บทที่ 7

การพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูที่มีลักษณะผลิตภัณฑ์ผสมในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี

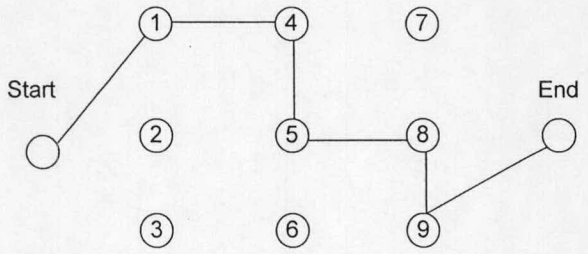
บทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่ลักษณะตัวยู โดยการประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II และ M-NSGA-II ร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมากขึ้น เนื้อหาในบทนี้จะประกอบด้วย หลักการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบ แนวคิดการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบ อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II และการประมาณกลุ่มคำตอบที่แท้จริงรวมทั้งการคำนวณหาตัวสมรรถนะ 3 ด้าน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

7.1 หลักการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบ

อัลกอริทึมการบรรจวบที่ได้กล่าวในบทที่ 6 จะพบว่ามีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่รวดเร็ว ซึ่งมาจากการจดจำลักษณะการวางคู่ขั้นงานที่อยู่ติดกันที่ส่งผลให้สตริงคำตอบมีคำตอบที่ดีที่สุดและยังตัดทอนสตริงคำตอบที่แย่เพื่อไม่ให้เกิดขึ้นในเจนเนอเรชั่นถัดไป ดังนั้นในแต่ละรอบเจนเนอเรชั่นพื้นที่ของคำตอบที่ดีที่สุดจะมีขนาดแคบลงเรื่อย ๆ คำตอบที่เกิดจะมีการปรับปรุงและลู่เข้าสู่ค่าที่คงที่ (Stable) เร็วกว่าอัลกอริทึมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากอัลกอริทึมทั่วไปจะไม่คำนึกถึงลักษณะการวางตำแหน่งของขั้นงานในสตริงคำตอบ แต่กลับเป็นการสุ่มเลือกขั้นงานลงในสตริงคำตอบส่งผลให้เสียเวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

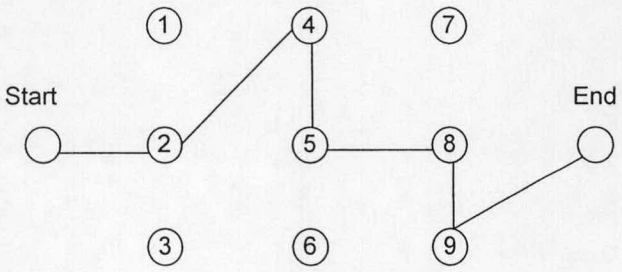
เมื่อมองถึงข้อดีเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II จะพบว่าการกระบวนในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดคำตอบที่หลากหลาย เช่น การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Binary Tournament) ที่ทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเข้าสู่การผสมพันธุ์ (Mating Pool) ช่วยทำให้คำตอบที่ดีมีการพัฒนาให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น การครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นการช่วยทำให้ได้คำตอบที่หลากหลายจากการแลกเปลี่ยนโครโมโซมกันระหว่างสตริงคำตอบ การมิวเตชั่น (Mutation) เป็นวิธีที่ทำให้สตริงคำตอบเกิดการผ่าเหล่า ทำให้สตริงคำตอบที่คิดว่าเป็นสตริงคำตอบที่ดี เกิดการเปลี่ยนแปลง และข้อดีของอัลกอริทึม M-NSGA-II ที่มีวิธีการค้นหาเฉพาะที่ ช่วยให้คำตอบมีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสม(Optimal Solution)มากขึ้น

อัลกอริทึมการบรรจวบยังมีข้อเสียอยู่ประการหนึ่งคือ การจดจำตำแหน่งขั้นงานที่ผิดตั้งแต่เริ่มต้นหรือจำเส้นทางการเดินผิดทำให้เกิดการหลงทาง เพราะในแต่ละรอบจะมีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ถ้าเกิดในรอบช่วงต้นที่มีความน่าจะเป็นเท่ากันการสุ่มช่วงต้นอาจจะสุ่มได้ตำแหน่งที่จะเลือกขั้นงานลงสตริงคำตอบไม่เหมาะสม ก็จะส่งผลทำให้คำตอบสุดท้ายมีค่าที่ไม่เหมาะสมตามหรือคำตอบจะเกิดการหลงทาง



Good Solution

รูปที่ 7.1 ลักษณะเส้นทางที่ทำให้ได้คำตอบที่ดี



Bad Solution

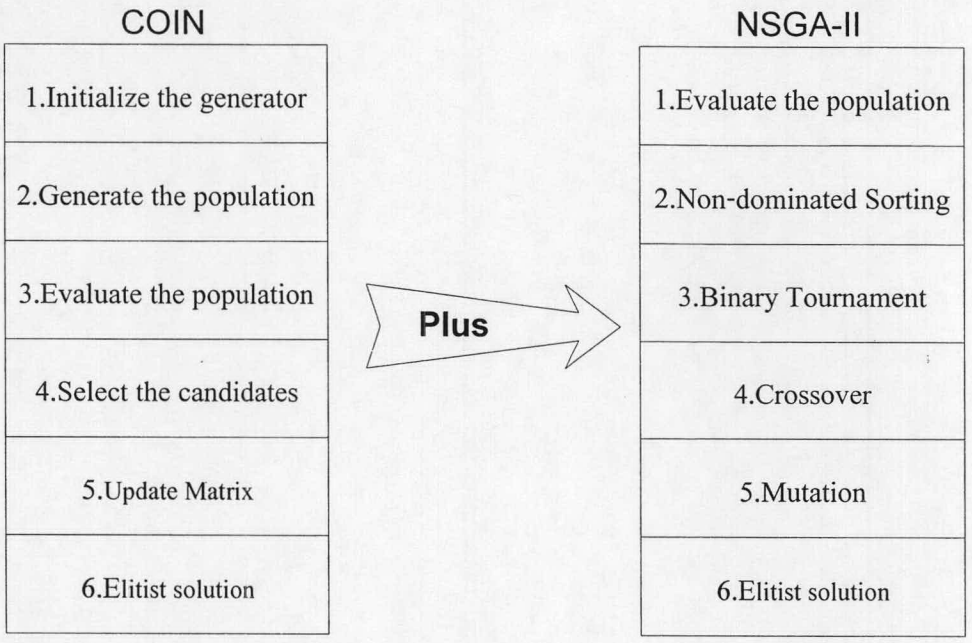
รูปที่ 7.2 ลักษณะเส้นทางที่ทำให้ได้คำตอบที่แย่

จากรูปที่ 7.1 และ 7.2 จะพบว่าเริ่มต้นในการเลือกขั้นงานหรือเส้นทางการเดินมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากันหมดในที่นี้ ขั้นงานหรือเส้นทางที่ 1,2, และ 3 มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.333 , 0.333 และ 0.333 ตามลำดับ ดังนั้นในการสุ่มเลือกเส้นทางจากตารางความน่าจะเป็นถ้าเริ่มต้นสุ่มได้ ขั้นงานหรือเส้นทางที่ 2 จะทำการให้รางวัล(Reward)กับขั้นงานหรือเส้นทางที่ 2 จนค่าความน่าจะเป็นในการเลือกมีค่ามากกว่าขั้นงานหรือเส้นทางที่ 1 ซึ่งถือเป็นขั้นงานที่หรือเส้นทางที่คำให้คำตอบของสตริงคำตอบเป็นคำตอบที่ดี(Good Solution) จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าข้อเสียของอัลกอริทึมการบรรจวบแบบนี้ถ้าช่วงเริ่มต้นของการสุ่มเลือกขั้นงานหรือเส้นทางไม่ดี จะส่งผลกระทบทำให้การลงขั้นงานและเส้นทางผิดเกิดการหลงทางของคำตอบที่จะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสม

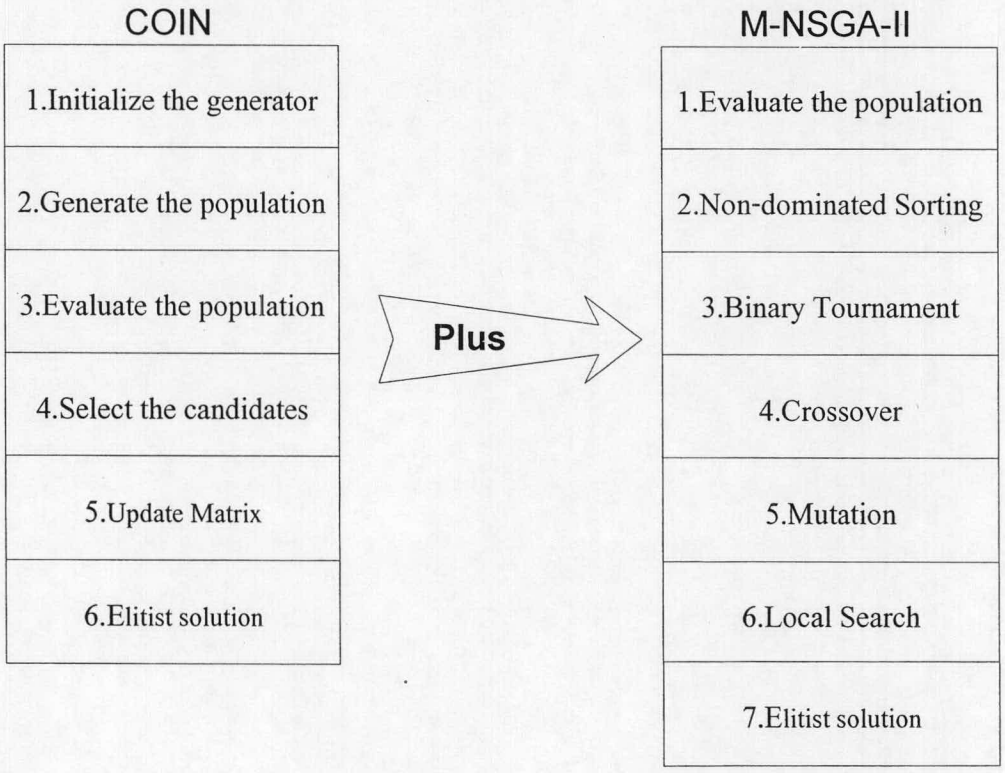
7.2 แนวคิดการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบ

จากข้อเสียของอัลกอริทึมการบรรจวบ การที่จะช่วยในการไม่ให้เดินหลงทางหรือดึงคำตอบที่เหมาะสมถูกตัดทิ้งไป ทำให้คำตอบสุดท้ายออกมาไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมหรือดีที่สุด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบขึ้นมาใหม่ โดยการนำข้อดีของอัลกอริทึมการบรรจวบในการตัดทอนคำตอบที่คิดว่าเป็นสตริงคำตอบที่แย่ ทำให้พื้นที่ของคำตอบที่เหมาะสมมีพื้นที่ลดลง และยังมีความรวดเร็วในการคำนวณ มาประยุกต์รวมกับอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II ที่ช่วยทำให้ได้คำตอบที่ลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมและมีความหลากหลายมากขึ้น ที่เกิดจากการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) และกระบวนการผสมพันธุ์ (Mating Pool) จะช่วยทำให้คำตอบที่เกิดจากอัลกอริทึมการบรรจวบมีความหลากหลายมากขึ้น เพราะบางครั้งขั้นงานหรือเส้นทางที่เลือกอาจเกิดการหลงทางและโดยตัดทอนคำตอบที่ดีออกไป ทำให้ได้คำตอบที่ได้ยังไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสม

การนำอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม NSGA-II เป็นวิธีการที่พัฒนาและมีหลักการคล้ายคลึงกับ เมมเมติกอัลกอริทึม (MAs) ที่มีพัฒนามาจากการประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมกับการค้นหาเฉพาะที่ โดยทำการปรับปรุงคำตอบหลังจากการสุ่มสตริงคำตอบเริ่มต้นให้เกิดคำตอบที่ดีก่อนทำการผสมพันธุ์ ซึ่งเป็นการหลักการเดียวกันกับการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบที่มีการนำสตริงคำตอบที่เกิดจากการอัลกอริทึมการบรรจวบ นำมาเป็นสตริงคำตอบที่เหมาะสมส่งผ่านกระบวนการผสมพันธุ์ของอัลกอริทึม NSGA-II ให้เกิดคำตอบที่หลากหลายมากขึ้น จะช่วยทำให้คำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมการบรรจวบมีการดึงคำตอบให้ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ในส่วนการนำอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II (M-NSGA-II)จะมีขั้นตอนเช่นเดียวกับ NSGA-II แต่มีการเพิ่มกระบวนการค้นหาเฉพาะที่(Local Search) คำตอบหลังการทำมิวเตชั่น เพื่อทำการปรับปรุงคำตอบให้ได้คำตอบที่เหมาะสมมากขึ้น



รูปที่ 7.3 อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม NSGA-II



รูปที่ 7.4 อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II

7.3 อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II และ M-NSGA-II

อัลกอริทึมการบรรจวบจะทำการค้นหาคำตอบ โดยการจดจำขั้นงานและเส้นทางการเดินของสตริงคำตอบที่จะทำให้ได้คำตอบที่ดี การสร้างสตริงคำตอบจะสร้างมาจากตารางความน่าจะเป็นที่เป็นตารางที่ใช้ในการเลือกขั้นงานหรือเส้นทางลงบนตำแหน่งในสตริงคำตอบ ตารางความน่าจะเป็นจะมีการปรับปรุงอยู่ทุก ๆ รอบ เจนเนอเรชั่น ทำให้ค่าความน่าจะเป็นของขั้นงานหรือเส้นทางที่ทำให้สตริงคำตอบที่มีค่าที่ดี(Good Solution) จะมีค่าในตารางสูง ขั้นงานและเส้นทางนั้นจะมีโอกาสเลือกลงสตริงคำตอบสูง แต่บางครั้งการจดจำขั้นงานหรือเส้นทางอาจจะเกิดการหลงทาง (Astray) คำตอบที่ได้มาจึงเป็นคำตอบที่ไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) จึงทำการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่มากขึ้น โดยการรวมกับอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

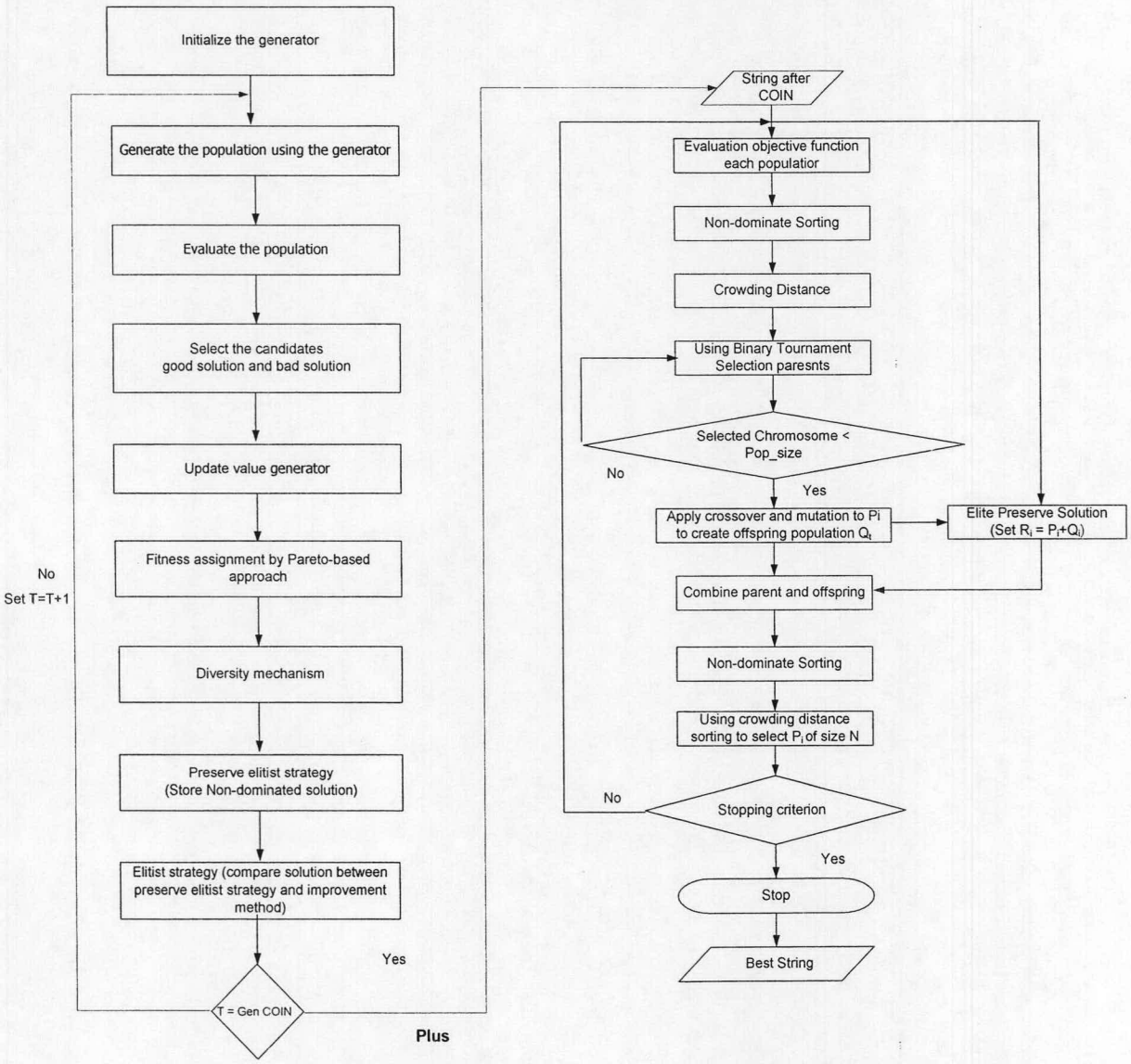
อัลกอริทึมการบรรจวบที่รวมกับอัลกอริทึม NSGA-II (COIN plus NSGA-II) และ M-NSGA-II (COIN plus M-NSGA-II) มีโครงสร้างการคำนวณเหมือนกับ อัลกอริทึมการบรรจวบและอัลกอริทึม NSGA-II ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และ 5 ซึ่งจะทำการคำนวณในอัลกอริทึมการบรรจวบก่อน ในช่วงเจนเนอเรชั่นหนึ่งก่อน เพื่อคัดกรองคำตอบที่มีจำนวนมากให้เหลือคำตอบที่น้อยลง และนำสตริงคำตอบที่ทำการคัดกรองเท่ากับจำนวน *popsize* ตัว มาผ่านกระบวนการของอัลกอริทึม NSGA-II ในจำนวนเจนเนอเรชั่นหนึ่ง วิธีการทำเช่นนี้จะช่วยให้ได้คำตอบที่ดีที่ขึ้นกว่าเดิมและยังช่วยให้มีคำตอบที่หลากหลายมากกว่าการใช้อัลกอริทึมการบรรจวบเพียงอย่างเดียว เนื่องจากกระบวนการในอัลกอริทึม NSGA-II เป็นกระบวนการที่ช่วยทำให้คำตอบมีความหลากหลายและมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นการครอสโอเวอร์ การมิวเตชั่น ในส่วนอัลกอริทึมอัลกอริทึมการบรรจวบที่รวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II จะมีการเพิ่มกระบวนการค้นหาเฉพาะที่หลังการทำมิวเตชั่นในอัลกอริทึม NSGA-II เพื่อช่วยดึงคำตอบที่ติดอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม (Local Optimal) ออกมาได้

7.4 โครงสร้างของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสม ที่มีลักษณะตัวยู

โครงสร้างจะเป็นการนำโครงสร้างอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II ซึ่งมีโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย 15 ส่วน

