.6667
5	6, 8	0.1111	0.1111	0.4444	0.6667
6	10	0.0278	0.0278	0.1111	0.1667
7	11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ดังนั้นค่าวัตถุประสงค์ที่ 3 จะมีค่าเท่ากับ

$$B_w = \frac{3}{9(3-1)}\times(0.3333+0.6667+0+0.6667+0.6667+1.6667+0)$$

$$f_3(X) = Minimum\ B_w = 0.4688$$

จากสตริงลำดับงานที่ 1 จะได้

1. Task Sequence 1 = [1 4 3 5 7 9 2 6 8 10 11]

2. มีจำนวนสถานีงานทั้งหมด 8 สถานีงาน (รวม 1 สถานีงานขนาน) มีลำดับงานขั้นในแต่ละสถานี และเวลาการทำงานดังนี้

ตารางที่ 5.14 สถานีงานในสตริงคำตอบที่ 1

สถานีงาน	งานในสถานี	เวลาในการทำงานในสถานี
1	1	4
2 (มีสถานีงานขนาน)	3, 4, 5	11.3333
3	7	3
4	2, 9	5.3333
5	6, 8	5.3333
6	10	3.3333
7	11	4

3. ความสมดุลระหว่างสถานีงานมีค่าเท่ากับ 0.0689

4. ความสมดุลภายในสถานีงานมีค่าเท่ากับ 0.4688

วัตถุประสงค์ของลำดับขั้นงานที่ได้จากสตริงคำตอบทั้ง 2 ตัวมีดังนี้

ตารางที่ 5.15 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	1	8	0.0689	0.4688
2	1	8	0.0717	0.4668

5.4.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบจะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ในขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดี (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่า Dummy Fitness ซึ่งมีการประเมินค่าดังนี้

5.4.4.1 การคัดเลือก Local Best Solution

ทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในแต่ละฝูง โดยพิจารณาจาก Front ของคำตอบที่ได้จำ Non-Dominated Sorting

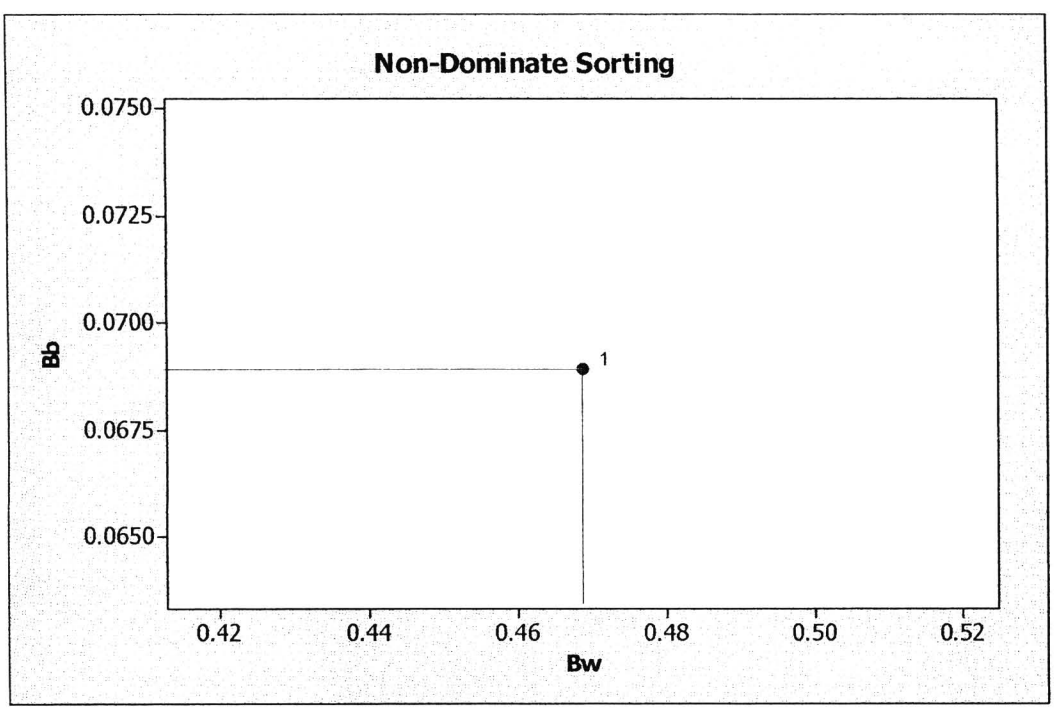
1. Local Best Solution **ฝูงที่** 1 ซึ่งมีการคัดเลือกค่าดังนี้

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เท่ากันจึงไม่ทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.4 และตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ค่าวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ในฝูงที่ 1

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	8	0.0689	0.4688



รูปที่ 5.4 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1

ตารางที่ 5.17 Non-Dominated Sorting ของ Local ในฝูงที่ 1

สตริงคำตอบที่	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
1	0.0689	0.4688	1	Infinity	Lbest

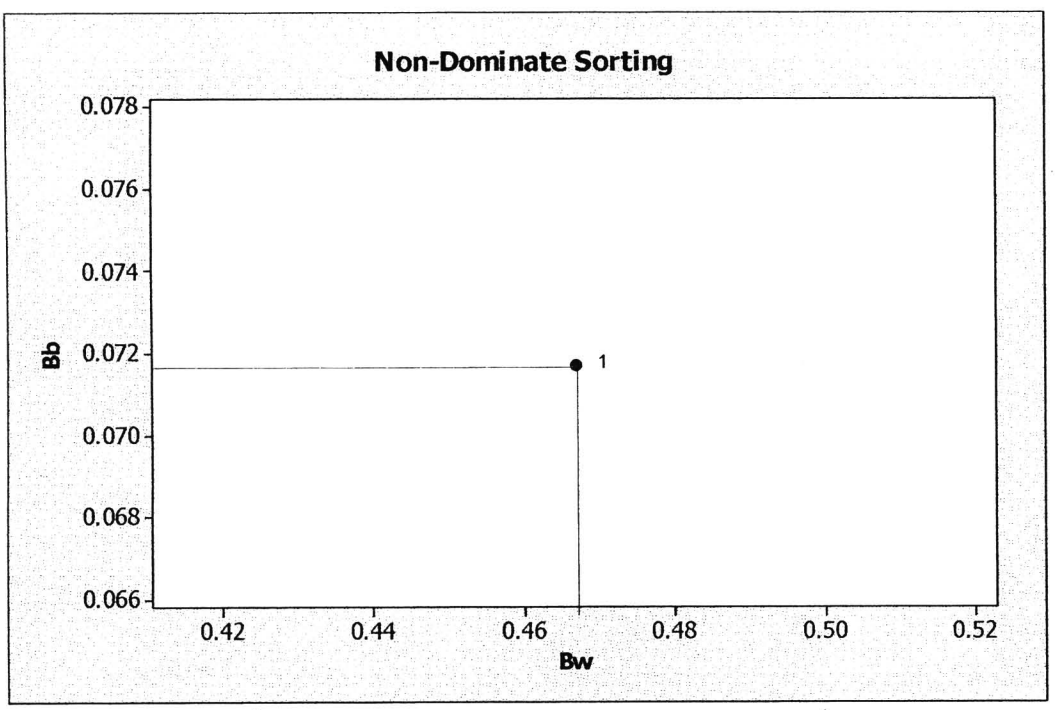
2. Local Best Solution **ฝูงที่** 2 ซึ่งมีการคัดเลือกค่าดังนี้

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เท่ากันจึงไม่ทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.5 และตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.18 ค่าวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ในฝูงที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	8	0.0717	0.4668



รูปที่ 5.5 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2

ตารางที่ 5.19 Non-Dominated Sorting ของ Local ในฝูงที่ 2

สตริงคำตอบที่	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
1	0.0717	0.4668	1	Infinity	Lbest

5.4.4.2 การคัดเลือก Global Best Solution

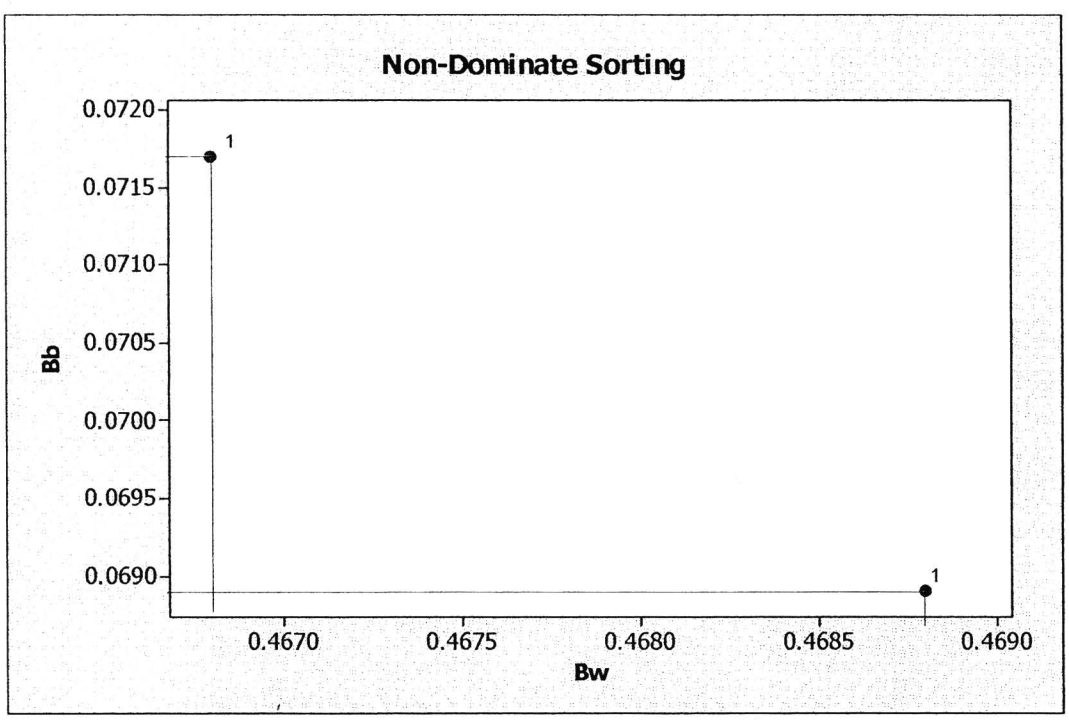
ทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Gbest) จากประชากรทั้งหมด โดยพิจารณาจาก Front ของคำตอบที่ได้จาก Non-Dominated Sorting

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบเท่ากันจึงไม่ทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.20 ค่าวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	1	8	0.0689	0.4688
2	1	8	0.0717	0.4668



รูปที่ 5.6 ค่า Dummy Fitness ของประชากรทั้งหมด

ตารางที่ 5.21 Non-Dominated Sorting ของ Global

ฝูงที่	สตริง คำตอบที่	ความสมดุล ระหว่างสถานีงาน	ความสมดุล ภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
1	1	0.0689	0.4688	1	Infinity	Gbest
2	1	0.0717	0.4668	2	Infinity	-

5.4.4.3 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ได้จากการหาค่า Global Best Solution ของประชากรทั้งหมด โดยจะทำการเก็บค่าไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

สตริงคำตอบของฝูงใน Local Best ในฝูงที่ 1

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

สตริงคำตอบของฝูงใน Local Best ในฝูงที่ 2

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

สตริงคำตอบที่ดีที่สุด Global Best ของประชากร

(ฝูงที่ 1) String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

5.4.5 การปรับปรุงตาราง

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จะใช้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Gbest) ในการปรับปรุงดังนี้

5.4.5.1 การปรับปรุงในฝูงที่ 1

5.4.5.1.1 ตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางเมทริกซ์ Velocity จากสมการ (5.1) ในแต่ละฝูง โดยใช้สตริงคำตอบที่ได้จากค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในฝูงที่ 1 และค่าที่ดีที่สุด (Gbest) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรกจะทำการคูณเมทริกซ์ Velocity โดยเมทริกซ์ Velocity นี้จะมีค่าเริ่มต้นเป็นเมทริกซ์ 0 กับค่า w น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight) ในที่นี้เรากำหนดค่าเท่ากับ 1 จะได้เป็นเมทริกซ์ 11×11 ในฝูงที่ 1

ตารางที่ 5.22 ตารางตำแหน่งของสตริงคำตอบในขั้นที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1. Local Best Solution ฝูงที่ 1

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

ขั้นที่สองนำเมทริกซ์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Local Best) ในฝูงที่ 1 ลบด้วยเมทริกซ์ของสตริงคำตอบที่ 1 ในฝูงที่ 1 แล้วนำไปคูณกับ c_1 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.1 กับ r_1 มีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 5.23 ตารางตำแหน่งของสตริงคำตอบในขั้นที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. Global Best Solution

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

ขั้นที่สามนำเมทริกซ์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Global Best) ลบด้วยเมทริกซ์ของสตริงคำตอบที่ 1 ในฝูงที่ 1 แล้วนำไปคูณกับ c_2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0.1 กับ r_2 มีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 5.24 ตารางตำแหน่งของสตริงคำตอบในขั้นที่ 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ขั้นสุดท้ายทำการรวมขั้นที่ 1 ถึงขั้นที่ 3 จะได้เมทริกซ์ Velocity ในฝูงที่ 1 ตามสมการที่ (5.1) ดังนี้

ตารางที่ 5.25 ตาราง Velocity Matrix ในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.4.5.1.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 5.26 ตารางตำแหน่งของสตริงคำตอบก่อนหน้าในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.27 ความน่าจะเป็นในตาราง Velocity Matrix ในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.28 ตารางตำแหน่งอนุภาคในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.4.5.1.3 ตาราง Sigmoid ในจัดตำแหน่ง

โดยการใช้ Sigmoid Function เป็นการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่ได้จากตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.29 ตาราง Sigmoid ในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
2	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
7	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
9	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

5.4.5.2 การปรับปรุงในฝูงที่ 2

5.4.5.2.1 ตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางเมทริกซ์ Velocity จากสมการ (5.1) ในแต่ละฝูงที่ 2 โดยใช้สตริงคำตอบที่ได้จากค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในฝูงที่ 2 และค่าที่ดีที่สุด (Gbest) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. Local Best Solution ฝูงที่ 2

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

2. Global Best Solution

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

ตารางที่ 5.30 ตาราง Velocity Matrix ในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	-0.1	0	0	0	0.1
2	0	0	0	-0.1	0	0	0	0	0	0.1	0
3	0	0	0	0	0	-0.1	0	0.1	0	0	0
4	0	0	-0.1	0	0	0.1	0	0	0	0	0
5	0	0.1	0	0	0	0	0	0	-0.1	0	0
6	0	-0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.1	-0.1	0	0	0
8	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	-0.1	0
9	0	0	0.1	0	-0.1	0	0	0	0	0	0
10	-0.1	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0
11	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1