1. Initialize the generator: สร้างตัวดำเนินการเริ่มแรก โดยการสร้างตารางความน่าจะเป็น (Matrix Probability) สำหรับการตัดสินเลือกขั้นงาน
2. Generate the population: สร้างประชากรเบื้องต้นโดยใช้ตัวดำเนินการ ขั้นตอนนี้จะทำการเลือกขั้นงานมาจากตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) เพื่อใช้ในการเลือกงานอันดับแรกที่จัดถูกเลือก
3. Evaluate the population: คำนวณและประเมินผลประชากร จะคำนวณค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เช่น จำนวนสถานีงาน ผลต่างสถานีงานกับความสัมพันธ์ในสถานีงาน และการกระจายภาระขั้นงานในสถานีงาน
4. Select the candidates: การคัดเลือกสตริงคำตอบ ซึ่งจะทำการเลือกสตริงคำตอบที่คำนวณได้ โดยจะทำการเลือกสตริงคำตอบสองลักษณะคือ สตริงคำตอบที่ถือเป็นคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่ถือเป็นคำตอบที่แย่ (Bad Solution) เพื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น
5. Update Matrix Probability: ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นโดยสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะทำการให้รางวัล(Reward) กับตารางความน่าจะเป็น และสตริงคำตอบที่แย่จะทำการลงโทษ(Punish) กับตารางความน่าจะเป็น
6. Strategies to maintain elitist solutions in the population: เป็นเทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยทำการนำสตริงคำตอบที่ดีมาทำการรวมกับสตริงคำตอบที่ทำการจัดเก็บไว้ในแต่ละรอบ
7. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัวด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจะมีอันดับที่ในการจัดอันดับต่ำที่สุด
8. Diversity Information : คำนวณค่าความหนาแน่นของสมาชิกประชากรคำตอบ
9. Selection : คัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมาก และมีค่าความหนาแน่นมาก โดยเลือกเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับประชากร *popsize* ตัว
10. Evaluation : ประชากรที่ได้รับการคัดเลือก *popsize* ตัว จะทำการคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดค่าเชิงกลุ่มวิธีที่ดีที่สุดและค่าความหนาแน่น
11. Selection : เป็นกระบวนการในการคัดเลือกประชากรที่มีความเหมาะสมมากเพื่อนำไปทำการผสมพันธุ์
12. Crossover : เป็นการสร้างประชากรตัวใหม่จากการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่างสตริงคำตอบ 2 ตัว

13. Mutation : เป็นการสร้างประชากรตัวใหม่โดยการย้ายค่าบางตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ
14. Repair String : ปรับปรุงประชากรหลังการทำครอสโอเวอร์ และมิวเตชั่นไม่ให้ผิดตามความสัมพันธ์ของขั้นงาน
15. Elite Preserve Strategy : เป็นการเก็บค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างประชากรที่สร้างใหม่ กับประชากรที่ดีที่สุดตัวเดิม เพื่อนำประชากรในที่นี้กลับไปเป็นประชากรเริ่มต้น ในเจนเนอเรชั่นในรอบถัดไป



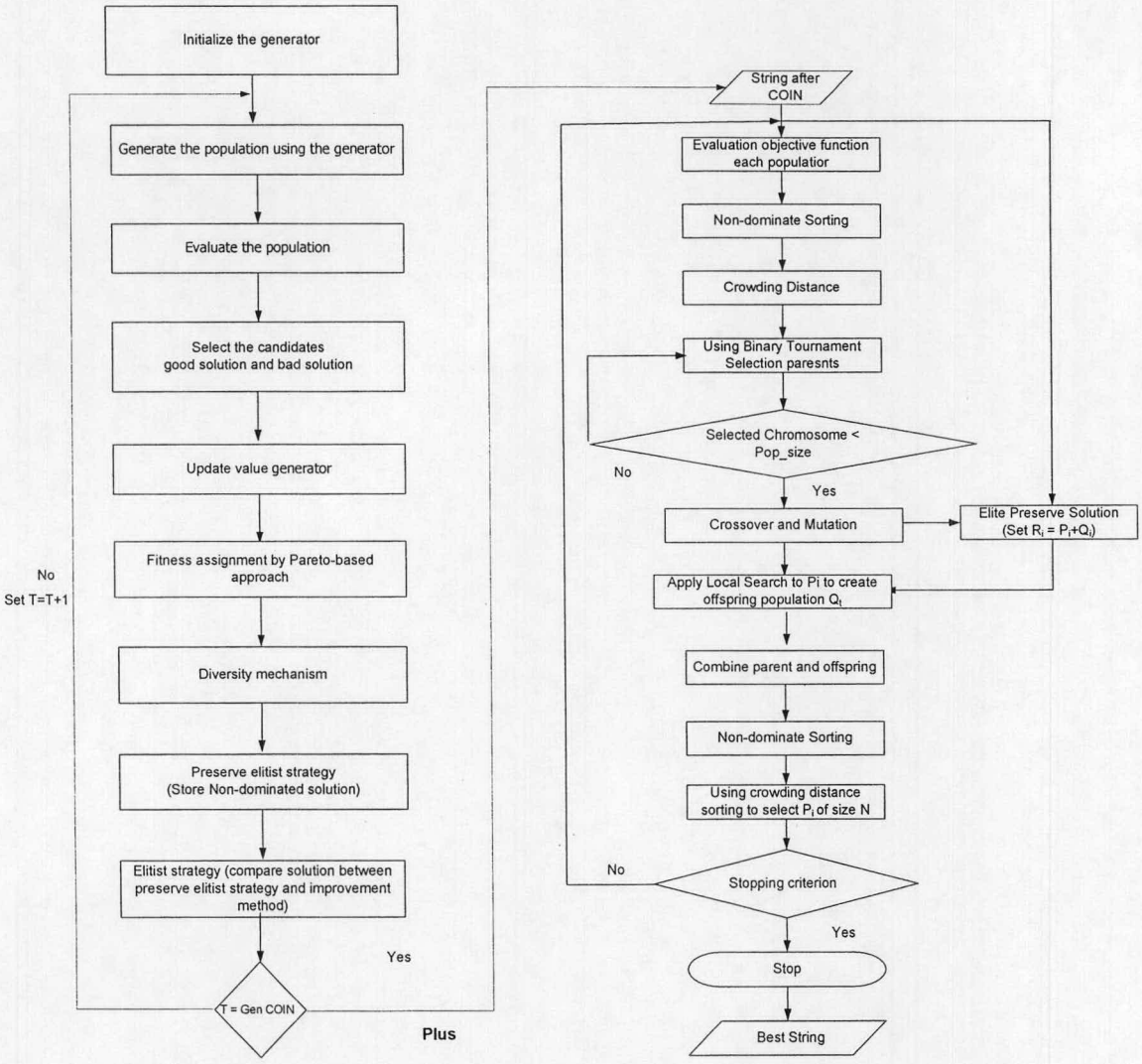
รูปที่ 7.5 โครงสร้างอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II

7.5 โครงสร้างของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ M-NSGA-II สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสม ที่มีลักษณะตัวยู

โครงสร้างจะเป็นการนำโครงสร้างอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II ซึ่งมีโครงสร้างหลัก ประกอบด้วย 16 ส่วน

1. Initialize the generator: สร้างตัวดำเนินการเริ่มแรก โดยการสร้างตารางความน่าจะเป็น (Matrix Probability) สำหรับการตัดสินเลือกขั้นงาน
2. Generate the population: สร้างประชากรเบื้องต้นโดยใช้ตัวดำเนินการ ขั้นตอนนี้จะทำการเลือกขั้นงานมาจากตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) เพื่อใช้ในการเลือกงานอันดับแรกที่จัดถูกเลือก
3. Evaluate the population: คำนวณและประเมินผลประชากร จะคำนวณค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ เช่น จำนวนสถานีงาน ผลต่างสถานีงานกับความสัมพันธ์ในสถานีงาน และการกระจายภาระขั้นงานในสถานีงาน
4. Select the candidates: การคัดเลือกสตริงคำตอบ ซึ่งจะทำการเลือกสตริงคำตอบที่คำนวณได้ โดยจะทำการเลือกสตริงคำตอบสองลักษณะคือ สตริงคำตอบที่ถือเป็นคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่ถือเป็นคำตอบที่แย่ (Bad Solution) เพื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น
5. Update Matrix Probability: ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นโดยสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะทำการให้รางวัล(Reward) กับตารางความน่าจะเป็น และสตริงคำตอบที่แย่จะทำการลงโทษ(Punish) กับตารางความน่าจะเป็น
6. Strategies to maintain elitist solutions in the population: เป็นเทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยทำการนำสตริงคำตอบที่ดีมาทำการรวมกับสตริงคำตอบที่ทำการจัดเก็บไว้ในแต่ละรอบ
7. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัวด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจะมีอันดับที่ในการจัดอันดับต่ำที่สุด
8. Diversity Information : คำนวณค่าความหนาแน่นของสมาชิกประชากรคำตอบ
9. Selection : คัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมาก และมีค่าความหนาแน่นมาก โดยเลือกเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับประชากร *popsize* ตัว
10. Evaluation : ประชากรที่ได้รับการคัดเลือก *popsize* ตัว จะทำการคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดค่าเชิงกลุ่มวิธีที่ดีที่สุดและค่าความหนาแน่น

11. Selection : เป็นกระบวนการในการคัดเลือกประชากรที่มีความเหมาะสมมากเพื่อนำไปทำการผสมพันธุ์
12. Crossover : เป็นการสร้างประชากรตัวใหม่จากการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนระหว่างสตริงคำตอบ 2 ตัว
13. Mutation : เป็นการสร้างประชากรตัวใหม่โดยการย้ายค่าบางตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ
14. Local Search : ช่วยดึงคำตอบที่ติดอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม(Local Optimal) ออกมา
15. Repair String : ปรับปรุงประชากรหลังการทำครอสโอเวอร์ และมิวเตชั่นไม่ให้ผิดตามความสัมพันธ์ของขั้นงาน
16. Elite Preserve Strategy : เป็นการเก็บค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างประชากรที่สร้างใหม่ กับประชากรที่ดีที่สุดตัวเดิม เพื่อนำประชากรในที่นี้กลับไปเป็นประชากรเริ่มต้น ในเจนเนอเรชั่นในรอบถัดไป



รูปที่ 7.6 โครงสร้างอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ M-NSGA-II

7.6 ขั้นตอนวิธีการอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสม ที่มีลักษณะตัวยู

จากโครงสร้างหลักของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II สามารถแบ่งย่อย ได้ดังนี้

1. Data Input : รับข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดและจำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ในแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงานของแต่ละขั้นงาน
2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ มาสร้างคำตอบเบื้องต้นอย่างสุ่ม จำนวน *popsize* ตัว โดยผ่านกระบวนการใส่รหัสคำตอบ(Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น(Initial Population)
3. Evaluation : คำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการ เช่น จำนวนสถานีงาน ผลต่างสถานีงานกับความสัมพันธ์ในสถานีงาน และการกระจายภาระขั้นงานในสถานีงาน
4. Pareto Based Approach : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการกำหนดความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบ ในขั้นตอนการทำงานนี้จะทำให้ประชากรคำตอบถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม กลุ่มที่ดีที่สุดจะมีอันดับที่ในการจัดต่ำที่สุด
5. Density Information : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบ
6. Selection : เรียงค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมาก และเรียงค่าความหนาแน่นจากมากไปน้อยทำการเลือกสตริงอันดับแรกจำนวนเท่า *Choose* เป็นสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และอันดับสุดท้ายจำนวนเท่ากับ *Choose* เป็นสตริงคำตอบที่แย่ (Bad Solution) โดย *Choose* คือจำนวนเปอร์เซ็นต์ในการเลือกสตริงคำตอบ
7. Update Matrix Probability: ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นโดยสตริงคำตอบที่ดีจะทำการให้รางวัล(Reward) กับตารางความน่าจะเป็น และสตริงคำตอบที่แย่จะทำการลงโทษ(Punish) กับตารางความน่าจะเป็น
8. Strategies to maintain elitist solution in the population : เปรียบเทียบประชากรคำตอบที่เก็บไว้ในรอบก่อนหน้ากับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบนี้ เก็บคำตอบที่เป็น Non-dominated Solution แทนที่คำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิม จำนวน *popsize* ตัว
9. Stop COIN: หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำคำตอบใน Strategies to maintain elitist solutions in the population มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด
10. Evaluation : คำนวณหาค่าต่าง ๆ ที่ต้องการ ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์

11. Pareto Based Approach : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการกำหนดความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบ ในขั้นตอนการทำงานนี้จะทำให้ประชากรคำตอบถูกแบ่งออกเป็นกลุ่ม กลุ่มที่ดีที่สุดจะมีอันดับที่ในการจัดต่ำที่สุด
12. Density Information : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบ
13. Selection : คัดเลือกคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool โดยคำตอบที่มีความแข็งแรงมากและมีค่าความหนาแน่นมากจะมีโอกาสในการถูกเลือกสูง
14. Crossover : ทำการจับคู่คำตอบที่อยู่ใน Mating Pool และทำการครอสโอเวอร์ด้วยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์
15. Mutation : ทำการมิวเตชั่นสตริงคำตอบด้วยความน่าจะเป็นในการทำมิวเตชั่น
16. Local Search : ใช้เฉพาะในกรณี M-NSGA-II ทำการสลับเปลี่ยนภายในสตริงคำตอบ
17. Combination population : รวมประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่ได้รับการปรับปรุงคำตอบด้วยฮิวริสติกแบบการค้นหาเฉพาะที่ และประชากรคำตอบรุ่นลูกที่ได้รับการปรับปรุงจากการค้นหาเฉพาะที่เช่นเดียวกัน
18. Selection next population : คัดเลือกประชากรคำตอบสำหรับเจนเนอเรชั่นถัดไปจากหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance ประชากรคำตอบที่มีอันดับหนึ่งจะมีโอกาสได้รับเลือกไปเป็นประชากรคำตอบในเจอเนอเรชั่นถัดไปสูงเป็นอันดับแรก และมีโอกาสลดหลั่นลงมาตามอันดับที่ ถ้าจำนวนประชากรคำตอบในอันดับใดมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนประชากรคำตอบที่เหลืออยู่ จะคัดเลือกโดยการพิจารณา Crowding Distance ที่มีค่ามาก และดำเนินการในขั้นตอนนี้จนกระทั่งครบจำนวน *popsize* ตัว
19. Strategies to maintain elitist solution in the population : เก็บกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำการปรับปรุง(Update) ในทุก ๆ เจนเนอเรชั่นเพื่อเปรียบเทียบประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ และประชากรคำตอบรุ่นลูก และเก็บคำตอบที่เป็น Non-dominated Solution แทนที่คำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิม แล้วนำประชากรคำตอบนั้นไปเป็นคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชั่นถัดไป จำนวน *popsize* ตัว
20. Stopping Criteria : ดูว่าการคำนวณนั้นครบจำนวนสูงสุดของคำตอบที่ต้องหา และค่าฟังก์ชันหรือจำนวนเจนเนอเรชั่นของวิธี NSGA-II ที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าน้อยกว่าให้กลับไปทำข้อ 10-18 ใหม่ และถ้าไม่ใช่ให้ทำการในข้อที่ 20
21. Stop: หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำคำตอบใน Strategies to maintain elitist solution in the population มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

7.7 วิธีการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II และสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะตัวยู

7.7.1 การใส่รหัสคำตอบ

ในการใส่รหัสคำตอบของอัลกอริทึมการบรรจวบ เป็นการใส่รหัสคำตอบ (Chromosome Representation / Coding) เปลี่ยนคำตอบปัญหาให้อยู่ในรูปสตริงคำตอบ หรือเรียกว่า โครโมโซม ในกรณีของปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวยู คำตอบของปัญหาคือกลุ่มของงานที่ถูกมอบหมายให้กับสถานีทำงานสถานีต่างๆ ดังนั้น วิธีการใส่รหัสคำตอบที่ใช้จึงต้องสามารถแสดงลำดับของงานในรูปของสตริงได้ วิธีการใส่รหัสคำตอบที่ใช้จึงเป็นแบบ Non-binary String

7.7.2 การสร้างกลุ่มประชากรเบื้องต้น

สร้างตารางความน่าจะเป็น ในการเลือกขั้นงานที่จะวางลงบนสตริงคำตอบแต่ละขั้นงาน จะมีวิธีการสร้างตารางดังนี้

- สร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) ที่มีขนาดเท่ากับ $n \times n$ โดย n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด
- สร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นในการเลือกขั้นงานแรก (First Walk Matrix Probability) ที่มีขนาดเท่ากับ $1 \times n$ โดย n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด
- ค่าในตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) ที่อยู่บนเส้นทะแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากขั้นงานจะไม่สามารถถูกเลือกซ้ำกันลงในสตริงคำตอบเดียวกัน และตำแหน่งของขั้นงานที่ไม่สามารถทำได้ถ้าขั้นงานก่อนหน้ายังไม่ได้ทำตามข้อจำกัดของความสัมพันธ์ของขั้นงาน จะมีค่าเท่ากับ 0
- ค่าในตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) จะมีค่าเท่ากับ $1/m$ กำหนดให้ m คือจำนวนตำแหน่งรวมตามแถวที่ยังไม่มีการกำหนดค่า
- ค่าในตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นในการเลือกขั้นงานแรก (First Walk Matrix Probability) ในตารางจะมีค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าเริ่มต้นเท่ากันหมด และมีค่าเท่ากับ $1/n$

จำนวนประชากรเบื้องต้น (Population Size) คือ จำนวนคำตอบเบื้องต้นที่สร้างขึ้นมาจำนวนหนึ่งเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการของอัลกอริทึมโดยคำตอบ 1 คำตอบ คือ สตริง คำตอบ 1 ตัว จะมีการกำหนดจำนวนประชากรคำตอบเบื้องต้นในแต่ละเจนเนอเรชั่นซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ *popsize* ตัว

การสุ่มเลือกขั้นงานจากตารางความน่าจะเป็นทั้งสอง จะทำการสุ่มเลือกขั้นงานอันดับแรกจากตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรกเสียก่อน โดยจะพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้าและข้างหลัง โดยดูจากผลรวมของคอลัมน์ที่มีค่าเท่ากับ 0 และเลือกขั้นงานที่จะจัดสรรลงอย่างต่อเนื่องจนครบทุกขั้นงานจากตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) โดยการสร้างประชากรเบื้องต้นทั้ง *popsize* ตัว

ถ้างานหมายเลขใดที่ถูกกำหนดลงไปแล้วให้ทำการตัดขั้นงานนั้นทิ้ง เพื่อป้องกันการสุ่มเลือกงานซ้ำและยังทำให้ลำดับขั้นงานไม่ผิดข้อกำหนดด้านความสัมพันธ์ของขั้นงาน มีหลักการในการปรับปรุงตาราง 2 กรณี คือ

- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจาก Precedence Matrix Font ให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Font เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Back มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด
- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจาก Precedence Matrix Backให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Back เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Font มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

7.7.3 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบหลังจากสุ่มเลือกมาจากตารางความน่าจะเป็นมาทำการจัดงานลงสถานีงานเสียก่อน ซึ่งการจะทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบตัวยู ได้นั้นจะต้องทำการ นำสตริงคำตอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงมาทำการงอเป็นลักษณะตัวยู ซึ่งจะมีจัดสรรงานลงสถานีงานในลักษณะตัวยู โดยมีฮิวริกติกในการเลือกงานหลายแบบ ในงานวิจัยนี้จะใช้ทั้งหมด 4 แบบ ดังนี้

1. การเลือกงานที่มีเวลาขั้นงานสูงที่สุด(Longest Processing Time) จะทำการเลือกงานที่มีเวลาขั้นงานสูงลงสถานีงานก่อน

2. การเลือกงานที่มีค่าถ่วงน้ำหนักสูงที่สุด(Greatest Weight Priority) จะทำการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักให้แก่ขั้นงาน และทำการพิจารณาเลือกงานที่มีค่าถ่วงน้ำหนักสูงสุดลงสถานีงานก่อน
3. เลือกงานโดยวิธีสุ่มเลือก (Random Priority) ทำการสุ่มเลือกขั้นงานลงสถานีงาน
4. เลือกงานที่มีจำนวนภาระในการทำงานข้างหน้ามากที่สุด(Greatest Number of Successors) จะพิจารณาจำนวนขั้นงานที่จะต้องทำต่อจากงานที่พิจารณา ถ้าขั้นงานใดมีจำนวนขั้นงานที่ทำต่อมากที่สุดจะถูกเลือกลงสถานีงานก่อน