5.4.5.2.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 5.31 ตารางตำแหน่งอนุภาคในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0.1
2	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0.1	0
3	0	0	0	0	0	0.9	0	0.1	0	0	0
4	0	0	0.9	0	0	0.1	0	0	0	0	0
5	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0
6	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.1	0.9	0	0	0
8	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.9	0
9	0	0	0.1	0	0.9	0	0	0	0	0	0
10	0.9	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0
11	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9

5.4.5.2.3 ตาราง Sigmoid ในจัดตำแหน่ง

โดยการใช้ Sigmoid Function เป็นการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่ได้จากตาราง ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.32 ตาราง Sigmoid ในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.4502	0.5250
2	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5250	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4750	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502
5	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4750	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000
7	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5250	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000
9	0.5000	0.5000	0.4750	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.5250	0.4502	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.4750	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250

5.4.6 สตริงคำตอบเบื้องต้นในรอบที่ 2

เริ่มจากการสร้างสตริงคำตอบ โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 1 และตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 2 ที่ได้จากรอบก่อนหน้า โดยสร้างให้ครบทุกอนุภาคในแต่ละฝูง ซึ่งสตริงคำตอบที่ได้จะต้องไม่ขัดกับความสัมพันธ์ก่อน-หลังของภาระงาน

จะได้สตริงคำตอบทั้งหมด 6 สตริงคำตอบ ดังนี้

First Swarm:

String 1 = [11 10 8 6 9 7 5 3 4 2 1]

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

String 3 = [11 2 3 9 1 4 7 5 8 6 10]

Second Swarm:

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

String 2 = [9 8 5 7 6 4 1 3 10 2 11]

String 3 = [11 7 10 6 9 4 5 3 2 1 8]

เมื่อจัดขั้นงานโดยที่ไม่ผิดความสัมพันธ์งานจะได้ลำดับขั้นงานดังนี้

First Swarm:

Task Sequence 1 = [1 2 5 3 6 4 7 9 8 10 11]

Task Sequence 2 = [11 10 8 9 6 7 5 4 1 2 3]

Task Sequence 3 = [1 11 4 9 7 10 8 6 3 2 5]

Second Swarm:

Task Sequence 1 = [11 1 5 10 8 2 9 3 6 4 7]

Task Sequence 2 = [11 9 1 2 4 5 3 6 8 10 7]

Task Sequence 3 = [1 3 5 11 2 4 7 6 8 9 10]

ทำการจัดลงสถานีงาน เพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีรอบเวลาในการทำงาน (Cycle Time) เท่ากับ 6 วิธีการจัดสรรงานลงในสถานีงานนั้นจะต้องพิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถมีสถานีงานแบบขนานได้ จากตารางที่ 5.11 พบว่างานที่ 4 สามารถจัดเป็นสถานีงานแบบขนานได้ 1 สถานีเนื่องจากเวลาการทำงานของงานที่ 4 มีเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ซึ่งเกินรอบเวลาการทำงานที่กำหนด (Cycle Time) จึงทำการเพิ่มสถานีงานอีก 1 สถานี (สถานีงานแบบขนาน) เมื่อสถานีงานนั้นมีงานที่ 4 ทำงานอยู่ในสถานี (ในที่นี้จะกำหนดให้สถานีการทำงานไม่เกิน 2 สถานีงานเมื่อรวมกับสถานีงานที่เป็นแบบขนาน) และจะมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 12 โดยจะทำการจัดสรรสถานีงานได้ดังนี้

ตารางที่ 5.33 การคัดเลือกลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1

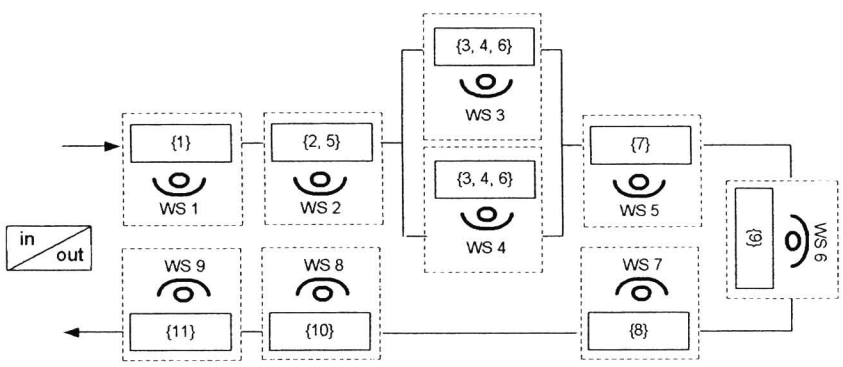
ขั้นงาน	เวลางานเฉลี่ย	เวลาเริ่มการทำงาน	เวลารวม	สถานีงานที่	Cycle Time
1	6	0	6	1	6
2	2	0	2	2	6
5	1	2	3	2	
3	3.3333	3	6.3333	เกินเวลา	
3	3.3333	0	3.3333	3	12
6	1.3333	3.3333	4.6666	3	
4*	7	4.6666	11.6666	3	
7	3	11.6666	14.6666	เกินเวลา	
7	3	0	3	4	6
9	3.3333	3	6.3333	เกินเวลา	

ตารางที่ 5.33 การคัดเลือกลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลางานเฉลี่ย	เวลาเริ่มการทำงาน	เวลารวม	สถานีงานที่	Cycle Time
9	3.3333	0	3.3333	5	6
8	4	3.3333	7.3333	เกินเวลา	
8	4	0	4	6	6
10	3.3333	4	7.3333	เกินเวลา	
10	3.3333	0	3.3333	7	6
11	4	3.3333	7.3333	เกินเวลา	
11	4	0	4	8	6

**เนื่องจากงานที่ 4 สามารถมีสถานีงานขนานได้ 1 สถานีงาน Cycle Time จะเท่ากับ 12*

จากตารางที่ 5.33 จะได้สถานีงานทั้งหมด 8 สถานีงาน (มี 1 สถานีงานเป็นสถานีขนาน) ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 สายการประกอบตัวยูที่มีสถานีงานขนานของสตริงคำตอบที่ 1

ทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าวัตถุประสงค์ทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนสถานีงานมีจำนวนน้อยที่สุด ความสมดุลระหว่างสถานีงาน และความสมดุลภายในสถานีงาน ดังตาราง 5.34

ตารางที่ 5.34 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	1	9	0.1128	0.2778
	2	8	0.0964	0.3463
	3	9	0.1237	0.3333
2	1	8	0.0717	0.4688
	2	9	0.0936	0.2244
	3	8	0.1888	0.5000

5.4.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบจะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ในขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดี (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่า Dummy Fitness ซึ่งมีการประเมินค่าดังนี้

5.4.7.1 การคัดเลือก Local Best Solution

ทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในแต่ละฝูง โดยพิจารณาจาก Front ของคำตอบที่ได้จำ Non-Dominated Sorting

1. Local Best Solution ฝูงที่ 1 ซึ่งมีการคัดเลือกค่าดังนี้

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ไม่เท่ากันจึงทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้ก่อน

ตารางที่ 5.35 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ในฝูงที่ 1

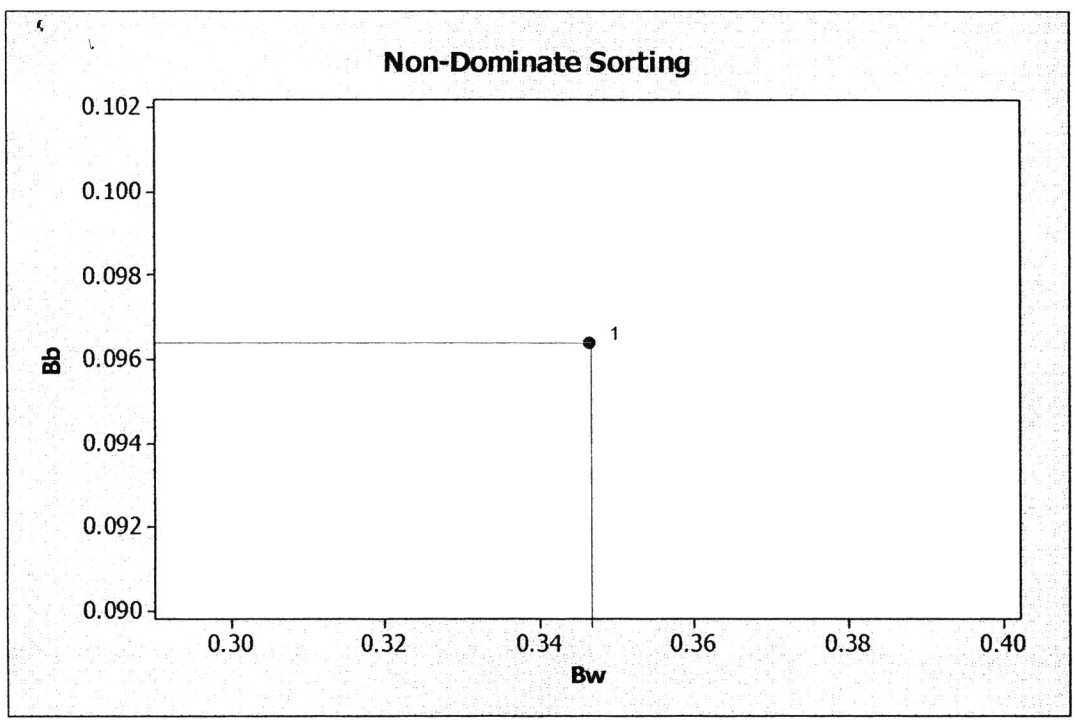
สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	9	0.1128	0.2778
2	8	0.0964	0.3463
3	9	0.1237	0.3333

ทำการคัดเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดเพื่อทำการหา Local Best Solution

ตารางที่ 5.36 จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดในฝูงที่ 1

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
2	8	0.0964	0.3463

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.37



รูปที่ 5.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1

ตารางที่ 5.37 Non-Dominated Sorting ของ Local ในฝูงที่ 1

สตริงคำตอบที่	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
2	0.0964	0.3463	1	Infinity	Lbest

2. Local Best Solution **ฝูงที่ 2** ซึ่งมีการคัดเลือกค่าดังนี้

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 ไม่เท่ากันจึงการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้ก่อน

ตารางที่ 5.38 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ในฝูงที่ 2

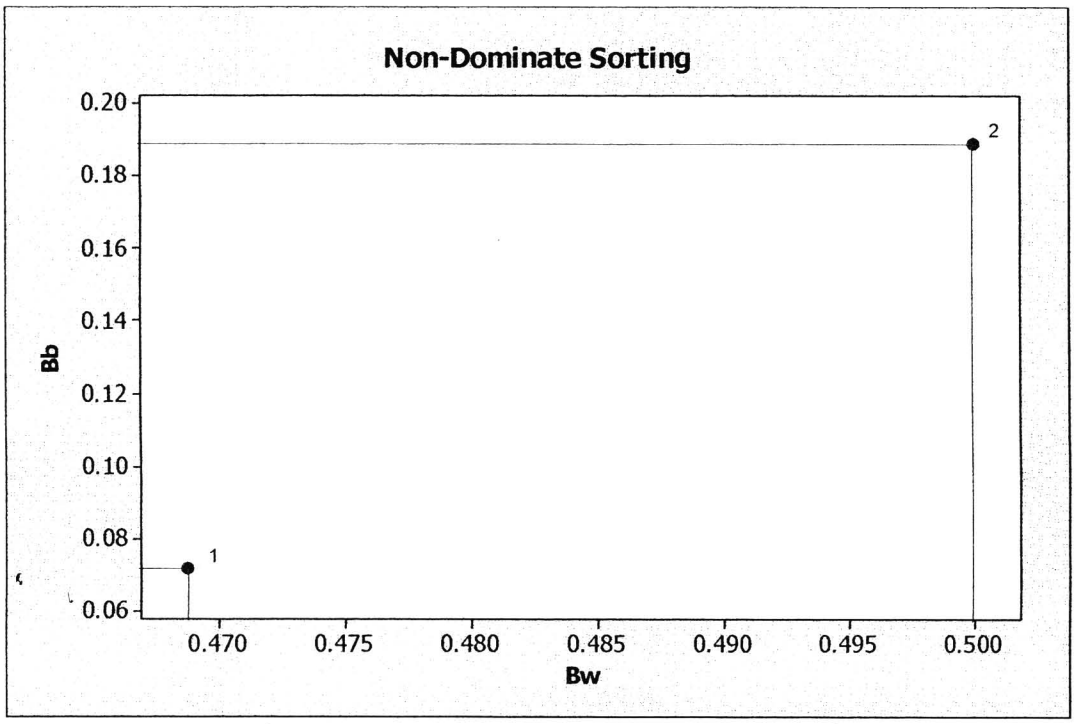
สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	8	0.0717	0.4688
2	9	0.0936	0.2244
3	8	0.1888	0.5000

ทำการคัดเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดเพื่อทำการหา Local Best Solution

ตารางที่ 5.39 จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดในฝูงที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	8	0.0717	0.4688
3	8	0.1888	0.5000

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.9 และตารางที่ 5.40



รูปที่ 5.9 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2

ตารางที่ 5.40 Non-Dominated Sorting ของ Local ในฝูงที่ 2

สตริง คำตอบที่	ความสมดุล ระหว่างสถานีงาน	ความสมดุล ภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
1	0.0717	0.4688	1	Infinity	Lbest
3	0.1888	0.5000	2	Infinity	-

5.4.7.2 การคัดเลือก Global Best Solution

ทำการหาค่าที่ดีที่สุด (Gbest) จากประชากรทั้งหมด โดยพิจารณาจาก Front ของคำตอบที่ได้จาก Non-Dominated Sorting

ขั้นที่ 1 จำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบของประชากรทั้งหมดไม่เท่ากันจึงทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้ก่อน