การพิจารณาลงสถานีงานในอัลกอริทึมการบรรจวบ จะมีขั้นตอนพิจารณาทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. นำขั้นงานที่อยู่เลือกเป็นลำดับแรกในสตริงคำตอบไปจัดให้กับสถานีทำงานแรก
2. นำขั้นงานที่อยู่ที่ถูกเลือกลำดับถัดไปจัดให้กับสถานีทำงานแรกเช่นกัน แล้วดูว่าเวลาทำงานรวมในสถานีเกินระยะเวลาทำงาน (Period of Time) ที่กำหนดให้หรือไม่ ถ้าเกินให้ตัดงานล่าสุดที่จัดให้สถานีทิ้งไป แล้วนำงานที่ตัดออกไปจัดให้กับสถานีถัดไป แต่ถ้าเวลารวมในสถานีน้อยกว่าระยะเวลาทำงาน ก็ให้เอางานที่อยู่ในลำดับต่อๆมาไปจัดให้กับสถานีนั้น จนกว่าเวลารวมของสถานีจะมากกว่าระยะเวลาทำงาน
3. เมื่อนำงานที่ตัดออกมาจากสถานีเดิม มาจัดให้กับสถานีถัดไปแล้ว ก็ให้นำงานลำดับต่อๆมาไปจัดให้กับสถานีทำงานนั้น จนกว่าเวลาทำงานรวมของสถานีจะเกินระยะเวลาทำงาน ถ้าเกินก็ให้ตัดงานนั้นออกจากสถานีเดิม และนำไปจัดให้กับสถานีใหม่ต่อไป
4. ทำตามข้อที่ 3 จนกว่างานทุกงานจะถูกจัดให้กับสถานีทำงานจนหมด

นำสตริงคำตอบหลังจากการจัดสรรลงสถสนีงานมาทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์คือ คือ จำนวนสถานีงานมีจำนวนน้อยที่สุด งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุดและความผันแปรของเวลาในสถานีงานทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด เพื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงของสตริงคำตอบ มีวิธีดังนี้

กำหนดให้ m คือ สถานีงาน

SN_k คือ จำนวนการเชื่อมต่อการทำงานในสถานีงาน k

$S_{\max}$ คือ เวลารวมที่สูงที่สุดในสถานีงาน

S_k คือ เวลารวมในสถานีงาน k

1 เพื่อให้มีจำนวนสถานีทำงานน้อยที่สุด

$$f_1(X) = Minimum\ m \tag{7.1}$$

2 เพื่อให้งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

$$f_2(X) = Minimum\ \ relatedness = Minimum\ \ m - m \Big/ \sum_{k=1}^{m} SN_k \tag{7.2}$$

3 เพื่อหาค่าต่ำสุดของค่าการกระจายภาระงานในแต่ละสถานีงาน

$$f_3(X) = Minimum\ SI = Minimum \sqrt{\sum_{k=1}^{m} (S_{\max} - S_k)^2 \Big/ m} \tag{7.3}$$

7.7.4 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดเป็นวิธีในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกคำตอบ และมีหลายวิธี จึงเลือกใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดแบบเดียวกับอัลกอริทึม NSGAII แบบการจัดอันดับของ Goldberg หรือ Non-dominated Sorting

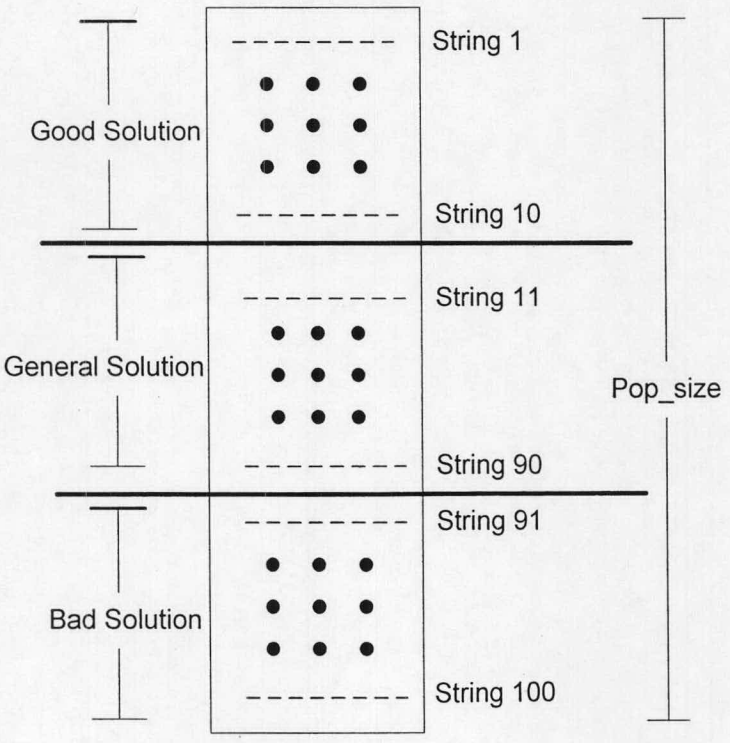
การกำหนดค่าความแข็งแรงวิธี Non-dominated Sorting ซึ่งเป็นวิธีการจัดลำดับเซตของสตริงคำตอบในประชากรคำตอบทั้งหมด โดยจะพิจารณาคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่าเซตคำตอบนี้ (Non-dominated Solution) เป็นอันดับที่หนึ่ง และจัดลำดับ (Rank) เป็นอันดับแรก จากนั้นจะตัดคำตอบที่พิจารณาไปแล้ว คำตอบที่เหลือจะถูกจัดเป็นอันดับถัดไปจนหมด อันดับที่ทำการจัดจะถือว่าเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) หลังจากการนั้นจะทำการกำหนดความหนาแน่นของประชากรคำตอบ

7.7.5 วิธีกำหนดความหนาแน่นของประชากรคำตอบ

เป็นวิธีในการรักษาความหลากหลายให้กับสมาชิกคำตอบ หรือแบ่งปันค่าความแข็งแรง หรือกำหนดความหนาแน่น เพื่อทำให้เกิดกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและป้องกันการเกิดคำตอบเกาะกลุ่มบริเวณใดบริเวณหนึ่ง วิธีที่ใช้จะเป็นวิธีเดียวกับอัลกอริทึม NSGAII คือวิธีการ Crowding Distance เพื่อในการตัดสินใจในการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากัน ในกรณีที่มีค่า Dummy Fitness เท่ากันจะเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance สูงก่อน

7.7.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การคัดเลือกสตริงคำตอบ(Selection String) เป็นการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดหรือเป็นสตริงคำตอบที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Good Solution) และเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดหรือเป็นสตริงคำตอบที่ให้คำตอบที่แย่ที่สุด (Bad Solution) เป็นจำนวนเท่ากับ *Choose* ตัว เพื่อไปทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นทั้งสองตาราง การเลือกคำตอบที่เหมาะสมจะช่วยให้การลู่เข้าของคำตอบเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมเร็วยิ่งขึ้น โดยกำหนดให้ *Choose* เปอร์เซ็นต์ในการเลือกคำตอบไปทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นทั้งสองตาราง



รูปที่ 7.7 ตัวอย่างการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวน $popsize = 100$ และ $Choose = 10\%$

7.7.7 ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็น

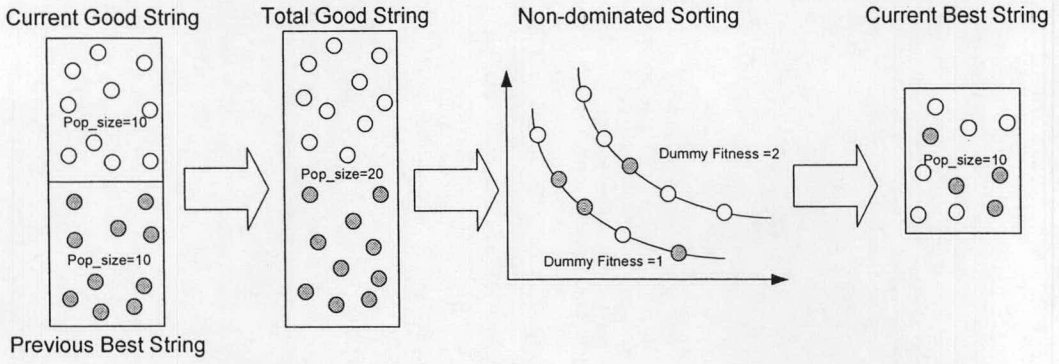
การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของตารางความน่าจะเป็น เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในอัลกอริทึมการบรรจวบ การเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็น วัตถุประสงค์เพื่อลดค่าคำตอบที่ที่คิดว่าเป็นคำตอบแย่ และเพิ่มโอกาสในการเลือกคำตอบที่ดีให้มีสิทธิในการถูกเลือกมากขึ้น ช่วยทำให้พื้นที่ของคำตอบที่เราสนใจมีขนาดที่แคบไม่กระจัดกระจาย ทำให้คำตอบในการหาแต่ละรอบลู่สู่ค่าเหมาะสมมากกว่าวิธีอัลกอริทึมอื่น สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเป็นสตริงคำตอบที่ทำให้ได้คำตอบที่ดี(Good Solution) จะทำการให้รางวัล (Reward) กับคู่ลำดับของงาน และ สตริงคำตอบที่ทำให้ได้คำตอบที่แย่ (Bad Solution) จะมีการลงโทษ (Punish) กับคู่ลำดับของงานที่อยู่ในสตริงคำตอบในตารางค่าความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นในการเลือกขั้นงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)

ในการให้รางวัล (Reward) และการลงโทษ (Punish) จะมีการพิจารณาตามหลักความน่าจะเป็นดังนี้

- ถ้าตำแหน่งที่ทำการให้รางวัล(Reward) หรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็น แล้วทำให้ค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งนั้นมีค่าเกิน 1 จะไม่ทำการเพิ่มค่าในตำแหน่งในการพิจารณาครั้งนั้น
- ถ้าตำแหน่งทำการลงโทษ(Punish) หรือลดค่าความน่าจะเป็น แล้วทำให้ค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งนั้นมีค่าน้อยกว่า 0 จะไม่ทำการลดค่าในตำแหน่งในการพิจารณาครั้งนั้น

7.7.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าดีที่สุดไว้ และป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีไปหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ หลักการในการเก็บค่าที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II ซึ่งจะนำสตริงคำตอบที่เลือกไว้ที่มีคำตอบที่ดีจำนวน *popsize* ตัวในรอบนั้น (Current Good String) และสตริงคำตอบที่ทำการจัดเก็บในรอบก่อนหน้า (Previous Best String) จำนวน *popsize* ตัว มาทำการรวมกันและหาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อทำการกำหนดค่าเชิงกลุ่ม หาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง(Dummy Fitness) โดยใช้วิธีแบบ Goldberg หรือ Non-dominated Sorting และหาค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบโดยวิธี Crowding Distance จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบเป็นจำนวน *popsize* ตัว



รูปที่ 7.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุดของวิธีอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II ในรอบการคำนวณแบบอัลกอริทึมการบรรจวบ กรณี $popsize = 10$

7.7.9 หยุดกระบวนอัลกอริทึมการบรรจวบ

ถ้าจำนวนเจนเนอเรชั่นของการคำนวณแบบอัลกอริทึมการบรรจวบเท่ากับที่เรากำหนดแล้ว สตริงคำตอบสุดท้ายที่ถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจะมีจำนวนสตริงคำตอบเท่ากับ *popsize* ตัว ที่อยู่จากการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ และนำสตริงคำตอบไปผ่านกระบวนการหาสตริงคำตอบที่ดีด้วยวิธีอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II เพื่อให้เกิดคำตอบที่หลากหลาย

7.7.10 การประเมินค่าในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

การคำนวณฟังก์วัตถุประสงค์ในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II จะมีหลักการคำนวณเช่นเดียวขั้นตอน 7.7.3 ซึ่งจะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณาทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ คือ 1.เพื่อให้มีจำนวนสถานีทำงานน้อยที่สุด 2.เพื่อให้งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และ 3. เพื่อหาค่าต่ำสุดของค่าการกระจายภาระงานในแต่ละสถานีงาน

7.7.11 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดเป็นวิธีในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกคำตอบ และมีหลายวิธี จึงเลือกใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่เหมาะสมอัลกอริทึม NSGAII แบบการจัดอันดับของ Goldberg หรือ Non-dominated Sorting

7.7.12 วิธีกำหนดความหนาแน่นของประชากรคำตอบในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

วิธีที่ใช้จะเป็นวิธีที่เหมาะสมกับอัลกอริทึม NSGAII คือวิธีการ Crowding Distance เพื่อในการตัดสินใจในการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากัน ในกรณีที่มีค่า Dummy Fitness เท่ากันจะเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance สูงก่อน การคำนวณในหัวข้อที่ 7.7.12-7.7.13 เพื่อใช้ในการคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่การผสมพันธุ์ (Mating Pool)

7.7.13 การคัดเลือกคำตอบในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

การคัดเลือกคำตอบ(Selection) เป็นการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป ในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นร่วมกัน สตริงที่ได้รับอันดับที่ในการกำหนดให้จากวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดเป็นอันดับต่ำและมีความหนาแน่นมากระหว่างคำตอบในอันดับเดียวกัน จะมีโอกาสที่จะได้รับการคัดเลือกสูง จะใช้วิธีในการคัดเลือกสตริงคำตอบ แบบ Binary Tournament Selection (Goldberg, 1991)

7.7.14 การครอสโอเวอร์

การครอสโอเวอร์(Crossover) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสลับแลกเปลี่ยนโครโมโซมของสตริงคำตอบ เป็นการสร้างประชากรคำตอบใหม่หรือประชากรคำตอบรุ่นลูก จะช่วยทำให้สตริงคำตอบหลังจากการค้นหาคำตอบแบบอัลกอริทึมการบรรจวบมีคำตอบที่หลากหลายและมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้นกว่าเดิม วิธีที่ใช้ในการทำครอสโอเวอร์มีหลายวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน การเลือกวิธีที่เหมาะสมกับปัญหาจะช่วยทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมได้ ซึ่งในที่นี้ได้อ้างถึงวิธี Weight mapping crossover (WMX) (Hwang, 2007)

ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์(Crossover Probability: P_C) คือค่าที่ใช้ในการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะเข้าไปสู่การครอสโอเวอร์ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่สุ่มขึ้นมากับค่า P_C ถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าที่สุ่มมาน้อยกว่าค่า P_C จะถูกเลือกนำไปทำการสลับโครโมโซม คู่สตริงคำตอบที่ถูกเลือกจะกลายเป็นสตริงพ่อแม่(Parent) จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_C) คือจำนวนสตริงที่จะเข้าสู่การครอสโอเวอร์ โดย $N_C = popsize \times P_C$

7.7.15 การมิวเตชั่น

การมิวเตชั่น(Mutation) เป็นวิธีการทำให้เกิดคำตอบที่ผ่าเหล่า หรือคำตอบที่เกิดนอกจากการผสมพันธุ์จากพ่อแม่ โดยการสลับตำแหน่งของค่าภายในสตริงคำตอบตัวเอง ทำให้ได้สตริงคำตอบตัวใหม่เกิดขึ้น การทำมิวเตชั่นในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II เพื่อทำให้คำตอบเกิดที่มีความหลากหลายมากขึ้นกว่าเดิม

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดวิธีการมิวเตชั่นตามงานวิจัยก่อนหน้า คือวิธี Reciprocal Exchange Mutation ความน่าจะเป็นในการมิวเตชั่น (Mutation Probability: P_m) คือค่าที่ใช้ในการคัดเลือกสตริงที่จะเข้าสู่การมิวเตชั่น โดยใช้เปรียบเทียบกับค่าที่สุ่มขึ้นมา ถ้าค่าที่สุ่มขึ้นมามีค่าน้อยกว่าค่า P_m จะถูกเลือกให้ทำกระบวนการมิวเตชั่น

7.7.16 ซ่อมแซมคำตอบ

สตริงคำตอบที่ได้จากการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชั่น กรณีอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และสตริงคำตอบที่ได้จากการทำครอสโอเวอร์ มิวเตชั่น และการค้นหาเฉพาะที่ ในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II จะมีการทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบที่มีการเรียงลำดับขั้นงานในการทำงานตามความสัมพันธ์ของขั้นงาน การสลับตำแหน่งภายในสตริงอาจก่อให้เกิดการผิดข้อจำกัดกับด้านความสัมพันธ์ของขั้นงาน จึงต้องทำการปรับปรุงสตริงคำตอบ

การซ่อมแซมคำตอบที่เสนอโดย Kim และคณะ (1996) เป็นการซ่อมแซมคำตอบโดยพยายามรักษาลำดับของค่าในสตริงให้เหมือนเดิมมากที่สุด วิธีการทำได้ดังนี้ คือ

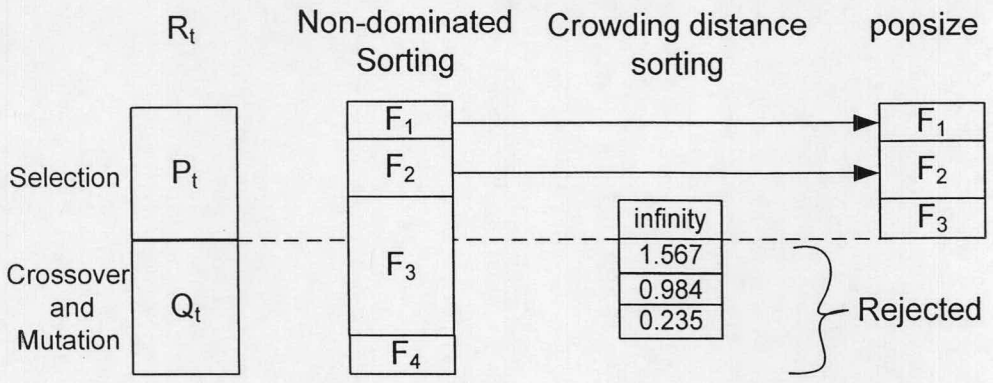
1. หาว่าขั้นงานใดที่ไม่มีงานก่อนหน้า จาก Precedence Matrix
2. นำขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้าที่ได้ทั้งหมดไปตรวจดูว่าอยู่ในตำแหน่งใดในสตริงคำตอบที่ต้องการซ่อมแซม
3. นำขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้า ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ต้นที่สุด ไปใส่ในตำแหน่งแรกของสตริงคำตอบใหม่
4. ตัดงานที่ใส่ลงไปในสตริงคำตอบแล้วออกจาก Precedence Matrix
5. ทำตามขั้นตอนที่ 1-4 จนกว่าจะครบทุกขั้นงาน

7.7.17 การค้นหาเฉพาะที่

เป็นขั้นตอนที่ใช้ในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II ที่มีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม เพื่อช่วยดึงคำตอบให้หลุดออกจากตำแหน่งที่เหมาะสม (Local Optimal) เปรียบเสมือนการปีนเขาขึ้นยอดสูงสุด ยอดสูงสุดก็คือการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การทำครอสโอเวอร์และมิวเตชั่นก็เพื่อช่วยให้ปีนเขาสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบ แต่ยอดภูเขานั้นยังไม่ใช่ยอดเขาที่สูงที่สุดก็เป็นได้ การทำมิวเตชั่นคือการกระโดดข้ามเขาเพื่อหาเขาลูกอื่นที่อาจจะมียอดเขาที่สูงกว่ายอดเขาเดิม คำตอบที่ได้จะมีค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม

7.7.18 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดในอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าดีที่สุดไว้ และป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีไปหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากสตริงคำตอบที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที่ การครอสโอเวอร์และมิวเตชั่น อาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าคำตอบที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชั่นที่ผ่าน ๆ มา ดังนั้นจึงต้องมีการเก็บค่าที่ดีที่สุดเอาไว้ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของกลุ่มสตริงคำตอบชุดใหม่ โดยพิจารณาค่าความแข็งแรงที่ดีกว่า(เนื่องจากในปัญหาที่ทำการพิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าต่ำสุดดังนั้นสตริงคำตอบที่ให้ค่าต่ำ จะเป็นสตริงคำตอบที่ดีกว่า) จะได้รับการแทนที่สตริงคำตอบที่ให้ค่าแย่และคัดเลือกคำตอบนั้นออกไป กลยุทธ์ในการรักษาประชากรคำตอบ(Strategies to maintain elitist solutions in the population) เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดนี้จะทำการเก็บค่าคำตอบที่เป็น Non-dominated Solution และในระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบตั้งแต่การสร้างประชากรรุ่นพ่อแม่ (P_t) การสร้างประชากรรุ่นลูกด้วยวิธีการทางพันธุกรรม (Q_t) ในแต่ละเจนเนอเรชั่น จากนั้นจะนำประชากรรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกมารวมกันคือสถานที่รวมคำตอบ ($R_t = P_t + Q_t$) และเก็บคำตอบที่ได้จาก Non-dominated Solution โดยให้ความสำคัญกับสตริงคำตอบที่มีอันดับต่ำและมีค่า Crowding Distance มาก และทำการปรับปรุง(Update) สตริงคำตอบใหม่ในสถานที่เก็บคำตอบด้วยการย้ายสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิมออกไป และเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดใหม่เข้ามา ดังรูป