ตารางที่ 5.41 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์

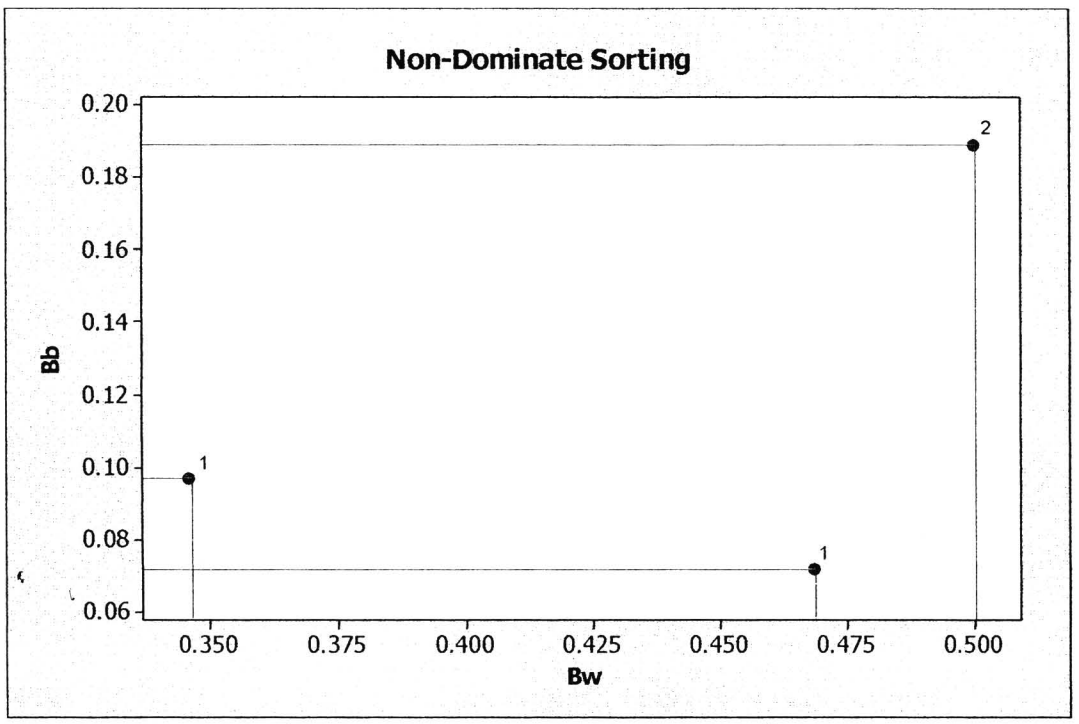
ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	1	9	0.1128	0.2778
	2	8	0.0964	0.3463
	3	9	0.1237	0.3333
2	1	8	0.0717	0.4688
	2	9	0.0936	0.2244
	3	8	0.1888	0.5000

ทำการคัดเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดเพื่อทำการหา Local Best Solution

ตารางที่ 5.42 จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดจากประชากรทั้งหมด

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน
1	2	8	0.0964	0.3463
2	1	8	0.0717	0.4688
	3	8	0.1888	0.5000

ขั้นที่ 2 พิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้กับสตริงคำตอบที่ได้ทำการเลือกจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าดังรูปที่ 5.10 และตารางที่ 5.43



รูปที่ 5.10 ค่า Dummy Fitness ของประชากรทั้งหมด

ตารางที่ 5.43 Non-Dominated Sorting ของ Global

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ความสมดุลระหว่างสถานีงาน	ความสมดุลภายในสถานีงาน	Front	Crowding Distance	Local
2	1	0.0717	0.4688	1	Infinity	Gbest
1	2	0.0964	0.3463	1	Infinity	Gbest
2	3	0.1888	0.5000	2	Infinity	-

5.4.7.3 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ได้จากการหาค่า Global Best Solution ของประชากรทั้งหมด โดยจะทำการเก็บค่าไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

สตริงคำตอบของฝูงใน Local Best ในฝูงที่ 1

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

สตริงคำตอบของฝูงใน Local Best ในฝูงที่ 2

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

สตริงคำตอบที่ดีที่สุด Global Best ของประชากรทั้งหมด

(ฝูงที่ 2) String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

(ฝูงที่ 1) String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

ดังนั้นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บได้ทั้งสองรอบที่ผ่านมาคือ

สตริงคำตอบที่ดีที่สุด Global Best ของประชากรทั้งหมดในรอบที่ 1

String 1 = [11 5 9 10 8 4 7 3 6 2 1]

สตริงคำตอบที่ดีที่สุด Global Best ของประชากรทั้งหมดในรอบที่ 2

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

5.4.8 การปรับปรุงตาราง

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จะใช้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Gbest) ในการปรับปรุงดังนี้

5.4.8.1 การปรับปรุงในฝูงที่ 1

5.4.8.1.1 การปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางเมทริกซ์ Velocity จากสมการ (5.1) โดยใช้สตริงคำตอบที่ได้จากค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในฝูงที่ 1 และค่าที่ดีที่สุด (Gbest)

1. Local Best Solution ฝูงที่ 1

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

2. Global Best Solution

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

ตารางที่ 5.44 ตาราง Velocity Matrix ในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0	-0.2
2	0	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	-0.2	0
3	0.1	0	0	0	0	0.1	0	-0.2	0	0	0
4	0	0	0.1	0.1	0	-0.2	0	0	0	0	0
5	0	-0.2	0	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0
6	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	-0.2	0	0
7	0	0	0	0	0	0.1	-0.2	0.1	0	0	0
8	0	0	0	0	-0.2	0	0	0	0.1	0.1	0
9	0	0	-0.2	0	0.1	0	0	0.1	0	0	0
10	0.1	0	0	-0.2	0	0	0	0	0	0.1	0
11	-0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2

5.4.8.1.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 5.45 ตารางตำแหน่งอนุภาคในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.4.8.1.3 การปรับปรุงตาราง Sigmoid ในจัดตำแหน่ง

โดยการใช้ Sigmoid Function เป็นการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่ได้จากตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.46 ตาราง Sigmoid ในฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502
2	0.5000	0.5250	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000
3	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5250	0.5250	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000
7	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.4502	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5250	0.5000
9	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.5250	0.5000	0.5000	0.4502	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5250	0.5000
11	0.4502	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5498

5.4.8.2 การปรับปรุงในฝูงที่ 2

5.4.8.2.1 การปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางเมทริกซ์ Velocity จากสมการ (5.1) โดยใช้สตริงคำตอบที่ได้จากค่าที่ดีที่สุด (Lbest) ในฝูงที่ 2 และค่าที่ดีที่สุด (Gbest)

1. Local Best Solution ฝูงที่ 2

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

2. Global Best Solution

String 1 = [10 6 4 2 9 3 1 7 5 8 11]

String 2 = [3 2 1 4 5 7 6 9 8 10 11]

ตารางที่ 5.47 ตาราง Velocity Matrix ในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	-0.06	0	0	0	0.06
2	0	0	0	-0.06	0	0	0	0	0	0.06	0
3	0	0	0	0	0	-0.06	0	0.06	0	0	0
4	0	0	-0.06	0	0	0.06	0	0	0	0	0
5	0	0.06	0	0	0	0	0	0	-0.06	0	0
6	0	-0.06	0	0	0	0	0	0	0.06	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.06	-0.06	0	0	0
8	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	-0.06	0
9	0	0	0.06	0	-0.06	0	0	0	0	0	0
10	-0.06	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0
11	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.06

5.4.8.2.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 5.48 ตารางตำแหน่งอนุภาคในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0.2
2	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0.2	0
3	0	0	0	0	0	0.8	0	0.2	0	0	0
4	0	0	0.8	0	0	0.2	0	0	0	0	0
5	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0
6	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	0	0	0
8	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0.8	0
9	0	0	0.2	0	0.8	0	0	0	0	0	0
10	0.8	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0
11	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8

5.4.8.2.3 การปรับปรุงตาราง Sigmoid ในจัดตำแหน่ง

โดยการใช้ Sigmoid Function เป็นการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่ได้จากตาราง ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.3)

ตารางที่ 5.49 ตาราง Sigmoid ในฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000	0.5000	0.5150
2	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000
7	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5150	0.4850	0.5000	0.5000	0.5000
8	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850	0.5000
9	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000	0.4850	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
10	0.4850	0.5000	0.5000	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
11	0.5150	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4850

5.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

5.5.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนคำตอบหรือสตริงคำตอบทั้งหมดที่มีอยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน เช่นถ้ากำหนดให้จำนวนประชากรมีขนาด 100 ประชากร หมายความว่าในแต่ละเจนเนอเรชันจะมีคำตอบหรือสตริงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด 100 คำตอบ ซึ่งต้องเป็นคำตอบที่ไม่เหมือนกัน เพื่อต้องการให้ได้คำตอบหรือสตริงคำตอบที่หลากหลาย ในงานวิจัยนี้ (Hwang and Katayama, 2008) ได้กำหนดจำนวนประชากรในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร ดังนั้นจึงกำหนดให้เป็นจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลอง

5.5.2 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธี Non-dominated Sorting เป็นการหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตามหลักของ Goldberg (1989) วิธีนี้จะทำให้สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จากการจัดอันดับคำตอบที่มีค่าน้อยที่สุดจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

5.5.3 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง

จำนวนอนุภาคเป็นจำนวนกลุ่มของอนุภาคหรือกลุ่มของสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นในแต่ละรอบการทำงาน ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

5.5.4 จำนวนฝูง

จำนวนฝูงเป็นจำนวนอนุภาคหรือสตริงคำตอบที่มีในแต่ละฝูง ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

5.5.5 น้ำหนักการหน่วง

น้ำหนักการหน่วงที่ใช้จะกำหนดค่าให้เท่ากับ 1 น้ำหนักการหน่วงจะเป็นการกำหนดค่าของแต่ละฝูงด้วยน้ำหนักที่ได้จากการเคลื่อนที่โดยจะทำการเก็บค่าการเคลื่อนที่ที่ได้รับอิทธิพลจากการสำรวจค่าที่ดีที่สุด

5.5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ที่ใช้จะกำหนดค่าให้เท่ากับ 0.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้เป็นปัจจัยที่กำหนดที่มีการเรียนรู้ด้วยตนเองและเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดความสำคัญของในแต่ละฝูง

5.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

5.6.1 การกำหนดข้อมูลที่ต้องการในการทดลอง

การทดลองในแต่ละระดับปัจจัยจะเก็บข้อมูลค่าวัตถุประสงค์ไว้ 3 วัตถุประสงค์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการหาค่าสมรรถนะของแต่ละการทดลองซึ่งในแต่ละการทดลองทำการเก็บข้อมูลจำนวน 2 ครั้งในหนึ่งการทดลอง โดยมีตัวชี้วัดสมรรถนะในการทดลองทั้งหมด 4 ตัวชี้วัด คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการคำนวณจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Computation Time to Solution)

5.6.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในการทดลอง

5.6.2.1 ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

$$Convergence = \frac{1}{|S^*|} \quad : \quad d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left[\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right]^2} \tag{5.7}$$

ซึ่ง S^* คือเซตคำตอบที่แท้จริง, $f_i^{\max}$ และ $f_i^{\min}$ คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์, i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ, d_{xy} เป็นระยะของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y ในเซตคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ และ k คือจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าค่าตัวสมรรถนะชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะถือว่ากลุ่มคำตอบอัลกอริทึมนั้นเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

5.6.2.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1}\left|d_i - \bar{d}\right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \tag{5.8}$$

ซึ่ง d_f และ d_l เป็นระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน d_i เป็นระยะของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน ในเซตคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้, $\bar{d}$ เป็นค่าเฉลี่ยของระยะห่าง, N เป็นจำนวนคำตอบที่หาได้ ถ้าค่าตัวสมรรถนะชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะถือว่ากลุ่มคำตอบอัลกอริทึมนั้นจะมีคำตอบที่มีลักษณะการกระจายที่มีลักษณะสม่ำเสมอตลอดเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

5.6.2.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

$$Ratio = \frac{\left|S_j - \{x \in S_j \mid \exists y \in S : y \prec x\}\right|}{|S_j|} \tag{5.9}$$

ซึ่ง S_j เป็นเซตคำตอบที่ j, S เป็นการรวมกันของ j เซตคำตอบ, x คือคำตอบที่หาได้ในกลุ่มคำตอบที่หาได้ และ y คือคำตอบที่แท้จริงในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ถ้าค่าตัว

สมรรถนะชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึมนั้นจะมีคำตอบที่สามารถเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

5.6.2.4 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการคำนวณจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Computation Time to Solution)

ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการคำนวณจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เป็นตัวชี้วัดด้านเวลาการหาคำตอบ โดยเปรียบเทียบที่จำนวนรอบในการทดลองที่เท่ากัน

5.6.3 การกำหนดรูปแบบการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการทดลอง แบบ Full Factorial Design มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาทั้งหมด 2 ปัจจัยและในแต่ละปัจจัยจะมีระดับปัจจัยไม่เท่ากัน โดยมีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 3 ตัวเป็นตัวแปรตอบสนองในการทดลอง ในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำของการทดลอง (Replication) เท่ากับ 2 ปัญหาการทดลองมีทั้งหมด 5 ปัญหา คือ

1. การทดลองจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานขนาน มีจำนวนขั้นงาน 11 งาน มีจำนวนเจนเนอเรชันเท่ากับ 20 เจนเนอเรชัน
2. การทดลองจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานขนาน มีจำนวนขั้นงาน 25 งาน มีจำนวนเจนเนอเรชันเท่ากับ 100 เจนเนอเรชัน
3. การทดลองจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานขนาน มีจำนวนขั้นงาน 61 งาน มีจำนวนเจนเนอเรชันเท่ากับ 200 เจนเนอเรชัน
4. การทดลองจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานขนาน มีจำนวนขั้นงาน 111 งาน มีจำนวนเจนเนอเรชันเท่ากับ 300 เจนเนอเรชัน
5. การทดลองจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานขนาน มีจำนวนขั้นงาน 205 งาน มีจำนวนเจนเนอเรชันเท่ากับ 500 เจนเนอเรชัน

ตารางที่ 5.50 รายละเอียดของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

จำนวนฝูง	จำนวนอนุภาค	สตริงคำตอบ
4	25	100
5	20	100
10	10	100

ทำการทดสอบหาจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคที่มีมีปัจจัย 1 ปัจจัย 3 ระดับ และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2 ดังนั้นจะมีจำนวนทรีทเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองเท่ากับ 3x2 = 6 การทดลอง โดยมีการกำหนดประชากรเท่ากับ 100 โดยทำการทดลองกับปัญหาที่มีอยู่ทั้งหมด และทดสอบด้วยตัวชี้วัด

5.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองแยกตามขนาดปัญหาที่ใช้ในการทดลองที่มีทั้งหมด 5 ปัญหา โดยจะทำการวิเคราะห์ความตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวคือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการคำนวณจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Computation Time to Solution) โดยจะวิเคราะห์ตามลำดับ

1. การวิเคราะห์ ANOVA เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าปัจจัยใดมีผลต่อการหาคำตอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์คู่ลำดับเป็นการวิเคราะห์เพื่อดูว่าระดับปัจจัยใดมีความแตกต่างกับระดับปัจจัยอื่นๆ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์