รูปที่ 7.9 วิธีการเก็บค่าที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II ในขั้นตอนของอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บไว้จะกลายเป็นสตริงคำตอบเริ่มตรงในการคัดเลือกสตริงคำตอบในขั้นตอนที่ 7.7.14 - 7.7.16

7.7.19 หยุดกระบวนอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

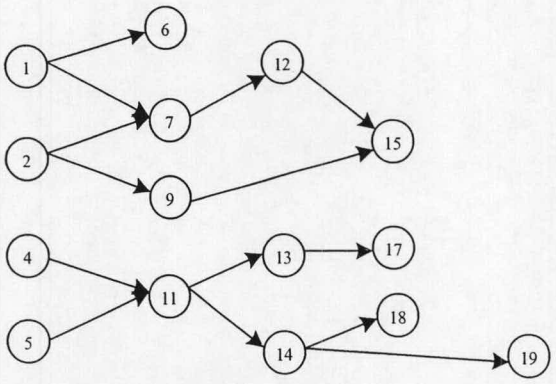
ถ้าจำนวนเจนเนอเรชั่นของการคำนวณแบบอัลกอริทึมNSGA-II หรือ M-NSGA-II เท่ากับที่เรากำหนดแล้ว สตริงคำตอบสุดท้ายที่ถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II หรือ M-NSGA-II จะเป็นสตริงคำตอบที่อยู่จากการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรอบ มาทำการ Non-dominated Sorting และทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ที่มีอันดับเท่ากับ 1 ทั้งหมด

7.8 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II ในการแก้ปัญหาสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยูผลิตภัณฑ์ผสม ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี

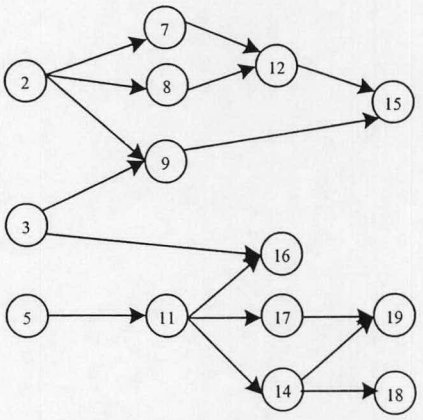
จากขั้นตอนของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II ที่ได้เสนอมาทั้งหมด สามารถนำมาทดลองใช้แก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Thomopoulos มีงานทั้งหมด 19 งาน จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ A, B และ C มีรอบเวลาในการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 2 ซึ่งมีความสัมพันธ์ของแต่ละงานดังนี้

7.8.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

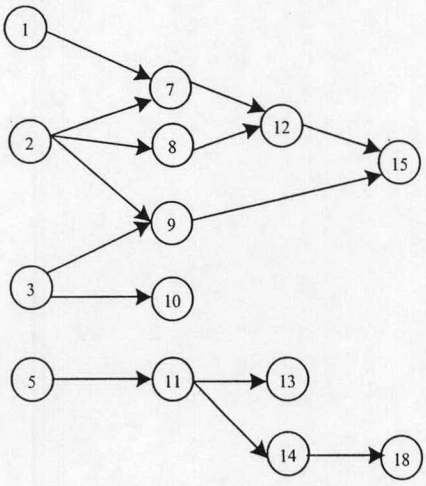
7.8.1.1 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) แสดงได้ดังรูปที่ 7.10



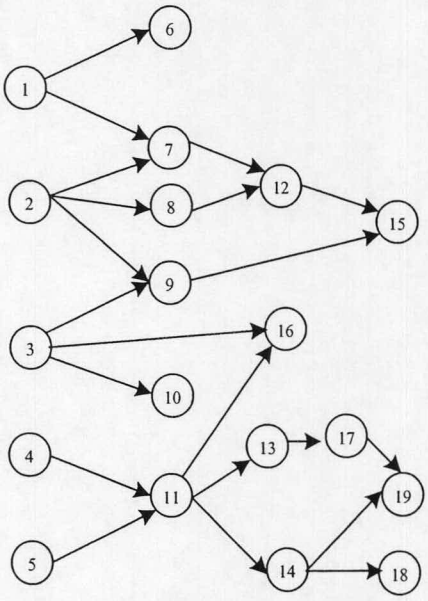
แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ C



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A, B และ C

รูปที่ 7.10 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 19 ขั้นงาน

7.8.1.2 **การหาเวลาทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน** ซึ่งสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เวลาในการผลิตสินค้าชนิด A B และ C ในแต่ละขั้นงาน

Task	Model			
	A	B	C	Mean
1	0.1	0	0.1	0.0667
2	1.2	1.2	1.2	1.2
3	0	0.4	0.4	0.2667
4	0.4	0	0	0.1333
5	0.2	0.2	0.2	0.2
6	0.2	0	0	0.0667
7	0.6	0.6	0.6	0.6
8	0	0.5	0.5	0.3333
9	0.4	0.4	0.4	0.4
10	0	0	0.2	0.0667
11	0.3	0.3	0.3	0.3
12	0.5	0.5	0.5	0.5
13	0.1	0	0.1	0.0667
14	0.2	0.2	0.2	0.2
15	1.5	1	1.5	1.3333
16	0	0.1	0	0.0333
17	0.5	0.5	0	0.3333
18	0.5	0.5	0.5	0.5
19	0.4	0.4	0	0.2667

7.8.1.3 **สร้างตาราง** Precedence Matrix Font **และ** Precedence Matrix Back **จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม** รูปที่ 7.10 จะได้ดังตารางที่ 7.2-7.3

ตารางที่ 7.2 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 7.3 ความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0

7.8.1.4 **พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II ที่เลือกใช้คือ**

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รอบเวลาในการทำงาน(Cycle Time) เท่ากับ 2
- ฮิวริสติกในการเลือกงานวิธีแบบสุ่ม(Random Priority)
- จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2
- ค่าให้รางวัล(Reward)และค่าลงโทษ(Punish)เท่ากับ 0.1
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight mapping crossover (WMX)
- วิธีการมิวเตชั่นแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ 0.8
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชั่น 0.2
- ความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ 0.2

7.8.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างประชากรเบื้องต้นโดยใช้ตัวดำเนินการ ขั้นตอนนี้จะทำการเลือกขั้นงานมาจากตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) เพื่อใช้ในการเลือกงานอันดับแรกที่จัดถูกเลือก ดังนั้นจึงจะต้องทำการสร้างตารางความน่าจะเป็นทั้งสองตารางก่อน

สร้างตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ $1\times n=1\times 19$ โดย n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด และมีค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเท่ากันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ $1/n=1/19=0.0526$ ดังตารางที่ 7.5

สร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ $n\times n=19\times 19$ โดย n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด โดยเส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 หมดและพิจารณาจากความสัมพันธ์ก่อนหลัง ตัวอย่างเช่น ขั้นงานที่ 6 ตำแหน่งที่ 6,6 ในตารางค่าความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) จะมีค่าเท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า ตารางที่ พบว่าขั้นงานที่ 6 จะทำได้ก็ต่อเมื่องานที่ 1 ต้องทำเสร็จก่อนดังนั้นขั้นงานที่ 6 จะถูกสุ่มเลือกก่อนขั้นงานที่ 1 ไม่ได้ ตำแหน่งที่ (6,1) จึงกำหนดให้มีความน่าจะเป็นเท่ากับ 0 ดังนั้นค่าที่เหลือในแถวที่ 6 จะมีค่าเท่ากับ $1/m=1/17=0.0588$

กำหนดให้ m คือจำนวนตำแหน่งรวมตามแถวที่ยังไม่มีการกำหนดค่า เช่นเดียวกับขั้นงานที่ 7 ที่มีค่าตำแหน่ง (7,7) เท่ากับ 0 และจะทำขั้นงานที่ 7 ได้ ต้องทำงานที่ 1 และ 2 ก่อน จึงกำหนดให้ตำแหน่ง(7,1) และ (7.2) เท่ากับ 0 ค่าที่เหลือในแถวที่ 7 จะเท่ากับ $1/m = 1/16 = 0.0625$

ตารางที่ 7.4 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ในปัญหาตัวอย่าง 19 ขั้นงาน

0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0.0556	0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0.0625	0.0625	0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588
0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588
0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0	0.0625	0

ตารางที่ 7.5 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ในปัญหาตัวอย่าง 19 ขั้นงาน

0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526

การสุ่มเลือกขั้นงานจากตารางความน่าจะเป็นทั้งสอง จะทำการสุ่มเลือกขั้นงานอันดับแรกจากตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรกเสียก่อน โดยจะพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า โดยดูจากผลรวมของคอลัมน์ที่มีค่าเท่ากับ 0 ในตัวอย่างนี้พบว่าขั้นงานที่สามารถถูกเลือกลงอันดับแรกมีทั้งหมด 5 ขั้นงานได้แก่ งานที่ทำข้างหน้า (Forward work) คือ 1,2,3,4 และ 5 โดยมีความน่าจะเป็นเท่ากันหมดคือ0.05266 สมมติสุ่มได้งานที่ 1 จะทำการปรับปรุงตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า โดยให้แถวที่ 1 เท่ากับ 0 ทั้งหมด และให้คอลัมน์ที่ 1 เท่ากับ 1 ทั้งหมด เช่นเดียวกับตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหลัง โดยให้คอลัมน์ที่ 3 เท่ากับ 1 ทั้งหมด จะได้สตริงคำตอบที่จะมีลำดับขั้นงาน ในสตริงคำตอบที่ 1 คือ 1,6,3,10,4,5,11,13,2,16,8,7,12,9,15,14,,17,18 และ 19 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.6 การคัดเลือกงานลงสตริงคำตอบ

No.	TASK(Font)	Task Sequence
1	1,2,3,4,5	1
2	2,3,4,5,6	6
3	2,3,4,5	3
4	2,4,5,10	10
5	2,4,5	4
6	2,5	5
7	2,11	11
8	2,13,14,16	13
9	2,14,16,17	2
10	7,8,9,14,16,17	16
11	7,8,9,14,17	8
12	9,14,17	7
13	9,12,14,17	12
14	9,14,17	9
15	14,15,17	15
16	14,17	14

ตารางที่ 7.6 การคัดเลือกงานลงสตริงคำตอบ (ต่อ)

No.	TASK(Font)	Task Sequence
17	17,18	17
18	18	18
19	19	19

ซึ่งสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นมามีจำนวนเท่ากับ $popsize = 5$ ตัว ได้สตริงคำตอบทั้งหมดดังนี้

String 1 = [1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19]

String 2 = [2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]

String 3 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

String 4 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]

String 5 = [3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

7.8.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริงคำตอบที่ได้จะทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนสถานีงานมีจำนวนน้อยที่สุด งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุดและความผันแปรของเวลาในสถานีงานทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด เพื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงของสตริงคำตอบ มีวิธีดังนี้

กำหนดให้ m คือ สถานีงาน

SN_k คือ จำนวนการเชื่อมต่อการทำงานในสถานีงาน k

$S_{\max}$ คือ เวลารวมที่สูงที่สุดในสถานีงาน

S_k คือ เวลารวมในสถานีงาน k

1 เพื่อให้มีจำนวนสถานีทำงานน้อยที่สุด

$$f_1(X) = Minimum\ m$$

2 เพื่อให้งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

$$f_2(X) = Minimum\ \ relatedness = Minimum\ \ m - m \Big/ \sum_{k=1}^{m} SN_k$$

3 เพื่อหาค่าต่ำสุดของค่าการกระจายภาระงานในแต่ละสถานีงาน

$$f_3(X) = Minimum\ SI = Minimum \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(S_{\max} - S_k)^2 \Big/ m}$$

ขั้นงานที่จะถูกเลือกมาทำการพิจารณาฮิวริกติกจะใช้วิธีการเลือกงานจากข้างหน้าและข้างหลังในลักษณะหักงอเส้นตรง ของสตริงคำตอบ จากสตริงคำตอบที่ 1 จะใช้ฮิวริกติกในการเลือกงานแบบ วิธีสุ่มเลือกขั้นงาน (Random Priority)

งานที่ถูกเลือกมาในการพิจารณาครั้งที่ 1 ของสตริงคำตอบที่ 1 คืองาน 1 และ 19 ทำการสุ่มเลือกงานที่จะจัดสรรลงสถานีงานที่ 1 สมมติสุ่มได้ ขั้นงานที่ 19 เวลารวมในสถานีงานที่ 1 เท่ากับ 0.2667 งานถัดไปที่จะทำการเลือกลงสถานีงานที่ 1 คือขั้นงาน 1 และ 18 สมมติสุ่มได้ขั้นงานที่ 18 การพิจารณาลงสถานีงานที่ 1 ซึ่งเมื่อจัดสรรลงสถานีงานที่ 1 พบว่าเวลารวมในสถานีงานยังไม่เกินรอบเวลาในการทำงานจึงยอมรับให้ขั้นงานที่ 18 อยู่ในสถานีงานีที่ 1 เวลารวมในสถานีงานที่ 1 เท่ากับ 0.7667 ทำจนกว่างานทุกงานจะถูกจัดให้กับสถานีทำงานจนหมดจะได้สถานีงานทั้งหมด 4 สถานี ดังนี้

$$f_1(x) = Workstation = m = 4$$

สถานีงานที่ 1 มีงาน 14, 17, 18 และ 19 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.3

สถานีงานที่ 2 มีงาน 9 และ 15 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.733

สถานีงานที่ 3 มีงาน 1,3,6,7,8,10 และ 12 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.900

สถานีงานที่ 4 มีงาน 2,4,5,11,13 และ 16 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.933

ในส่วนการหาค่าวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่ามีวิธีการคำนวณดังนี้

สถานีงานที่ 1 มีเครือข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีคือ 14-17-18-19 มีค่าเท่ากับ 1

สถานีงานที่ 2 มีเครือข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีคือ 9-15 มีค่าเท่ากับ 2

สถานีงานที่ 3 มีเครือข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีคือ 1-6-7-8-12,3-10 มีค่าเท่ากับ 2

สถานีงานที่ 4 มีเครือข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีคือ 2,4-5-11-13-16 มีค่าเท่ากับ 1

ดังนั้น

$$f_2(x) = WR = m - \frac{m}{\sum_{k=1}^{m} SN_k}$$

$$f_2(x) = WR = 4 - \frac{4}{1+2+2+1}$$

$$f_2(x) = WR = 3.3333$$

วัตถุประสงค์ที่ 3 เพื่อหาค่าการกระจายภาระงานในแต่ละสถานีงาน มีวิธีการคำนวณดังนี้

$$f_3(x) = SI = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m}(S_{\max} - S_k)^2}{m}}$$

$$f_3(x) = SI = \sqrt{\frac{(1.933-1.3)^2 + (1.933-1.733)^2 + (1.933-1.9)^2 + (1.933-1.933)^2}{4}}$$

$$f_3(x) = SI = \sqrt{\frac{0.441788}{4}} = 0.3325$$

สรุปได้ว่า String 1 = [1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19]

Workstation 1 = [3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 2 2 1 1 1 1]

สถานีงานที่ 1 มีงาน 14, 17, 18 และ 19 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.3

สถานีงานที่ 2 มีงาน 9 และ 15 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.733

สถานีงานที่ 3 มีงาน 1,3,6,7,8,10 และ 12 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.900

สถานีงานที่ 4 มีงาน 2,4,5,11,13 และ 16 เวลารวมในสถานีงานเท่ากับ 1.933

จากสตริงคำตอบทั้งหมด 5 ตัว ได้ค่าจากการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในตารางที่ 7.7

String 1 = [1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19]

String 2 = [2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]

String 3 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

String 4 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]

String 5 = [3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

Workstation 1 = [3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 2 2 1 1 1 1]

Workstation 2 = [2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 1]

Workstation 3 = [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]

Workstation4 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 2 2 2]

Workstation 5 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 2]

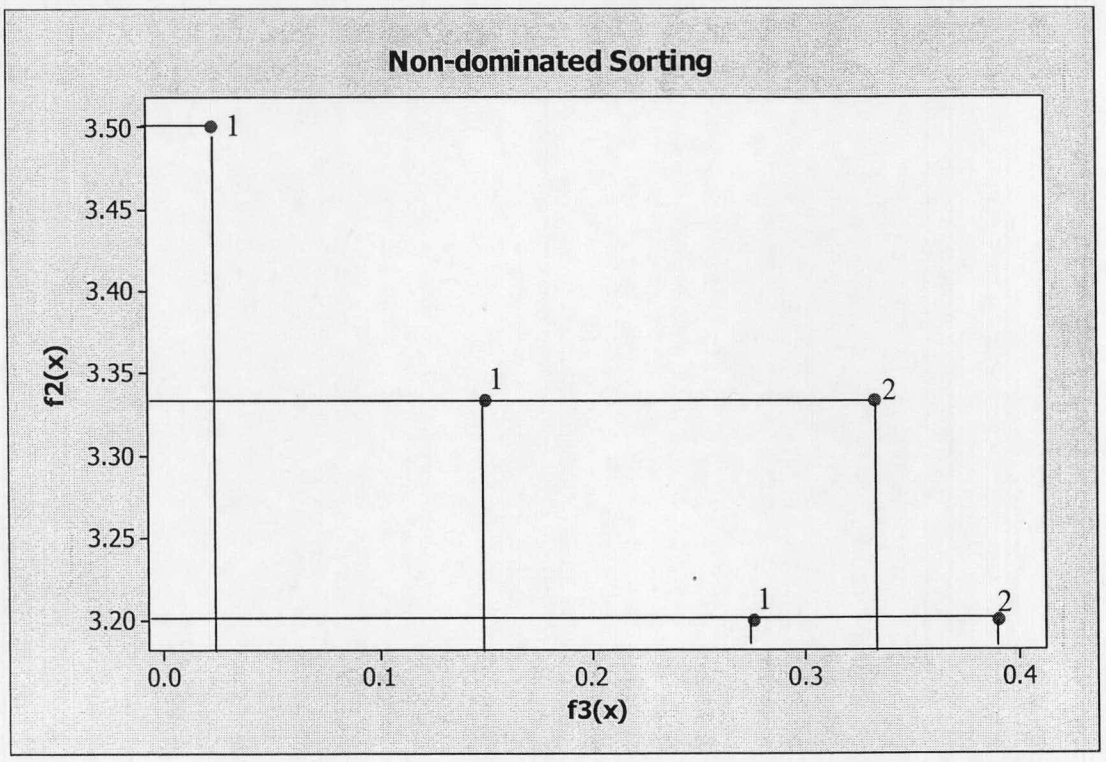
ตารางที่ 7.7 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
1	4	3.3333	0.3325
2	4	3.2000	0.3902
3	4	3.5000	0.0236
4	4	3.2000	0.2759
5	4	3.3333	0.1509

หมายเหตุ วัตถุประสงค์ที่ 1 หรือจำนวนสถานีงาน สามารถคำนวณได้จากค่าในวัตถุประสงค์ที่ 2 หรือผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน โดยการปัดเศษขึ้นเป็นจำนวนจริง ตัวอย่างเช่น 3.20 แสดงว่ามีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 สถานีงาน

7.8.4 กำหนดค่าความแข็งแรงวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดี (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่า Dummy Fitness เนื่องจากค่าจำนวนสถานีงานของสตริงคำตอบเท่ากันหมดจึงไม่ทำการพิจารณาวัตถุประสงค์นี้ จะได้ค่าดังรูปที่ 7.11 และตารางที่ 7.8



รูปที่ 7.11 ค่า Dummy Fitness วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg

ตารางที่ 7.8 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness
1	3.3333	0.3325	2
2	3.2	0.3902	2
3	3.5	0.0236	1
4	3.2	0.2759	1
5	3.3333	0.1509	1

7.8.5 การคำนวณค่าความหนาแน่น

จะเป็นการคำนวณหลังจากการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง(Dummy Fitness) เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และคำตอบที่แย่ (Bad Solution) การคำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance

การคำนวณจะทำหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าวัตถุประสงค์ทั้ง 2 วัตถุประสงค์ ซึ่งกำหนดให้ $f_2^{\max}, f_2^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่มีค่าสูงสุดสุดและต่ำสุดตามลำดับ

$f_3^{\max}, f_3^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 ที่มีค่าสูงสุดสุดและต่ำสุดตามลำดับ

ในการคำนวณหาค่า Crowding Distance จะทำการพิจารณาที่ละ Front ดังนั้นในที่นี้จะทำการพิจารณาที่ Front ที่ 1 ก่อน

จากตารางที่ 7.8 ทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 และ 3 ที่มีค่าสูงสุดและต่ำที่สุด จะมีค่าดังนี้ $f_2^{\max}=3.5$, $f_2^{\min}=3.2$, $f_3^{\max}=0.3902$ และ $f_3^{\min}=0.0236$ จากนั้นจะทำการเรียงค่าที่อยู่ใน Front ที่ 1 โดยเรียงค่าวัตถุประสงค์ที่ 2 จากน้อยไปหามากได้

ตารางที่ 7.9 การเรียงลำดับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ใน Front ที่ 1

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	i
4	3.2	0.2759	1	1
5	3.3333	0.1509	1	2
3	3.5	0.0236	1	3

จากตารางที่ 7.9 สมาชิกคำตอบที่มีลำดับที่ 1 ($i=1$) หรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และลำดับสุดท้าย ($i=3$) หรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด คำตอบสองคำตอบนี้จะถือว่ามีค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity) ส่วนลำดับที่เหลือจะทำการคำนวณหา Crowding Distance ซึ่งในที่นี้คือลำดับที่ 2

โดยคำนวณที่ลำดับที่ 2 ได้ค่าดังนี้

$$cd_1\left(x_{[2,2]}\right)=\left|\frac{f_2\left(x_{[2+1,2]}\right)-f_2\left(x_{[2-1,2]}\right)}{f_2^{\max}-f_2^{\min}}\right|$$

$$cd_1\left(x_{[2,2]}\right)=\left|\frac{3.5-3.2}{3.5-3.2}\right|=\left|\frac{0.3}{0.3}\right|=1$$

และ

$$cd_2(x_{[2,3]}) = \left| \frac{f_3(x_{[2+1,3]}) - f_3(x_{[2-1,3]})}{f_3^{\max} - f_3^{\min}} \right|$$

$$cd_2(x_{[2,3]}) = \left| \frac{0.0236 - 0.2759}{0.3902 - 0.0236} \right| = \left| \frac{-0.2523}{0.3666} \right| = 0.6882$$

ลำดับที่ 2 จะมีค่า Crowding Distance เท่ากับ $1 + 0.6882 = 1.6882$

ในส่วนค่า Crowding Distance ของ Front ที่ 2 มีสองค่าจึงกำหนดให้มีค่าเป็นอนันต์ (infinity) ได้เลย ดังนั้นค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว มีค่าดังตาราง

ตารางที่ 7.10 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.3325	2	Infinity
2	3.2	0.3902	2	Infinity
3	3.5	0.0236	1	Infinity
4	3.2	0.2759	1	Infinity
5	3.3333	0.1509	1	1.6882

7.8.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่มีการกำหนดค่าความแข็งแรงและ Crowding Distance เรียบร้อยแล้ว จะนำมาทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีคำตอบดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่คำตอบแย่ดี (Bad Solution) จะทำการคัดเลือกจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เท่ากับ 20% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือเท่ากับ $0.2 \times 5 = 1$ ตัว การเลือกสตริงคำตอบจะเลือกสตริงคำตอบที่มีคำตอบดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่คำตอบแย่ดี (Bad Solution) อย่างละ 1 ตัว เพื่อทำปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นทั้งสองตาราง ดังนั้นสตริงคำตอบที่ทำการเลือกในตัวอย่างนี้คือ

ตารางที่ 7.11 สตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกเป็นสตริงคำตอบที่ให้คำตอบที่ดีและแย่

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
4	3.2	0.2759	1	Infinity	
3	3.5	0.0236	1	Infinity	Good Solution*
5	3.3333	0.1509	1	1.6882	
2	3.2	0.3902	2	Infinity	
1	3.3333	0.3325	2	Infinity	Bad Solution*

*หมายเหตุ กรณีการเลือกสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ (Bad Solution) มีค่าความแข็งแรงและ Crowding Distance เท่ากัน จะใช้วิธีการสุ่มเลือก สมมติสุ่มได้สตริงคำตอบที่ 3 เป็นสตริงคำตอบที่ได้คำตอบที่ดีและ 1 เป็นสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่

7.8.7 ปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็น

การปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็น เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เพื่อเพิ่มหรือให้รางวัล(Reward) โอกาสความน่าจะเป็นในการเลือกงานที่ลงสตริงคำตอบ แล้วทำให้ได้คำตอบที่ดี และลดหรือลงโทษ (Punish) ค่าความน่าจะเป็นเพื่อไม่ให้ในรอบถัดไปถูกเลือกงานที่ทำให้สตริงคำตอบมีคำตอบที่แย่

จากสตริงคำตอบที่คัดเลือก สตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี(Good Solution) เป็นสตริงคำตอบที่ 4 และสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ (Bad Solution) เป็นสตริงคำตอบที่ 2 คือ

String 3 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15] เป็น Good Solution

String 1 = [1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19] เป็น Bad Solution

7.8.7.1 กรณีสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี (Good Solution)

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ซึ่งขั้นงานอันดับแรกที่ทำถูกเลือกลงสตริงคำตอบคือ ขั้นงานที่ 4 ในสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี จะทำการให้รางวัล (Reward) หรือเพิ่มค่าที่ตำแหน่ง (1,4) เท่ากับ

$\frac{k}{n} = \frac{0.1}{19} = 0.0053$ และหักค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในตำแหน่ง (1,1),(1,2),..., (1,19) จะต้องเสีย ค่ามาให้รางวัลกับคู่ลำดับ (1,4) เท่ากับ $\frac{k}{(n)^2} = \frac{0.1}{361} = 0.00028$ จะมีค่าดังนี้

คู่ลำดับที่มีการให้รางวัล

ตำแหน่งที่ (1, 4) มีการให้รางวัลเท่ากับ $0.0526 + 0.0053 = 0.0579$

คู่ลำดับที่มีการเสียค่า

ตำแหน่งที่ (1, 1) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 2) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 3) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 4) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0579 - 0.00028 = 0.05762$

ตำแหน่งที่ (1, 5) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 7) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 8) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 9) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 10) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 11) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 12) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 13) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 14) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 15) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 16) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 17) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 18) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ตำแหน่งที่ (1, 19) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0526 - 0.00028 = 0.05232$

ต่อจากนั้นจะทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) จะ ซึ่งขั้นงานที่ทำถูกเลือกลงสตริงคำตอบคือ (4, 1), (1, 6), (6, 5), ..., (9,15) ในสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี จะทำการให้รางวัล (Reward) หรือเพิ่มค่า พิจารณาคู่อันดับแรกคือตำแหน่ง (4,1) เท่ากับ $\frac{k}{m}=\frac{0.1}{18}=0.0056$ และหักค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในแถวที่ 4 ทั้งหมด ยกเว้นที่คอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0 จะต้องเสียค่ามาให้รางวัลกับคู่ลำดับ (4,1) เท่ากับ $\frac{k}{(m)^2}=\frac{0.1}{(18)^2}=\frac{0.1}{324}=0.00031$

คู่ลำดับที่มีการให้รางวัล

ตำแหน่งที่ (4, 1) มีการให้รางวัลเท่ากับ $0.0556+0.0056=0.0612$

คู่ลำดับที่มีการเสียค่า

ตำแหน่งที่ (4, 1) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0612-0.00031=0.06089$

ตำแหน่งที่ (4, 2) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 3) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 4) ไม่มีการให้ลดค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (4, 5) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 6) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 7) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 8) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 9) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 10) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 11) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 12) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 13) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 14) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 15) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 16) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 17) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 18) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (4, 19) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

คู่อันดับสองคือตำแหน่ง (1, 6) เท่ากับ $\frac{k}{m}=\frac{0.1}{18}=0.0056$ และหักค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในแถวที่ 1 ทั้งหมด ยกเว้นที่คอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0 จะต้องเสียค่ามาให้รางวัลกับคู่ลำดับ (1,6) เท่ากับ $\frac{k}{(m)^2}=\frac{0.1}{(18)^2}=\frac{0.1}{324}=0.00031$

คู่ลำดับที่มีการให้รางวัล

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้รางวัลเท่ากับ $0.0556+0.0056=0.0612$

คู่ลำดับที่มีการเสียค่า

ตำแหน่งที่ (1, 1) ไม่มีการให้ลดค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (1, 2) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 3) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 4) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 5) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0612-0.00031=0.06089$

ตำแหน่งที่ (1, 7) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 8) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 9) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 10) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 11) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 12) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 13) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 14) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 15) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 16) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 17) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 18) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ตำแหน่งที่ (1, 19) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0556-0.00031=0.05529$

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) จนครบคู่ลำดับของสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี ดังตารางที่ 7.12-7.13

ตารางที่ 7.12 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี

0	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0608	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552
0.0552	0	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0608	0.0552
0.0552	0.0552	0	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0608	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552
0.0608	0.0552	0.0552	0	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552
0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0608	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552	0.0552
0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0644	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585
0	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0684	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621
0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0644
0.0621	0	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0684	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621
0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0644	0.0585	0.0585	0.0585
0.0621	0.0621	0.0621	0	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0684	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621
0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0	0.0684	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621
0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0	0.0644	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585
0.0585	0.0585	0.0644	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585
0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0684	0.0621	0.0621
0.0585	0.0644	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585
0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0644	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585	0.0585	0.0585	0	0.0585
0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0684	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0	0.0621	0

ตารางที่ 7.13 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี

0.0523	0.0523	0.0523	0.0576	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523	0.0523

7.8.7.2 กรณีสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ (Bad Solution)

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี ในตารางที่ 7.12-7.13 ซึ่งขั้นงานอันดับแรกที่ทำถูกเลือกลงสตริงคำตอบคือ ขั้นงานที่ 2ในสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ จะทำการลงโทษ (Punish) หรือลดค่าที่ตำแหน่ง (1,1) เท่ากับ $\frac{k}{n}=\frac{0.1}{19}=0.0053$ และเพิ่มค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในตำแหน่ง (1,1),(1,2),..., (1,19) ที่ได้จากการหักค่าลงโทษคู่ลำดับ (1,1) เท่ากับ $\frac{k}{(n)^2}=\frac{0.1}{361}=0.00028$ จะมีค่าดังนี้

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ

ตำแหน่งที่ (1, 1) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0523-0.0053=0.047$

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที่ (1, 1) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.047+0.00028=0.04728$

ตำแหน่งที่ (1, 2) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 3) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 4) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0576+0.00028=0.05788$

ตำแหน่งที่ (1, 5) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 7) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 8) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 9) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 10) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 11) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 12) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 13) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 14) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 15) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 16) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 17) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 18) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ตำแหน่งที่ (1, 19) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0523+0.00028=0.05258$

ต่อจากนั้นจะทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่ดี ในตารางที่ ซึ่งขั้นงานที่ทำถูกเลือกลงสตริงคำตอบคือ (1, 6), (6, 3), (10, 4), ..., (18, 19) ในสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ จะทำการลงโทษ (Punish) หรือลดค่า พิจารณาคู่อันดับแรกคือตำแหน่ง (1, 6) เท่ากับ $\frac{k}{m} = \frac{0.1}{18} = 0.0056$ และเพิ่มค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในแถวที่ 1 ทั้งหมด ยกเว้นที่คอลัมน์เป็นที่เป็น 0 ซึ่งจะต้องลดค่าจากการลงโทษคู่ลำดับ (1,6) เท่ากับ $\frac{k}{(m)^2} = \frac{0.1}{(18)^2} = \frac{0.1}{324} = 0.00031$

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0608 - 0.0056 = 0.0552$

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที่ (1, 1) ไม่มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (1, 2) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 3) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 4) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 5) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 6) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 7) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 8) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 9) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 10) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 11) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 12) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 13) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 14) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 15) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 16) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 17) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 18) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

ตำแหน่งที่ (1, 19) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0552 + 0.00031 = 0.05551$

คู่อันดับสองคือตำแหน่ง (6, 3) เท่ากับ $\frac{k}{m}=\frac{0.1}{17}=0.0059$ และเพิ่มค่าตำแหน่งของคู่ลำดับในแถวที่ 8 ทั้งหมด ยกเว้นที่คอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0 ซึ่งจะต้องลดค่าจากการลงโทษคู่ลำดับ (10, 2) เท่ากับ $\frac{k}{(m)^2}=\frac{0.1}{(17)^2}=\frac{0.1}{289}=0.00035$

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ

ตำแหน่งที่ (6, 3) มีการให้ลดค่าเท่ากับ $0.0585-0.0059=0.0526$

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที่ (6, 1) ไม่มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (6, 2) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 3) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0526+0.00035=0.05295$

ตำแหน่งที่ (6, 4) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 5) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0644+0.00035=0.06475$

ตำแหน่งที่ (6, 6) ไม่มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (6, 7) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 8) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 9) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 10) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 11) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 12) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 13) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 14) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 15) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 16) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 17) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 18) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ตำแหน่งที่ (6, 19) มีการให้เพิ่มค่าเท่ากับ $0.0585+0.00035=0.05885$

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) จนครบคู่ลำดับของสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ ดังตารางที่ 7.14-7.15

สังเกตได้ว่าตารางความน่าจะเป็นทั้งสองตารางหลังการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตาราง จะเห็นว่าคู่อันดับของขั้นงานที่อยู่ติดกันแล้วจะส่งผลทำให้สตริงคำตอบมีคำตอบที่ดีจะมีความน่าจะเป็นเข้าใกล้หรือลู่เข้าสู่ค่า 1 และจะมีโอกาสในการเลือกคู่อันดับขั้นงาน คู่นี้สูงในทุกๆ รอบการสุ่มเลือกขั้นงานที่ติดกัน คู่อันดับของขั้นงานที่อยู่ติดกันแล้วที่ทำให้ได้สตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่จะมีค่าน้อยจนลู่เข้าสู่ค่า 0 หรือ จะมีโอกาสน้อยมากในการสุ่มเลือกคู่อันดับของขั้นงานคู่นี้

ตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability) และ ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่ในรอบปัจจุบัน จะถูกเก็บไว้เพื่อนำไปใช้ในรอบจำนวนเจนเนอเรชั่นถัดไป เพื่อใช้การพิจารณาเลือกอันดับขั้นงานในการสร้างสตริงคำตอบ

ตารางที่ 7.14 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่

0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.05	0.0556	0.0611	0.0556
0.0556	0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0611	0.0556	0.0556	0	0.05	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556	0.0556
0	0.0588	0.0529	0.0588	0.0647	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0529	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0647
0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0.0588	0	0.0529	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0647	0.0588	0.0588	0.0588
0.0625	0.0625	0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
0.0588	0.0529	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0	0.0647	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588
0.0588	0.0588	0.0647	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0529	0.0588	0.0588
0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629	0	0.0629	0.0629	0	0.0629	0.0566	0	0.0629	0.0629	0.0629	0.0629
0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0.0563	0.0625	0.0625	0	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625	0	0.0688	0.0625	0.0625
0.0588	0.0647	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0529	0.0588
0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0647	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0588	0.0588	0.0588	0	0.0529
0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0684	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0.0621	0	0.0621	0.0621	0	0.0621	0

ตารางที่ 7.15 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่มีคำตอบที่แย่

0.0473	0.0526	0.0526	0.0579	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526	0.0526

7.8.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

นำสตริงคำตอบในรอบปัจจุบัน (Current Good String) และสตริงคำตอบที่ทำการจัดเก็บในรอบก่อนหน้า(Previous Best String) มาทำการรวมกันและหาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อทำการกำหนดค่าเชิงกลุ่ม หาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง(Dummy Fitness) โดยใช้วิธีแบบ Goldberg หรือ Non-dominated Sorting และหาความหนาแน่นแบบ Crowding Distance สตริงคำตอบที่มีอันดับหนึ่งจะมีโอกาสได้รับเลือกไปเป็นสตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บเป็นอันดับแรก และมีจับเก็บลดหลั่นลงมาตามอันดับที่ ถ้าจำนวนสตริงคำตอบในอันดับใดมีจำนวนน้อยกว่าสตริงคำตอบที่เหลืออยู่ จะคัดเลือกโดยการพิจารณา Crowding Distance ที่มีค่ามากและดำเนินการในขั้นตอนนี้จนกระทั่งครบจำนวน *popsize* ตัว จะถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่มีค่าที่ดีที่สุดในปัจจุบัน(Current Best String) ซึ่งสตริงคำตอบที่มีค่าที่ดีที่สุดในปัจจุบันจะกลายไปเป็นสตริงคำตอบที่มีค่าที่ดีที่สุดแต่ก่อน(Previous Best String) ในการพิจารณารอบถัดไป

ในตัวอย่างนี้สมมติให้สตริงคำตอบในรอบก่อนหน้าที่ถูกจัดเก็บไว้ มีจำนวนสตริงคำตอบทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ คือ

String 1 = [3 10 2 1 6 7 5 8 4 12 11 16 13 14 17 18 19 9 15]

String 2 = [3 10 2 9 5 8 1 6 7 12 15 4 11 16 13 14 18 17 19]

String 3 = [3 10 2 4 9 8 1 6 7 5 12 15 11 16 13 14 17 18 19]

String 4 = [4 2 1 6 3 7 8 10 12 5 9 15 11 13 14 17 18 19 16]

String 5 = [3 10 2 9 8 4 5 1 6 7 11 16 13 14 18 17 19 12 15]

Workstation 1 = [1 2 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 1 1]

Workstation 2 = [1 1 2 2 2 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 1 1 1 1]

Workstation 3 = [1 1 2 2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 1 1 1 1]

Workstation 4 = [1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4]

Workstation 5 = [2 2 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 2 2 2 2 1 1]

ตารางที่ 7.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงคจากสตริงคำตอบที่ถูกเก็บไว้ในรอบก่อนหน้า

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
1	4	3.3333	0.3851
2	4	3.4286	0.1929
3	4	3.5000	0.0707
4	4	3.5556	0.0236
5	4	3.3333	0.2819

สตริงคำตอบในรอบปัจจุบัน (Current Good String) มีทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ ดังนี้

String 1 = [1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19]

String 2 = [2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]

String 3 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

String 4 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]

String 5 = [3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

Workstation 1 = [3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 2 2 1 1 1 1]

Workstation 2 = [2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 1]

Workstation 3 = [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]

Workstation4 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 2 2 2]

Workstation 5 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 2]

ตารางที่ 7.17 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์สตริงคำตอบในรอบปัจจุบัน (Current Good String)

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
1	4	3.3333	0.3325
2	4	3.2000	0.3902
3	4	3.5000	0.0236
4	4	3.2000	0.2759
5	4	3.3333	0.1509

นำสตริงคำตอบที่ทำให้ได้คำตอบในรอบปัจจุบัน(Current Good String) 5 สตริงคำตอบมารวมกับสตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บไว้ในรอบก่อนหน้า (Previous Best String) จำนวน 5 สตริงคำตอบ ดังตารางที่ 7.18

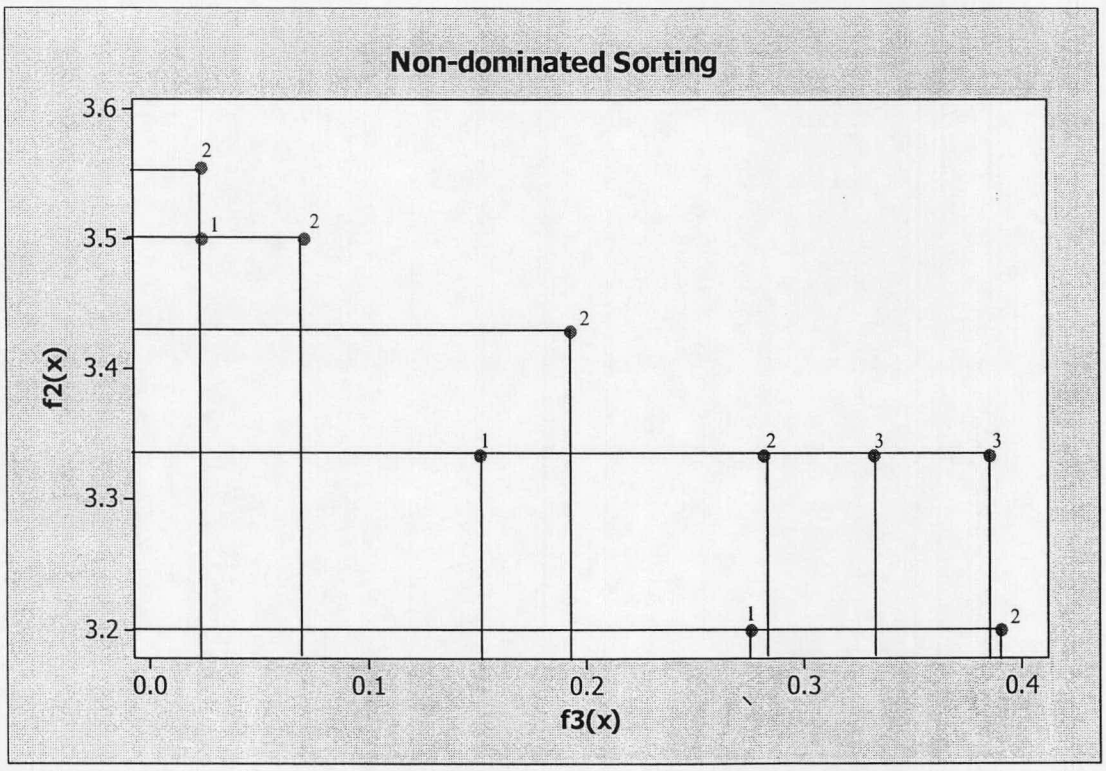
ตารางที่ 7.18 การรวมสตริงคำตอบในรอบปัจจุบันรวมกับสตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บไว้ในรอบก่อนหน้า