5.7.1 ปัญหา 11 ขั้นงาน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยความรู้ในเชิงลบ โดยใช้ตัวแปรตอบสนองการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.03092  0.03092  0.01546  1.17  0.421
Error    3  0.03958  0.03958  0.01319
Total    5  0.07050


S = 0.114862   R-Sq = 43.86%   R-Sq(adj) = 6.44%
```

รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 11 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.11 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในปัญหา 11 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตารางยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวแปรตอบสนองการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for spead, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.01420  0.01420  0.00710  0.64  0.589
Error    3  0.03352  0.03352  0.01117
Total    5  0.04772


S = 0.105698   R-Sq = 29.76%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 11 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Spread to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.12 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 11 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง ยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

```
Analysis of Variance for ratio, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.02583  0.02583  0.01292  0.29  0.765
Error    3  0.13183  0.13183  0.04394
Total    5  0.15766


S = 0.209625   R-Sq = 16.39%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 11 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Spread to The Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.13 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 11 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้านเวลาในการคำนวณ เนื่องจากไม่สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้จากตัวแปรทั้ง 3 ตัวซึ่งจะพิจารณาจากคำตอบที่

มีอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และใช้เวลาน้อยที่สุด

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยที่มีตัวแปรตอบสนองคือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จะมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.51

ตารางที่ 5.51 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดขนาดปัญหา 11 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนฝูง (Swarm)	10
2. จำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle)	10

5.7.2 ปัญหา 25 ขั้นงาน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยความรู้ในเชิงลบ โดยใช้ตัวแปรตอบสนองการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS      F      P
swam     2  0.21569  0.21569  0.10785  67.43  0.003
Error    3  0.00480  0.00480  0.00160
Total    5  0.22049


S = 0.0399909   R-Sq = 97.82%   R-Sq(adj) = 96.37%
```

รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 25 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Convergence to The Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.14 พบว่าค่าจำนวนฝูงมีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ปัญหา 25 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ

One-way ANOVA: Convergence versus swam

```
Source  DF       SS       MS      F      P
swam     2  0.21569  0.10785  67.43  0.003
Error    3  0.00480  0.00160
Total    5  0.22049

S = 0.03999   R-Sq = 97.82%   R-Sq(adj) = 96.37%


                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N    Mean   StDev  ---------+---------+---------+---------+
1      2  0.9276  0.0064                      (-----*-----)
2      2  1.0290  0.0078                              (----*-----)
3      2  0.5857  0.0685  (-----*----)
                          ---------+---------+---------+---------+
                                 0.64      0.80      0.96      1.12
```

รูปที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA กรณีมีการกำหนดค่าจำนวนฝูง (Swarm) ในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.15 พบว่ามีปัจจัยค่าจำนวนฝูง (Swarm) ที่ระดับปัจจัย 10 มีความแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากตัวแปรร่วม ที่ระดับปัจจัย 10 จะทำให้ค่าตอบสนองตัวชี้สมรรถนะ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) ดีที่สุด

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยที่มีตัวแปรตอบสนองคือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) จะมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.52

ตารางที่ 5.52 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดขนาดปัญหา 25 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนฝูง (Swarm)	10
2. จำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle)	10

5.7.3 ปัญหา 61 ขั้นงาน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยใช้ตัวแปรตอบสนองการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS     F      P
swam     2  0.051817  0.051817  0.025908  2.66  0.217
Error    3  0.029241  0.029241  0.009747
Total    5  0.081058


S = 0.0987265   R-Sq = 63.93%   R-Sq(adj) = 39.88%
```

รูปที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 61 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.16 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในปัญหา 61 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตารางยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวแปรตอบสนองการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for spead, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.01853  0.01853  0.00926  0.67  0.574
Error    3  0.04142  0.04142  0.01381
Total    5  0.05995


S = 0.117499   R-Sq = 30.91%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

รูปที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 61 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Spread to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.17 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 61 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง ยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

```
Analysis of Variance for ratio, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS     F      P
swam     2  0.004354  0.004354  0.002177  0.68  0.572
Error    3  0.009635  0.009635  0.003212
Total    5  0.013989


S = 0.0566715   R-Sq = 31.13%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 61 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Ratio to The Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.18 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 61 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้านเวลาในการคำนวณ เนื่องจากไม่สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้จากตัวแปรทั้ง 3 ตัวซึ่งจะพิจารณาจากคำตอบที่มีอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และใช้เวลาน้อยที่สุด

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยที่มีตัวแปรตอบสนองคือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จะมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.53

ตารางที่ 5.53 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดขนาดปัญหา 61 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนฝูง (Swarm)	10
2. จำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle)	10

5.7.4 ปัญหา 111 ขั้นงาน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยความรู้ในเชิงลบ โดยใช้ตัวแปรตอบสนองการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS      F      P
swam     2  0.078600  0.078600  0.039300  12.38  0.036
Error    3  0.009525  0.009525  0.003175
Total    5  0.088126


S = 0.0563475   R-Sq = 89.19%   R-Sq(adj) = 81.99%
```

รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 111 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.19 พบว่าค่าจำนวนฝูงมีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ปัญหา 111 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ

One-way ANOVA: Convergence versus swam

```
Source  DF       SS       MS      F      P
swam     2  0.07860  0.03930  12.38  0.036
Error    3  0.00953  0.00318
Total    5  0.08813

S = 0.05635   R-Sq = 89.19%   R-Sq(adj) = 81.99%


                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev   ---+---------+---------+---------+------
1      2  0.23575  0.06512   (--------*-------)
2      2  0.47310  0.00000                    (--------*-------)
3      2  0.22520  0.07269   (-------*-------)
                              ---+---------+---------+---------+------
                               0.15      0.30      0.45      0.60

Pooled StDev = 0.05635
```

รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA กรณีมีการกำหนดค่าจำนวนฝูง (Swarm) ในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.20 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในปัญหา 111 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตารางยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวแปรตอบสนองการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for spead, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS     F      P
swam     2  0.023313  0.023313  0.011657  2.42  0.237
Error    3  0.014465  0.014465  0.004822
Total    5  0.037778


S = 0.0694372   R-Sq = 61.71%   R-Sq(adj) = 36.19%
```

รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 111 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Spread to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.21 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 111 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง ยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

```
Analysis of Variance for ratio, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.03703  0.03703  0.01851  1.00  0.465
Error    3  0.05554  0.05554  0.01851
Total    5  0.09257


S = 0.136069   R-Sq = 40.00%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 111 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Ratio to The Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.22 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 111 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้านเวลาในการคำนวณ เนื่องจากไม่สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้จากตัวแปรทั้ง 3 ตัวซึ่งจะพิจารณาจากคำตอบที่มีอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และใช้เวลาน้อยที่สุด

จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยที่มีตัวแปรตอบสนองคือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับ

กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จะมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.54

ตารางที่ 5.54 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดขนาดปัญหา 111 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนฝูง (Swarm)	10
2. จำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle)	10

5.7.5 ปัญหา 205 ขั้นงาน

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยใช้ตัวแปรตอบสนองการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for Conmergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.15638  0.15638  0.07819  3.80  0.151
Error    3  0.06172  0.06172  0.02057
Total    5  0.21810