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String
Previous Best String	1	[3 10 2 1 6 7 5 8 4 12 11 16 13 14 17 18 19 9 15]
	2	[3 10 2 9 5 8 1 6 7 12 15 4 11 16 13 14 18 17 19]
	3	[3 10 2 4 9 8 1 6 7 5 12 15 11 16 13 14 17 18 19]
	4	[4 2 1 6 3 7 8 10 12 5 9 15 11 13 14 17 18 19 16]
	5	[3 10 2 9 8 4 5 1 6 7 11 16 13 14 18 17 19 12 15]
Current Good String	1	[1 6 3 10 4 5 11 13 2 16 8 7 12 9 15 14 17 18 19]
	2	[2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]
	3	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
	4	[3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]
	5	[3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด 10 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปกำหนดอันดับเชิงกลุ่มวิธี Non-dominated Sorting ดังตารางที่ 7.19-7.20 และรูปที่ 7.12

ตารางที่ 7.19 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ทำการรวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
Previous Best String	1	4	3.3333	0.3851
	2	4	3.4286	0.1929
	3	4	3.5000	0.0707
	4	4	3.5556	0.0236
	5	4	3.3333	0.2819
Current Good String	1	4	3.3333	0.3325
	2	4	3.2000	0.3902
	3	4	3.5000	0.0236
	4	4	3.2000	0.2759
	5	4	3.3333	0.1509



รูปที่ 7.12 การกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงในการคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อเก็บไว้ในรอบปัจจุบัน

ตารางที่ 7.20 สตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกจัดเก็บในรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
9	3.2	0.2759	1	Infinity	Select
8	3.5	0.0236	1	Infinity	Select
10	3.3333	0.1509	1	2	Select
7	3.2	0.3902	2	Infinity	Select
4	3.5556	0.0236	2	Infinity	Select
5	3.3333	0.2819	2	1.181	No Select
2	3.4286	0.1929	2	1.0449	No Select
3	3.5	0.0707	2	0.819	No Select
6	3.3333	0.3325	3	Infinity	No Select
1	3.3333	0.3851	4	Infinity	No Select

สตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บไว้ในรอบปัจจุบัน จะกลายไปเป็นสตริงคำตอบที่ถูกเก็บไว้ในรอบก่อนหน้าในเจนเนอเรชั่นต่อไป ถ้าเจนเนอเรชั่นในรอบนี้มีจำนวนเท่ากับเจนเนอเรชั่นสูงสุดของอัลกอริทึมการบรรจวบ สตริงคำตอบที่ถูกจัดเก็บไว้จะถูกส่งผ่านกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II ในที่นี้จะมีสตริงทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ ดังนี้

String 1 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]

String 2 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

String 3 = [3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

String 4 = [2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]

String 5 = [4 2 1 6 3 7 8 10 12 5 9 15 11 13 14 17 18 19 16]

Workstation 1 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 2 2 2]

Workstation 2 = [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]

Workstation 3 = [1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 2]

Workstation 4 = [2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 1]

Workstation 5 = [1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4]

7.8.9 ประเมินค่าในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

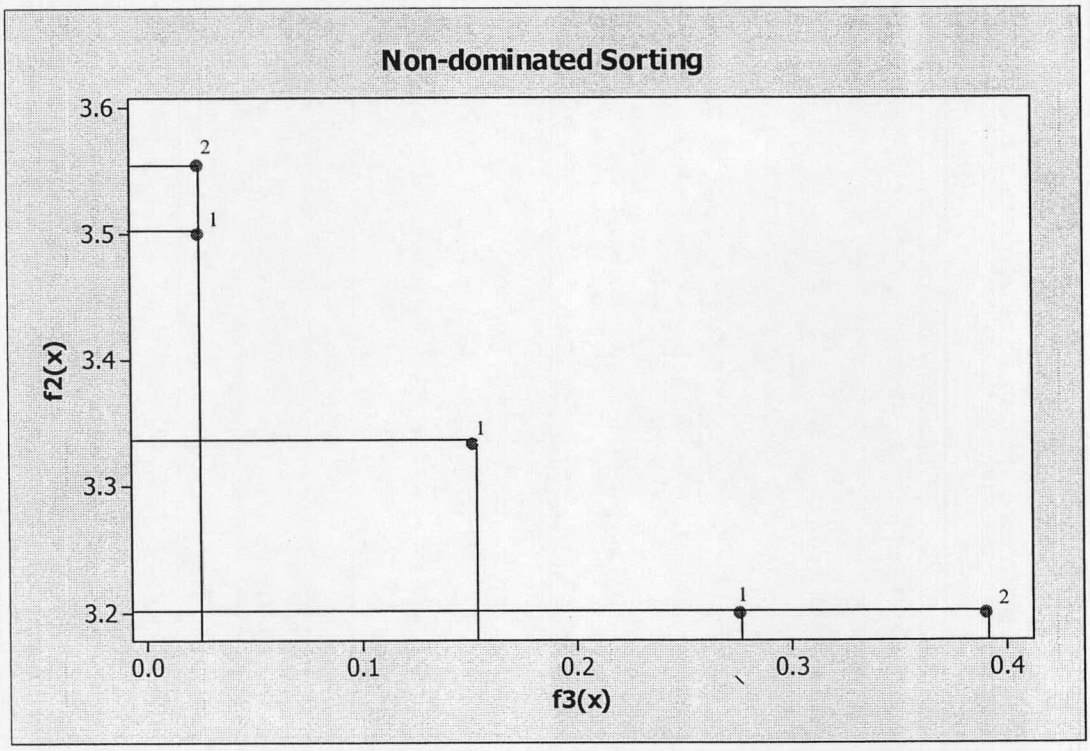
การประเมินค่าในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II มีการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เช่นเดียวกับอัลกอริทึมการบรรจวบ ซึ่งจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 7.21

ตารางที่ 7.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	จำนวน สถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ ในสถานีงาน	กระจายภาระงาน ในสถานีงาน
1	4	3.2	0.2759
2	4	3.5	0.0236
3	4	3.3333	0.1509
4	4	3.2	0.3902
5	4	3.5556	0.0236

7.8.10 กำหนดค่าความแข็งแรงวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II ดังตารางที่ 7.22 และรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 กำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)
ในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

ตารางที่ 7.22 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness
1	3.2	0.2759	1
2	3.5	0.0236	1
3	3.3333	0.1509	1
4	3.2	0.3902	2
5	3.5556	0.0236	2

7.8.11 การคำนวณค่าความหนาแน่นในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

จะใช้วิธีการ Crowding Distance เพื่อในการพิจารณาเลือกสตริงคำตอบ เมื่อสตริงคำตอบมีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเท่ากัน ค่า Crowding Distance ที่มีค่ามากจะมีถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่เหมาะสม ได้ค่าดังตารางที่ 7.23

ตารางที่ 7.23 ค่าCrowding Distance ของสตริงคำตอบในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.2	0.2759	1	infinity
2	3.5	0.0236	1	infinity
3	3.3333	0.1509	1	2
4	3.2	0.3902	2	infinity
5	3.5556	0.0236	2	infinity

7.8.12 การคัดเลือกสตริงคำตอบในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

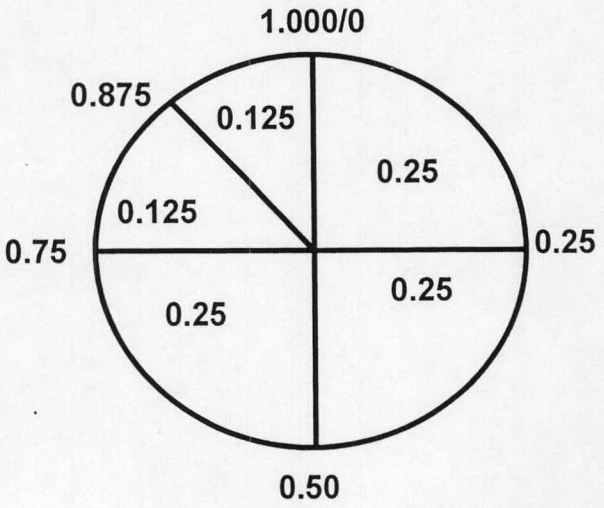
การคัดเลือกคำตอบที่จะเข้าไปทำการค้นหาเฉพาะที่จากการใช้ Binary tournament selection จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการหา Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่า Dummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามากและคำนวณหาค่า pi และ qi ซึ่งค่า qi คือค่า pi สะสม จากสตริงคำตอบที่ 1 มีค่า Dummy Fitness เท่ากับ 1 เปลี่ยนเป็นค่าเท่ากับ 2 และทำการหาค่า $p_1 = 2/8 = 0.25$ ดังตารางที่ 7.24-7.25 และรูปที่ 7.14

ตารางที่ 7.24 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

String No	WR	SI	Fitness Value	แปลง Fitness	Crowding Distance
1	3.2	0.2759	1	2	infinity
2	3.5	0.0236	1	2	infinity
3	3.3333	0.1509	1	2	2
4	3.2	0.3902	2	1	infinity
5	3.5556	0.0236	2	1	infinity

ตารางที่ 7.25 การสร้างวงล้อรูเล็ตในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

String No	แปลง Fitness	*pi*	*qi*
1	2	0.25	0.25
2	2	0.25	0.50
3	2	0.25	0.75
4	1	0.125	0.875
5	1	0.125	1
รวม	8	1	



รูปที่ 7.14 วงล้อรูเล็ตในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สุ่มเลือกสตริงคำตอบ 2 ตัวจากวงล้อรูเล็ตแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness มากกว่าเข้าสู่ Mating Pool ผลการคัดเลือกจะได้สตริงทั้ง 5 ตัวคือ สตริงหมายเลข 1 2 4 4 1 แสดงได้ดังตารางที่ 5.8 ซึ่งจะกลายเป็นสตริงหมายเลข 1-5 ตามลำดับเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 7.26 วิธี Binary Tournament Selection สำหรับการคัดเลือกสตริงคำตอบ

No.	Population 1				Population 2				N0_String
	r_1	$q_i > r_1$	String	Fitness	r_2	$q_i > r_2$	String	Fitness	Selected
1	0.6737	0.75	3	2	0.8632	0.875	4	1	3
2	0.5279	0.75	3	2	0.3401	0.50	2	2	2*
3	0.0582	0.25	1	2	0.9283	1	5	1	1
4	0.2823	0.50	2	2	0.0924	0.25	1	2	2**
5	0.1527	0.25	1	2	0.2849	0.50	2	2	2**

*หมายเหตุ สตริงคำตอบที่ 1 และ 5 มีค่า Fitness ที่มีการแปลงค่าเท่ากัน มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นจะพิจารณาเลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance ในที่นี้คือสตริงคำตอบที่ 2 มีค่าเป็นอนันต์ (Infinity)

**หมายเหตุ สตริงคำตอบที่ 1 และ 2 มีค่า Fitness ที่มีการแปลงค่าและ Crowding Distance ที่เท่ากัน จะเลือกสตริงคำตอบโดยวิธีสุ่มเลือก

7.8.13 การครอสโอเวอร์

ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการครอสโอเวอร์ โดยพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่ม r น้อยกว่าค่า Pc ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ $Pc = 0.8$ ดังนั้นสตริงที่จะถูกครอสโอเวอร์ จึงจะมีประมาณ 80% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือเท่ากับ $0.8 \times 5 = 4$ ตัว การสุ่มเลือกสตริงคำตอบแสดงได้ดังตารางที่ 7.27

ตารางที่ 7.27 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกไปทำครอสโอเวอร์

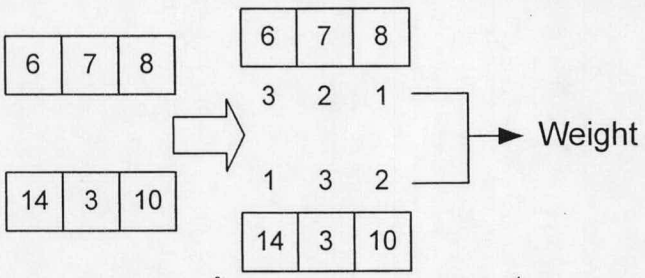
String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.8$
1	[3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]	0.421	Selected
2	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]	0.748	Selected
3	[3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]	0.023	Selected
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]	0.702	Selected
5	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]	0.957	-

จะได้สตริงตอบที่จะนำไปครอสโอเวอร์ คือสตริงหมายเลข 1 2 3 4 ซึ่งสามารถจับคู่ได้เป็น 1-2 หรือ 3-4 นำสตริงคู่แรกไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Weight mapping crossover (WMX) โดยสุ่มเลือกตำแหน่งการครอสโอเวอร์ 7 ถึง 9

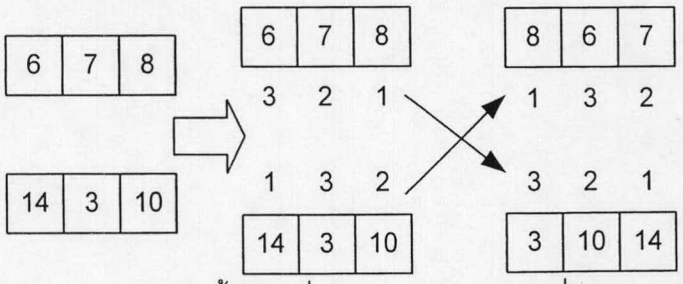
$$\text{parent } 1 = [3\ 10\ 2\ 5\ 9\ 1|6\ 7\ 8\ |12\ 4\ 11\ 16\ 14\ 13\ 17\ 19\ 18\ 15]$$

$$\text{parent } 2 = [4\ 1\ 6\ 5\ 11\ 13|14\ 3\ 10|16\ 17\ 2\ 18\ 8\ 19\ 7\ 12\ 9\ 15]$$

ทำการกำหนดค่าน้ำหนักในช่วง[7,9]ให้แก่สตริงพ่อแม่(Parent) ได้ดังรูปที่ 7.15



ก) กำหนดค่าน้ำหนักให้แก่สตริงพ่อแม่คู่ที่ 1 และ 2



ข) การสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยนค่าภายในโครโมโซมในสตริงคำตอบที่ 1, 2

รูปที่ 7.15 การครอสโอเวอร์วิธี Weight mapping crossover สตริงคำตอบคู่ที่ 1, 2

จะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก(Offspring) หลังจากการทำครอสโอเวอร์วิธี Weight mapping crossover (WMX) คือ

$$\text{offspring}\,1 = [3\ 10\ 2\ 5\ 9\ 1 | 8\ 6\ 7 | 12\ 4\ 11\ 16\ 14\ 13\ 17\ 19\ 18\ 15]$$

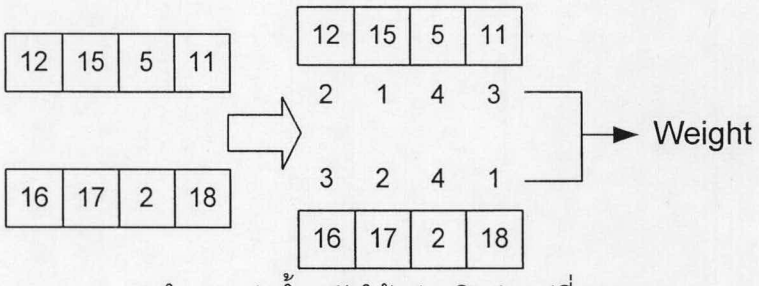
$$\text{offspring}\,2 = [4\ 1\ 6\ 5\ 11\ 13 | 3\ 10\ 14 | 16\ 17\ 2\ 18\ 8\ 19\ 7\ 12\ 9\ 15]$$

สตริงคำตอบที่ 3 และ 4 ไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Weight mapping crossover (WMX) โดยสุ่มเลือกตำแหน่งการครอสโอเวอร์ได้ที่ตำแหน่ง 10 และ 13

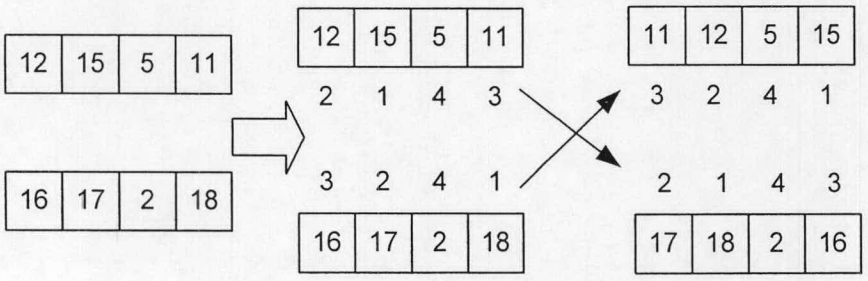
$$\text{parent}\,3 = [3\ 10\ 2\ 9\ 4\ 8\ 1\ 6\ 7 | 12\ 15\ 5\ 11 | 16\ 14\ 18\ 13\ 17\ 19]$$

$$\text{parent}\,4 = [4\ 1\ 6\ 5\ 11\ 13\ 14\ 3\ 10 | 16\ 17\ 2\ 18 | 8\ 19\ 7\ 12\ 9\ 15]$$

ทำการกำหนดค่าน้ำหนักในช่วง[10, 13] ให้แก่สตริงพ่อแม่ (Parent) ได้ดังรูปที่ 7.16



ก) กำหนดค่าน้ำหนักให้แก่สตริงพ่อแม่ที่ 3และ 4



ข) การสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยน
ค่าภายในโครโมโซมในสตริงคำตอบที่ 3, 4

รูปที่ 7.16 การครอสโอเวอร์วิธี Weight mapping crossover สตริงคำตอบคู่ที่ 3, 4

จะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก(Offspring) หลังจากการทำครอสโอเวอร์วิธี Weight mapping crossover (WMX) คือ

offspring 3 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7|11 12 5 15|16 14 18 13 17 19]

offspring 4 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10|17 18 2 16|8 19 7 12 9 15]

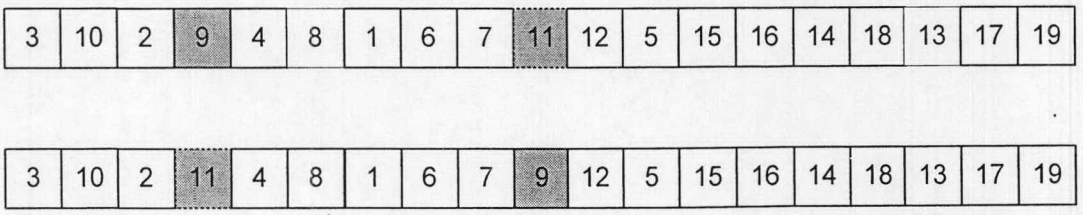
7.8.14 การมิวเตชั่น

ในที่นี้กำหนดให้ $Pm = 0.2$ ซึ่งทำให้สามารถคาดเดาได้ว่าน่าจะมีสตริงคำตอบ 20% หรือ $0.2 \times 5 = 1$ ตัว ที่จะถูกมิวเตชั่น สตริงตัวนี้จะได้มาจากการสุ่มค่า r ให้กับสตริงแต่ละตัว แล้วถ้าตัวใดที่ r น้อยกว่า Pm ก็จะถูกนำไปมิวเตชั่น ดังตารางที่ 7.28

ตารางที่ 7.28 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกไปทำการมิวเตชั่น

String No.	String	r_i	$r_i < 0.2$
1	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]	0.421	-
2	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]	0.748	-
3	[3 10 2 9 4 8 1 6 7 11 12 5 15 16 14 18 13 17 19]	0.023	Selected
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15	0.702	-
5	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]	0.957	-

สตริงคำตอบตัวที่ 3 เป็นสตริงคำตอบที่ถูกเลือกให้ทำการมิวเตชั่น โดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation เป็นการสลับตำแหน่งของตัวเลข 2 ตัวภายในสตริงคำตอบ โดยเริ่มจากการทำการสุ่มตัว 2 ตัวที่ไม่ซ้ำกัน สมมติสุ่มได้เลข 4 และ 10 จากนั้นทำการสลับตำแหน่งของตัวเลขทั้งสอง



รูปที่ 7.17 วิธี Reciprocal Exchange Mutation

จะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูกทั้งหมด 5 ตัว หลังการทำมิวเตชั่นเพื่อนำไปซ่อมแซมคำตอบหลังจากการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชั่น

ตารางที่ 7.29 สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการทำมิวเตชั่น

String No.	String
1	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
2	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
3	[3 10 2 11 4 8 1 6 7 9 12 5 15 16 14 18 13 17 19]
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15
5	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

7.8.15 การซ่อมแซมคำตอบ

สตริงคำตอบหลังจากการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชั่น มีการสลับปรับเปลี่ยนลักษณะคำตอบภายในสตริงคำตอบที่มีการเรียงลำดับการทำงานตาม ความสัมพันธ์ในการทำงาน (Precedence Constrains) ทำให้เกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) เนื่องจากภายในโครงสร้างภายในสตริงมีการเปลี่ยนแปลงลำดับขั้นงานมีการเปลี่ยนที่กัน ทำให้งานบางงานยังไม่สามารถเริ่มทำงานได้เนื่องจากงานก่อนหน้ายังไม่เสร็จ

การซ่อมแซมจะทำการพิจารณาลำดับขั้นงานที่สามารถถูกเลือกลงในสตริงคำตอบที่ละอันดับถ้างานไหนยังไม่สามารถถูกจัดลงสตริงได้จะทำการจัดสรรงานถัดไปลงในสตริงคำตอบก่อน และเก็บงานที่ยังไม่ได้ลงไว้พิจารณาในลำดับถัดไป โดยถ้างานที่ค้างสามารถลงในสตริงคำตอบได้ จะจัดสรรลงทันที จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่ 3 งานที่ 11 จะถูกจัดลงสตริงคำตอบอันดับที่ 4 ไม่ได้เนื่องจากงานที่ 11 จะสามารถทำได้ก็ต่อเมื่องานที่ 4 และ 5 ถูกจัดสรรลงก่อน จริงให้งานที่อยู่ในอันดับถัดไปถูกจัดสรรลงก่อน คืองานที่ 4 ซึ่งผลสุดท้ายงานที่ 11 จะถูกจัดลงในอันดับที่ 12 เนื่องจากที่อันดับที่ 12 มีงานที่สามารถจัดลงได้คือ 11 และ 15 จึงจัดงานที่ 15 ลงทันที ดังตารางที่ 7.30

ตารางที่ 7.30 การซ่อมแซมสตริงคำตอบหลังการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชั่น

No.	TASK(Font)	ก่อนซ่อมแซม	งานที่ค้างลง	หลังซ่อมแซม
1	1,2,3,4,5	3		3
2	1,2,4,5,10	10		10
3	1,2,4,5	2		2
4	1,4,5,8,9	11	11	4
5	1,5,8,9	4	11	8
6	1,5,9	8	11	1
7	5,6,7,9	1	11	6
8	5,7,9	6	11	7
9	5,9,12	7	11	9
10	5,12	9	11	12
11	5,15	12	11	5
12	11,15	5		11
13	13,14,15,16	15		15
14	13,14,16	16		16
15	13,14	14		14
16	13,18	18		18
17	13	13		13
18	17	17		17
19	19	19		19

สตริงคำตอบหลังการซ่อมแซม จะเป็นสตริงคำตอบที่จะนำไปพิจารณาในการจัดเก็บค่าที่ดีที่สุดในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 7.31 สตริงคำตอบก่อนทำการซ่อมแซม

String No.	String
1	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
2	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
3	[3 10 2 11 4 8 1 6 7 9 12 5 15 16 14 18 13 17 19]
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15
5	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

ตารางที่ 7.32 สตริงคำตอบหลังทำการซ่อมแซม

String No.	String
1	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
2	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
3	[3 10 2 4 8 1 6 7 9 12 5 11 15 16 14 18 13 17 19]
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15]
5	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

7.8.15 การค้นหาเฉพาะที่หลังการทำมิวเตชั่น (เป็นวิธีเฉพาะที่ใช้ในอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับอัลกอริทึม M-NSGA-II)

ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการค้นหาเฉพาะที่ โดยพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีค่า P_{LS} ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ $P_{LS} = 0.2$ ดังนั้นสตริงที่จะถูกทำการค้นหาเฉพาะที่ จึงจะมีประมาณ 40% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือเท่ากับ $0.2 \times 5 = 1$ ตัว

ทำการคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์เมื่อจัดขั้นงานลงสถานีงานโดยใช้วิธีฮิวริสติกแบบสุ่ม จะได้ตำแหน่งของขั้นงานดังตารางที่ 7.33-7.35

ตารางที่ 7.33 ตำแหน่งขั้นงานในสถานีงาน

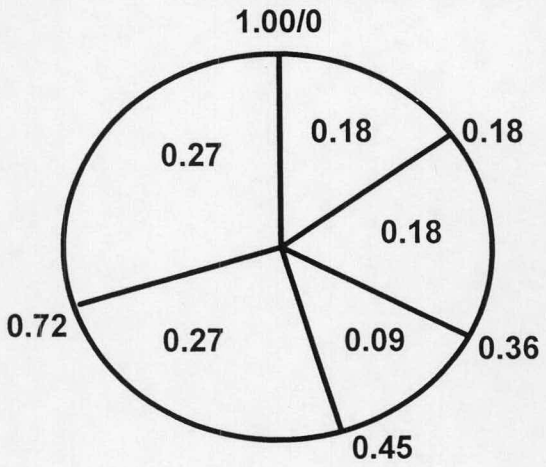
String No.	String
1	[2 2 3 3 4 4 4 5 4 4 3 2 2 2 2 1 1]
2	[1 2 2 2 3 4 5 5 4 4 4 3 3 2 2 2 1 1]
3	[1 1 2 3 3 3 4 4 5 4 4 3 2 2 2 2 1 1]
4	[1 2 2 2 2 3 4 4 4 4 4 3 3 3 2 2 2 1 1]
5	[1 1 1 2 2 2 3 3 3 3 4 3 3 2 2 2 1 1]

ตารางที่ 7.34 ค่าวัตถุประสงค์หลังทำการซ่อมแซมคำตอบสตริงและการแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

String No	WR	SI	Fitness Value	แปลง Fitness	Crowding Distance
1	4.6875	0.634	2	2	infinity
2	4.6667	0.923	2	2	infinity
3	4.7222	0.8477	3	1	infinity
4	3.75	0.3719	1	3	infinity
5	3.7143	0.423	1	3	infinity

ตารางที่ 7.35 การสร้างวงล้อรูเล็ตก่อนทำการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชั่น

String No	แปลง Fitness	*pi*	*qi*
1	2	0.18	0.18
2	2	0.18	0.36
3	1	0.09	0.45
4	3	0.27	0.73
5	3	0.27	1
รวม	11	1	



รูปที่ 7.18 วงล้อรูเล็ตก่อนทำการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชั่น

การสุ่มเลือกสตริงคำตอบ 1 ตัวจากวงล้อรูเล็ตแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้วิธี Binary Tournament Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness มากกว่า ผลการคัดเลือกจะได้สตริงทั้ง 1 ตัวคือ สตริงหมายเลข 5 แสดงได้ดังตารางที่ 7.36 ซึ่งจะกลายเป็นสตริงคำตอบหมายเลข 1 เข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 7.36 วิธี Binary Tournament Selection สำหรับการคัดเลือกสตริงคำตอบ

No.	Population 1				Population 2				N0_String
	r_1	$q_i > r_1$	String	Fitness	r_2	$q_i > r_2$	String	Fitness	Selected
1	0.8567	1	5	3	0.4187	0.6666	3	1	5

สตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกจะทำการค้นหาเฉพาะที่วิธี 2-opt โดยพิจารณาจากสตริงตัว 5 ทำการสุ่มตำแหน่งสองตำแหน่งเพื่อทำการแลกเปลี่ยนตำแหน่งกัน สมมติสุ่มได้ตำแหน่ง [10, 13] ในสตริงที่ 1 จะมีขั้นงานคือ 16 กับ 18 ทำการสลับแลกเปลี่ยนกันเป็น 16 กับ 18 และสลับเลขในตำแหน่งที่เหลือ ดังรูปที่ 7.19

Before Local Search 2-Opt

4	1	6	5	11	13	14	3	10	16	17	2	18	8	19	7	12	9	15

4	1	6	5	11	13	14	3	10	18	2	17	16	8	19	7	12	9	15

After Local Search 2-Opt

รูปที่ 7.19 การทำการค้นหาเฉพาะก่อนทำการคัดเลือกวิธี 2-Opt หลังมิวเตชั่น

ตารางที่ 7.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังการทำการค้นหาเฉพาะที่ก่อนทำการคัดเลือก

ลักษณะคำตอบ	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
ก่อนทำ	4	3.7143	0.423
หลังทำ	4	3.7333	0.4062

ในงานวิจัยนี้ใช้ 4 กฎในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งเฉพาะที่ เมื่อกำหนดให้ S เป็นคำตอบก่อนทำการค้นหาเฉพาะที่ และ S' เป็นคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่ โดยจะทำการยอมรับ $(accept(S,S'))$ ว่าคำตอบที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น ดังนี้ (Lacomme และ Prins และ Sevaux ,2005)

ตารางที่ 7.38 หลักการยอมรับ (Acceptance Rule)

กฎการยอมรับ	**เงื่อนไข**
กฎที่ 1	$(accept(S,S')) = f_1(S') - f_1(S) < 0$
กฎที่ 2	$(accept(S,S')) = f_2(S') - f_2(S) < 0$
กฎที่ 3	$(accept(S,S')) = f_1(S') - f_1(S) \le 0$ และ $f_2(S') - f_2(S) < 0$ หรือ $(accept(S,S')) = f_1(S') - f_1(S) < 0$ และ $f_2(S') - f_2(S) \le 0$
กฎที่ 4	$(accept(S,S')) = w_1 \cdot (f_1(S') - f_1(S)) + (1-w_1) \cdot (f_2(S') - f_2(S)) \le 0$

จากตารางที่ 7.38 สตริงคำตอบที่ 1 ที่ทำการเลือกมาหลังการทำค้นหาเฉพาะที่วิธี 2-Opt ก่อนทำการคัดเลือก เมื่อพิจารณาจากกฎการยอมรับที่ 1 พบว่าปฏิเสธ เนื่องจากค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่1 หลังทำการปรับปรุงคำตอบที่ได้นั้นจะมีคำตอบที่มีค่าที่ไม่ดีกว่าเดิม $(3.7143 - 3.7333 = 0.019 > 0)$ แต่เมื่อทำการพิจารณาในกฎการยอมรับที่ 2 $(0.423 - 0.4062 = -0.0168 < 0)$ พบว่ายอมรับสตริงคำตอบหลังทำการปรับปรุงคำตอบเป็นคำตอบที่ดีขึ้นกว่าสตริงคำตอบเดิม สตริงคำตอบที่ได้รับการทำการค้นหาเฉพาะที่ ที่ทำให้คำตอบยอมรับตามกฎการยอมรับทั้งสี่ข้อ จะได้ในตารางที่ 7.39

ตารางที่ 7.39 สตริงคำตอบที่ดีหลังจากการทำการค้นหาเฉพาะที่หลังมิวเตชั่น

String No.	String
1	[4 1 6 5 13 14 3 10 18 2 17 16 8 19 7 12 9 15]

นำสตริงคำตอบหลังการทำค้นหาเฉพาะที่จะมารวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้นทั้งหมดจำนวน 6 ตัว เพื่อมาทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงและ Crowding Distance

ตารางที่ 7.40 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงและ Crowding Distance หลังการทำการค้นหาเฉพาะที่หลังมิวเตชั่น

String No	WR	SI	Fitness Value	Crowding Distance
5	3.7143	0.423	1	Infinity
6	3.7333	0.4062	1	2
4	3.75	0.3719	1	Infinity
2	4.6667	0.923	2	Infinity
1	4.6875	0.634	2	Infinity
3	4.7222	0.8477	3	Infinity

สตริงคำตอบที่ถูกเลือกไปทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดมีจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น (Population Size) จำนวน 5 สตริงคำตอบ โดยจะเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุด (ค่า Fitness Value น้อย) จะได้สตริงคำตอบดังนี้

ตารางที่ 7.41 สตริงคำตอบหลังการทำการค้นหาเฉพาะที่

String No.	String
1	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
2	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
3	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15]
4	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
5	[4 1 6 5 13 14 3 10 18 2 17 16 8 19 7 12 9 15]

7.8.16 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สมมติให้สตริงคำตอบของกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II เป็นสตริงคำตอบเดียวกัน สตริงคำตอบที่ได้จะทำการรวมกันแล้ว จะนำไปคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ จำนวนสตริงคำตอบทั้ง 10 คำตอบ ได้ค่าดังตารางที่ 7.42

ตารางที่ 7.42 สตริงคำตอบที่จะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]
	2	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
	3	[3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
	4	[2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]
	5	[4 2 1 6 3 7 8 10 12 5 9 15 11 13 14 17 18 19 16]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[3 10 2 5 9 1 8 6 7 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]
	7	[4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]
	8	[3 10 2 4 8 1 6 7 9 12 5 11 15 16 14 18 13 17 19]
	9	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 17 18 2 16 8 19 7 12 9 15]
	10	[4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ทำการรวมกัน จะนำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ แต่จะต้องนำสตริงคำตอบที่ได้รับการซ่อมแซมทำการจัดสรรงานลงสถานีงานก่อน ได้ดังตารางที่ 7.43

ตารางที่ 7.43 ตำแหน่งสถานีงานของแต่ละขั้นงานของสตริงคำตอบที่จะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-IIและ M-NSGA-II

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น(P)	1	[1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 2 2 2]
	2	[4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]
	3	[1 1 1 1 2 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 2]
	4	[2 2 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 1]
	5	[1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4]
สตริงคำตอบรุ่นลูก(Q)	6	[2 2 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 5 5 4 2 2 1 1]
	7	[4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]
	8	[1 1 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 4 5 5 4 4 1 1]
	9	[2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 2 2 2 2 1 1]
	10	[4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 2 2 2 2 1 1]

จากการจัดสรรงานลงสถานีงานเรียบร้อยแล้วจะทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ได้ค่าในตารางที่ 7.43

ตารางที่ 7.44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สตริงคำตอบที่จะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-IIและ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน
1	4	3.2	0.2759
2	4	3.5	0.0236
3	4	3.3333	0.1509
4	4	3.2	0.3902
5	4	3.5556	0.0236
6	5	4.6154	0.9278
7	4	3.5556	0.0236
8	5	4.6875	0.9283
9	4	3.6	0.3851
10	4	3.5556	0.0236

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาทำการกำหนดอันดับ ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) วิธี Non-dominated Sorting และคำนวณค่าความหนาแน่นวิธี Crowding Distanceได้ค่าดังตารางที่ 7.45

ตารางที่ 7.45 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) และค่า Crowding Distance คำตอบที่จะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.2	0.2759	1	Infinity
2	3.5	0.0236	1	Infinity
3	3.3333	0.1509	1	2
4	3.2	0.3902	2	Infinity
5	3.5556	0.0236	2	Infinity
6	4.6154	0.9278	4	Infinity
7	3.5556	0.0236	2	Infinity
8	4.6875	0.9283	5	Infinity
9	3.6	0.3851	3	Infinity
10	3.5556	0.0236	2	Infinity

จากตารางที่ 7.45 จะทำการจัดเรียงค่าความแข็งแรงที่แท้จริง (Dummy Fitness) จากน้อยไปมากและเรียงค่าความหนาแน่น Crowding Distance จากค่ามากไปน้อย เพื่อทำการจัดเก็บสตริงคำตอบจำนวน $pop_size = 5$ เพื่อนำไปใช้ในการคัดเลือกในเจนเนอเรชั่นรอบถัดไป ดังตารางที่ 7.46

ตารางที่ 7.46 การเรียงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) และค่า Crowding Distance คำตอบที่จะทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดในส่วนการกระบวนการอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงาน	กระจายภาระงานในสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.2	0.2759	1	Infinity
2	3.5	0.0236	1	Infinity
3	3.3333	0.1509	1	2
4	3.2	0.3902	2	Infinity
5	3.5556	0.0236	2	Infinity
7	3.5556	0.0236	2	Infinity
10	3.5556	0.0236	2	Infinity
9	3.6	0.3851	3	Infinity
6	4.6154	0.9278	4	Infinity
8	4.6875	0.9283	5	Infinity

เมื่อคำการจัดเรียงเสร็จแล้ว จะทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการเก็บค่าที่ทีที่สุดของสตริงคำตอบ จะทำการพิจารณาทีละ Front จากน้อยไปมาก ในที่นี้สตริงคำตอบที่อยู่ใน Front ที่ 1 มีทั้งหมด 3 สตริงคำตอบจึงทำการเก็บทั้งหมดทำให้เหลือ 2 สตริงคำตอบที่จะทำการเก็บ และเมื่อพิจารณาสตริงคำตอบที่อยู่ใน Front ที่ 2 จำนวนสตริงคำตอบเกินสตริงคำตอบที่ทำการจัดเก็บ ดังนั้น จึงต้องทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance มากที่สุดใน Front นั้น แต่เนื่องจากสตริงคำตอบใน Front ที่ 2 มีค่า Crowding Distance เท่ากันทั้งหมด จึงทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบขึ้นมาอีก 2 สตริงคำตอบ สมมติสุ่มได้สตริงที่ 4 กับ 7 สรุปได้ว่าในรอบการคำนวณครั้งสตริงที่ถูกทำการจัดเก็บและถูกส่งไปเป็นสตริงคำตอบในรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชั่นต่อไป คือ

String 1 = [3 10 2 9 4 8 1 6 7 12 15 5 11 16 14 18 13 17 19]

String 2 = [4 1 6 5 11 13 14 3 10 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

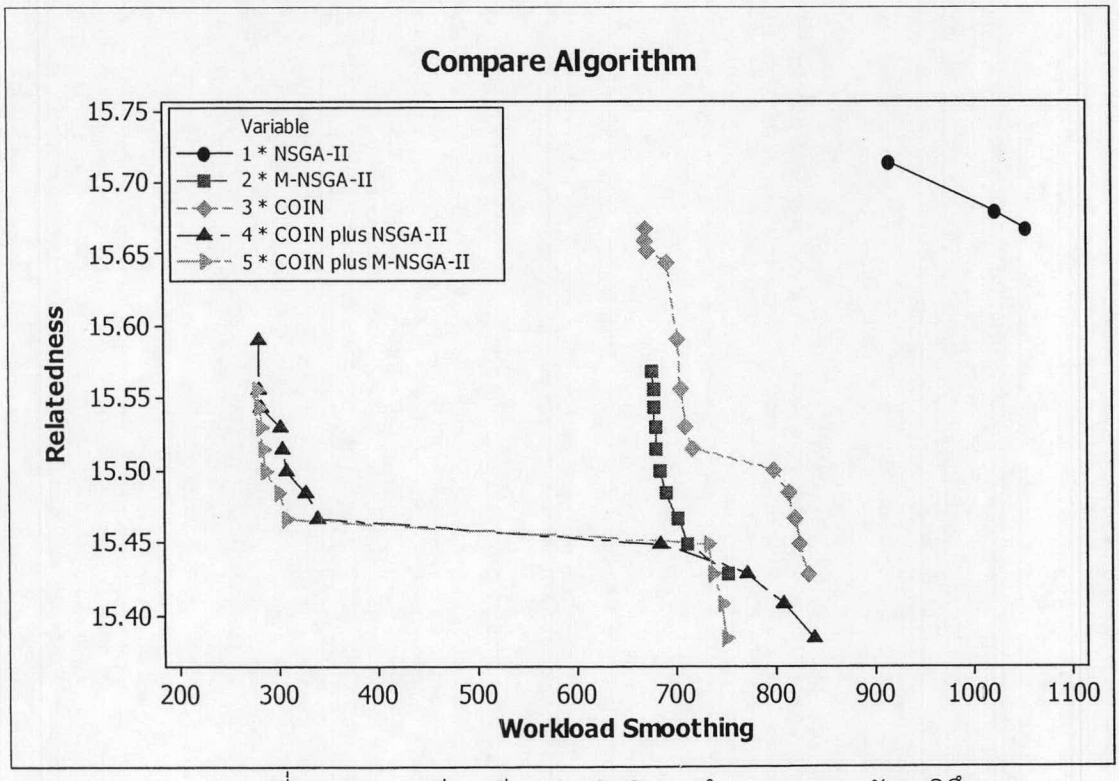
String 3 = [3 10 2 5 9 1 6 7 8 12 4 11 16 14 13 17 19 18 15]