S = 0.143434   R-Sq = 71.70%   R-Sq(adj) = 52.83%
```

รูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 205 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Convergence to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.23 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ในปัญหา 205 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตารางยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวแปรตอบสนองการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)

```
Analysis of Variance for spead, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
swam     2  0.08623  0.08623  0.04312  2.17  0.261
Error    3  0.05958  0.05958  0.01986
Total    5  0.14581


S = 0.140922   R-Sq = 59.14%   R-Sq(adj) = 31.90%
```

รูปที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 205 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Spread to the Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.24 พบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ทั้งสองปัจจัยในปัญหา 205 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัจจัยความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง ยังไม่สามารถระบุพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ จึงทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

```
Analysis of Variance for ratio, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS      F      P
swam     2  0.085821  0.085821  0.042910  21.65  0.016
Error    3  0.005946  0.005946  0.001982
Total    5  0.091766


S = 0.0445182   R-Sq = 93.52%   R-Sq(adj) = 89.20%
```

รูปที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ขนาดปัญหา 205 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนองคือ Ratio to the Pareto-optimal set

จากรูปที่ 5.25 พบว่าค่าจำนวนฝูงมีผลต่อวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ปัญหา 205 ขั้นงาน อย่างมีนัยสำคัญ

One-way ANOVA: ratio versus swam

```
Source  DF       SS       MS      F      P
swam     2  0.08582  0.04291  21.65  0.016
Error    3  0.00595  0.00198
Total    5  0.09177

S = 0.04452   R-Sq = 93.52%   R-Sq(adj) = 89.20%


                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  --------+---------+---------+---------+-
1      2  0.00000  0.00000  (-------*-------)
2      2  0.00160  0.00226  (-------*-------)
3      2  0.25450  0.07707                       (-------*--------)
                            --------+---------+---------+---------+-
                                  0.00      0.12      0.24      0.36

Pooled StDev = 0.04452
```

รูปที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA กรณีมีการกำหนดค่าจำนวนฝูง (Swarm) ในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio to The Pareto-Optimal Set

จากรูปที่ 5.26 พบว่ามีปัจจัยค่าจำนวนฝูง (Swarm) ที่ระดับปัจจัย 10 มีความแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากตัวแปรร่วม ที่ระดับปัจจัย 10 จะทำให้ค่าตอบสนองตัวชี้สมรรถนะ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio to The Pareto-Optimal Set) ดีที่สุด

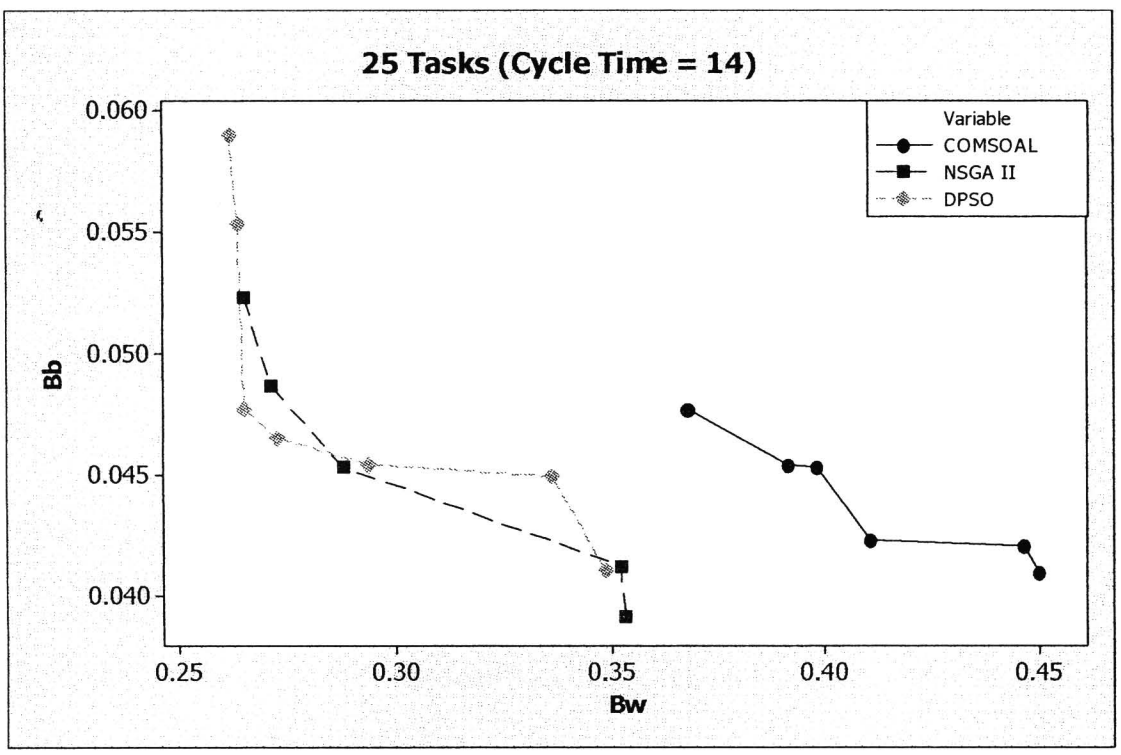
จากการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยที่มีตัวแปรตอบสนองคืออัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio to The Pareto-Optimal Set) จะมีพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ดังตารางที่ 5.55

ตารางที่ 5.55 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดขนาดปัญหา 205 ขั้นงานในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนฝูง (Swarm)	10
2. จำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle)	10

5.8 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

กราฟการเปรียบเทียบคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DPSO) กับอัลกอริทึมแบบ NSGA-II และอัลกอริทึม COMSOAL ที่นำมาประยุกต์ใช้การปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนาน ในปัญหาและพารามิเตอร์เดียวกัน ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบคำตอบอัลกอริทึม COMSOAL, NSGA-II และ DPSO

5.9 สรุป

ในบทนี้ได้เสนอวิธีการในการหาคำตอบวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ที่เหมาะสมแบบใหม่ ซึ่งการหาที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคจะเป็นการใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม (Stochastic) เป็นวิธีการหาค่าความเหมาะสมโดยอาศัยพื้นฐานของความน่าจะเป็น โดยได้รับแรงจูงใจมาจากพฤติกรรมทางสังคมในการอพยพของฝูงนก และการเรียนรู้ของฝูงปลา ที่อาศัยการค้นหาแบบกลุ่มประชากร แต่ละตัวดำเนินการเรียกว่า “อนุภาค (Particle)” ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่ง (Velocity) ได้ อนุภาคนี้จะรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่ม บินอยู่ในขอบเขตที่ต้องการค้นหาระหว่างบิน อนุภาคจะเคลื่อนย้ายตำแหน่งโดยอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งของอนุภาคใกล้เคียงที่บินผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางการเคลื่อนที่ต่อไป จนกว่าจะพบคำตอบที่

ดีที่สุดเมื่อมาประยุกต์ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนาน จะทำให้ได้คำตอบที่ลู่เข้าสู่สภาพคงที่อย่างรวดเร็ว คำตอบที่ได้บางครั้งยังไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการอัลกอริทึมที่ผ่านมาจากบทก่อนหน้า วิธีการวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค จะให้คำตอบที่เหมาะสมมากกว่าอัลกอริทึมวิธีอื่น และจำนวนฝูง (Swarm) ที่มีค่าเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคของแต่ละฝูง (Particle) ที่มีค่าเท่ากับ 10 จะมีความเหมาะสมที่สุด