String 4 = [2 8 5 4 11 13 14 18 1 6 7 12 3 10 16 17 19 9 15]

String 5 = [4 1 6 5 11 13 3 10 14 16 17 2 18 8 19 7 12 9 15]

7.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพคำตอบของอัลกอริทึม

จากบทที่ 6 พบว่าคำตอบของวิธีการบรรจวบมีประสิทธิภาพในด้านคำตอบและการลู่เข้าที่ดีกว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II (NSGA-II) แต่ยังเทียบกับวิธีวิธีการเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II (M-NSGA-II) ไม่ได้ ซึ่งจะมีคำตอบที่หลากหลายและมีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่ดี การพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบในบทนี้ก็เพื่อจะดึงเส้นของคำตอบให้มีการลู่ลงเข้าสู่ค่าที่เหมาะจนได้คำตอบที่ดีกว่าวิธี M-NSGA-II และเนื่องจากวิธี M-NSGA-II ใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างมาก จึงต้องการลดเวลาในการคำนวณและช่วยทำให้คำตอบมีประสิทธิภาพโดยการประยุกต์วิธีอัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับ NSGA-II และ M-NSGA-II ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยูที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ผสม ที่ปัญหาและพารามิเตอร์เดียวกันดังรูป ซึ่งพบว่าคำตอบมีการลู่เข้าที่ดีมากกว่าอย่างชัดเจน และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการ M-NSGA-II



รูปที่ 7.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพคำตอบของทุกอัลกอริทึม

7.10 การประมาณกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

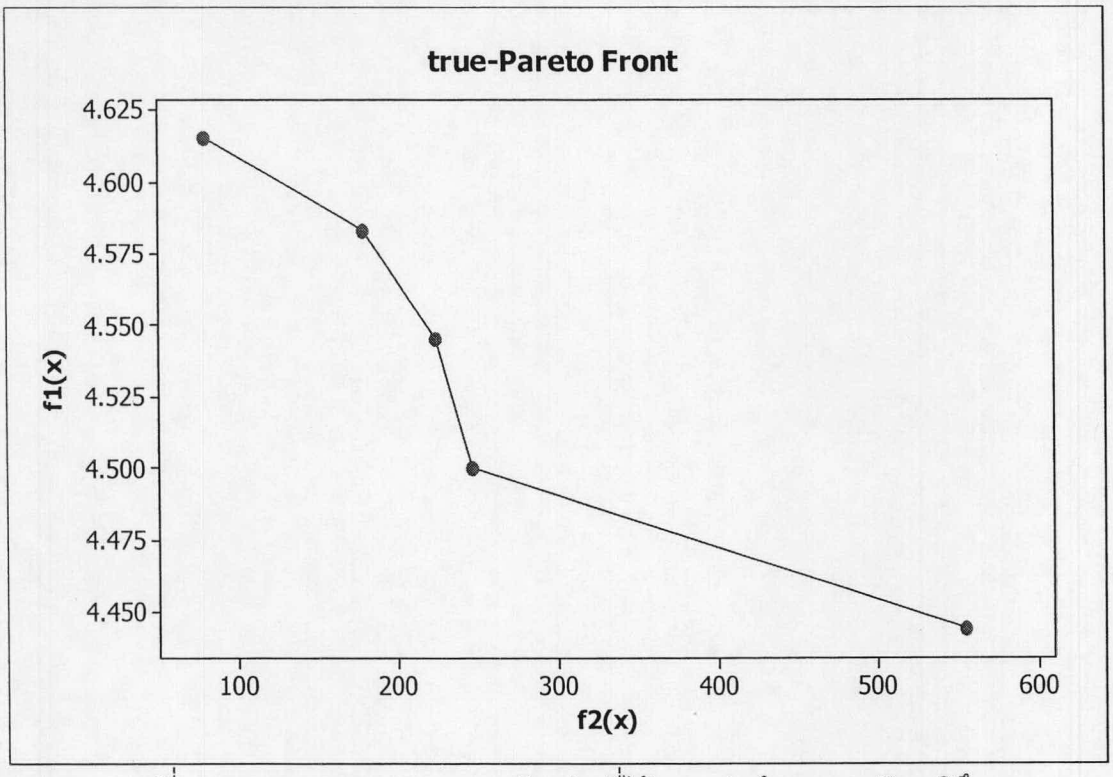
ในการหา true-Pareto Front จะทำการประมาณจากการรวมคำตอบของทุกการทดลองในแต่อัลกอริทึมทั้งหมด 5 อัลกอริทึม คือ 1.เจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II (NSGA-II) 2.เมมเมติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II(M-NSGA-II) 3.อัลกอริทึมการบรรจวบ(COIN) 4.อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเจนเนติกอัลกอริทึม(COIN plus NSGA-II) และ 5.อัลกอริทึมการบรรจวบรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึม(COIN plus M-NSGA-II) ซึ่งในอัลกอริทึม NSGA-II งานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้พารามิเตอร์จากงานวิจัยก่อนหน้า ทำให้เหลืออัลกอริทึมที่พิจารณา 4 อัลกอริทึม โดยทุกอัลกอริทึมจะใช้หลัก Pareto Dominance เพื่อหาเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด(Pareto Optimal Frontier) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสมรรถนะในการชี้วัดคำตอบในหัวข้อถัดไป ซึ่งเมื่อทำการทดลองได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแต่ละอัลกอริทึมแล้ว โดยจะทำการทดสอบหากลุ่มคำตอบแต่ละอัลกอริทึมโดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม คำตอบแต่ละอัลกอริทึมจะทำการหา true-Pareto Front อีกครั้ง โดยครั้งนี้จะทำการหาจากทุกอัลกอริทึม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลุ่มคำตอบแต่ละอัลกอริทึมเพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวสมรรถนะในหัวข้อถัดไปเช่นกัน เช่นตัวอย่างการประมาณ true-Pareto Front จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมดังนี้

ตารางที่ 7.47 ตัวอย่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากกลุ่มคำตอบที่หาได้จากทุกอัลกอริทึม

อัลกอริทึม	$f_1(x)$	$f_2(x)$
NSGA-II	4.5	722.759
	4.5455	784.310
	4.6154	517.192
	4.6429	456.618
M-NSGA-II	4.4444	554.544
	4.5000	432.229
	4.5455	237.852
	4.5833	179.096
	4.6154	79.407
COIN	4.5	722.759
	4.4444	554.544
	4.5455	274.049
	4.5833	265.463
COIN plus NSGA-II	4.5	722.759
	4.5455	327.377
	4.5833	183.329
	4.6667	175.591
	4.6875	174.511
COIN plus M-NSGA-II	4.5	246.612
	4.5455	224.048
	4.5833	182.502
	4.6429	176.896
	4.6667	176.062
	4.6875	162.251

ตารางที่ 7.48 true-Pareto Front จากตัวอย่างที่ได้จากกลุ่มคำตอบทุกอัลกอริทึม

กลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$
true-Pareto Front	4.4444	554.544
	4.5	246.612
	4.5455	224.048
	4.5833	179.096
	4.6154	79.407



รูปที่ 7.21 true-Pareto Front จากตัวอย่างที่ได้จากกลุ่มคำตอบทุกอัลกอริทึม

7.11 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่หาได้

เป้าหมายของการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลาบวัตถุประสงค์ มี 2 เป้าหมาย คือ ขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ควรจะใกล้เคียงกับขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดแท้จริง และเซตของกลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดนี้ควรมีลักษณะการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) หรือมีคำตอบอยู่บนขอบเขตกลุ่มคำตอบอย่างทั่วถึง ไม่เกาะอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ดังนั้นในการวัดสมรรถนะของคำตอบที่หาได้ จึงเป็นการแสดงถึงคุณภาพ

ของคำตอบที่หาได้ภายใต้เป้าหมายของการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ตัวชี้วัดทั้งหมดที่นำเสนอมีทั้งหมด 3 ตัวชี้วัดดังนี้

7.11.1 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal set) เป็นการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดที่สุดบนพื้นฐานการเปรียบเทียบระยะทางจากสมาชิกกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (true-Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบทุกคำตอบที่หาได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) สามารถคำนวณค่าตัวสมรรถนะได้ดังนี้

$$D1_R(S_j) = \frac{1}{|S^*|}\sum_{y \in s^*} \min\{d_{xy} \mid x \in S_j\} \qquad (7.4)$$

โดยที่ S_j คือเซตคำตอบที่เปรียบเทียบเส้นที่ j

S^* คือเซตคำตอบที่แท้จริง

$|S^*|$ คือจำนวนคำตอบที่แท้จริง

d_{xy} เป็นระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y ที่ได้รับการ Normalized แล้ว

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right)^2} \qquad (7.5)$$

โดยที่ $f_i(x)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่หาได้

$f_i(y)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

เมื่อ $i = 1,2,...,k$ (ในที่นี้กำหนดให้ $k = 2$)

เมื่อได้ค่าระยะทาง d_{xy} ที่มีค่าน้อยที่สุดในแต่ละเซตคำตอบที่หาได้กับเซตคำตอบที่แท้จริงแล้ว จะหารด้วยจำนวนคำตอบทั้งหมดในเซตคำตอบที่แท้จริง ถ้าค่าตัวสมรรถนะชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะถือว่ากลุ่มคำตอบอัลกอริทึมนั้นเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่แท้จริง อัลกอริทึมนั้นจึงเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสม ตัวอย่างในการคำนวณการวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงกับกลุ่มคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึม COIN plus M-NSGA-II

ตารางที่ 7.49 ตัวอย่างกลุ่มคำตอบที่หาได้จาก true-Pareto Front และ COIN plus M-NSGA-II

กลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$
true-Pareto Front	4.4444	554.544
	4.5	246.612
	4.5455	224.048
	4.5833	179.096
	4.6154	79.407
COIN plus M-NSGA-II	4.5	246.612
	4.5455	224.048
	4.5833	182.502
	4.6429	176.896
	4.6667	176.062
	4.6875	162.251

1) จากตารางที่ 7.49 จะทำการหาค่าน้อยสุดและน้อยที่สุดของคำตอบในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ของอัลกอริทึม COIN plus M-NSGA-II รวมกับ true-Pareto Optimal Solution โดยในตัวอย่างนี้ $f_1^{\max} = 4.6875$ และ $f_1^{\min} = 4.4444$ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณหาระยะทางแต่ละคำตอบที่หาได้และคำตอบที่แท้จริง โดยคำนวณจากสมการที่ 7.5

2) ทำการหาค่าน้อยสุดและน้อยที่สุดของคำตอบในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ของอัลกอริทึม COIN plus M-NSGA-II รวมกับ true-Pareto Optimal Solution เช่นเดียวกัน โดยในตัวอย่างนี้ $f_2^{\max} = 554.544$ และ $f_2^{\min} = 79.4097$ ต่อจากนั้นจะทำการคำนวณหาระยะทางแต่ละคำตอบที่หาได้และคำตอบที่แท้จริง โดยคำนวณจากสมการที่ 7.5

3) ทำการรวมระยะทางที่ได้ Normalized ทั้งคำตอบที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 จากนั้นนำคำตอบที่ได้ถอดรากที่สองดังสมการที่ 7.5 ในขั้นตอนนี้จะได้ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริง

4) หาระยะทางแต่ละคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ที่ใกล้ที่สุด เพื่อจะคิดหาผลรวมของระยะทาง เมื่อได้ผลรวมของระยะทางดังกล่าวจะนำมาหารด้วยจำนวนสมาชิกคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของระยะทางที่แสดงถึงการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

ตารางที่ 7.50 การ Normalized ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1

true-Pareto	Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II					
	4.5000	4.5455	4.5833	4.6429	4.6667	4.6875
4.4444	0.0523	0.1730	0.3265	0.6667	0.8362	1.0000
4.5000	0.0000	0.0350	0.1174	0.3455	0.4702	0.5949
4.5455	0.0350	0.0000	0.0242	0.1605	0.2486	0.3412
4.5833	0.1174	0.0242	0.0000	0.0601	0.1177	0.1837
4.6154	0.2253	0.0827	0.0174	0.0128	0.0445	0.0880

จากตารางที่ 7.50 แสดงระยะทางระหว่างแต่ละสมาชิกคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่ทำการ Normalized แล้ว เช่น ระยะทางระหว่างคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เท่ากับ 4.4444 และ 4.5000 ตามลำดับ ดังนั้นระยะทางที่จะได้คือ $\left(\frac{4.5000-4.4444}{4.6875-4.4444}\right)^2=\left(\frac{0.0556}{0.2431}\right)^2=0.0523$

ตารางที่ 7.51 การ Normalized ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

true-Pareto	Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II					
	246.612	224.048	182.502	176.896	176.062	162.251
554.544	0.4200	0.4838	0.6131	0.6317	0.6345	0.6817
246.612	0.0000	0.0023	0.0182	0.0215	0.0220	0.0315
224.048	0.0023	0.0000	0.0076	0.0098	0.0102	0.0169
179.096	0.0202	0.0090	0.0001	0.0000	0.0000	0.0013
79.407	0.1238	0.0927	0.0471	0.0421	0.0414	0.0304

จากตารางที่ 7.51 แสดงระยะทางระหว่างแต่ละสมาชิกคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริงในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่ทำการ Normalized แล้ว เช่น ระยะทางระหว่างคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 เท่ากับ 246.612 และ 554.544 ตามลำดับ ดังนั้นระยะทางที่จะได้คือ $\left(\frac{554.544-246.612}{554.544-79.407}\right)^2=\left(\frac{307.932}{475.137}\right)^2=0.4200$

ตารางที่ 7.52 ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริง

true-Pareto	Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II					
	1	2	3	4	5	6
1	0.6873	0.8105	0.9693	1.1395	1.2127	1.2968
2	0.0000	0.1930	0.3682	0.6058	0.7016	0.7915
3	0.1930	0.0000	0.1785	0.4127	0.5087	0.5984
4	0.3709	0.1821	0.0072	0.2452	0.3431	0.4301
5	0.5909	0.4188	0.2539	0.2343	0.2931	0.3441

จากตารางที่ 7.52 แสดงระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริง ที่ทำการ Normalized แล้ว เช่น ระยะทางระหว่างคำตอบที่แท้จริงที่ 1 กับคำตอบที่หาได้ที่ 1 คือ $\sqrt{0.0523+0.4200}=0.6873$

ตารางที่ 7.53 ระยะทางแต่ละคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ที่ใกล้ที่สุด

true-Pareto	Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II						Minimum Distance
	1	2	3	4	5	6	
1	0.6873	0.8105	0.9693	1.1395	1.2127	1.2968	0.6873
2	0.0000	0.1930	0.3682	0.6058	0.7016	0.7915	0.0000
3	0.1930	0.0000	0.1785	0.4127	0.5087	0.5984	0.0000
4	0.3709	0.1821	0.0072	0.2452	0.3431	0.4301	0.0072
5	0.5909	0.4188	0.2539	0.2343	0.2931	0.3441	0.2343
Total Minimum Distance							0.9287
Average Minimum Distance							*0.1857*

จากตารางที่ 7.53 แสดงระยะทางแต่ละคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ที่ใกล้ที่สุด โดยจะทำการปรียบเทียบคำตอบที่หาได้ทุกคำตอบกับคำตอบที่แท้จริงแต่ละจุด และทำการคิดระยะทางที่ใกล้ที่สุด จากนั้นจะทำการรวมผลรวมของระยะทางที่ใกล้ที่สุดทั้งหมดเพื่อหาค่าเฉลี่ยในการลู่เข้าทั้งหมด โดยตัวอย่างนี้จะได้ค่าการลู่เข้าที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 0.1857

7.11.2 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะทางระหว่างสมาชิกกลุ่มคำตอบทุกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน และเป็นตัวชี้บอกถึงการกระจายของกลุ่มคำตอบ ถ้าตัววัดสมรรถนะนี้มีค่าน้อยและเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้มีการกระจายในลักษณะสม่ำเสมอตลอดเส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และจัดได้ว่าเป็นลักษณะการกระจายที่ดี สามารถคำนวณค่าตัววัดสมรรถนะนี้ได้ดังสมการที่ 7.6

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} \left| d_i - \bar{d} \right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \tag{7.6}$$

โดยที่ d_f และ d_l เป็นระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extreme solution) ของเส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่หาได้

d_i คือ ระยะของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน ในเซตคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ เมื่อ i = 1, 2, ..., N-1

N คือ จำนวนคำตอบที่หาได้

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

ตัวอย่างในการคำนวณการวัดสมรรถนะในด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้จาก COIN plus M-NSGA-II ในตารางที่ 7.54 แสดงได้ดังนี้

1) คำนวณระยะทาง d_i ของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน และกำหนดให้ d_f และ d_l เป็นระยะห่างของคำตอบปลายสุดของขอบเขตกลุ่มคำตอบที่หาได้

2) คำนวณค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ติดกัน ($\bar{d}$) ทั้งหมด $N-1$ คำตอบ

3) คำนวณค่าผลต่างของ d_i และ $\bar{d}$ และหาผลรวมของผลต่างดังกล่าว

4) แทนค่าระยะทางที่หาได้ในขั้นตอนที่ (1) ถึง (3) ในสมการที่ (7.6)

ตารางที่ 7.54 กลุ่มคำตอบที่หาได้จาก COIN plus M-NSGA-II

Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II	
$f_1(x)$	$f_2(x)$
4.5	246.612
4.5455	224.048
4.5833	182.502
4.6429	176.896
4.6667	176.062
4.6875	162.251

ตารางที่ 7.55 สัญลักษณ์ของระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

No.	COIN plus M-NSGA-II		distance
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	
1	4.5	246.612	$d_1 = d_f$
2	4.5455	224.048	d_2
3	4.5833	182.502	d_3
4	4.6429	176.896	d_4
5	4.6667	176.062	$d_5 = d_l$
6	4.6875	162.251	

ตารางที่ 7.56 การหาระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

No.	COIN plus M-NSGA-II		Normalized		Euclidean Distance	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$		
1	4.5000	246.6120	0.0589	0.0715	$d_1 = d_f$	0.3611
2	4.5455	224.0480	0.0406	0.2425	d_2	0.5321
3	4.5833	182.5020	0.1010	0.0044	d_3	0.3247
4	4.6429	176.8960	0.0161	0.0001	d_4	0.1273
5	4.6667	176.0620	0.0123	0.0268	$d_5 = d_l$	0.1978
6	4.6875	162.251	$\bar{d}$			0.3086

ตารางที่ 7.55 และ 7.56 เป็นการหาระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน โดยสามารถคำนวณระยะทางได้จากสมการที่ 7.6 ตัวอย่างการคำนวณเช่น การหาค่ามีวิธีการดังนี้ เนื่องจาก d_4 เป็นระยะทางระหว่างจุดที่ 4 และ 5 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็น (4.6426, 176.8960) และ (4.6667, 176.0620) ตามลำดับ จากตัวอย่างดังกล่าวจะได้ $f_1^{\max} = 4.6875$ $f_1^{\min} = 4.5000$ $f_2^{\max} = 246.6120$ และ $f_2^{\min} = 162.251$ ดังนั้นค่า d_4 เท่ากับ

$$\text{Normalized } f_1(x) = \left(\frac{4.6429 - 4.6667}{4.6875 - 4.5000}\right)^2 = \left(\frac{-0.0238}{0.1875}\right)^2 = 0.0161$$

$$\text{Normalized } f_2(x) = \left(\frac{176.8960 - 176.0620}{246.6120 - 162.251}\right)^2 = \left(\frac{0.8340}{84.3610}\right)^2 = 0.0001$$

$$d_4 = \sqrt{(0.0161 + 0.0001)} = \sqrt{0.0162} = 0.1273$$

เมื่อคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันครบ $N-1$ คำตอบ จะทำการหาค่าเฉลี่ยของระยะทาง ($\bar{d}$) และ $d_f + d_l + (N-1)\bar{d}$ ซึ่งในตัวอย่างนี้จะได้ $\bar{d} = 0.3086$ และ $d_f + d_l + (N-1)\bar{d} = 0.3611 + 0.1978 + (6-1) \times 0.3086 = 2.1019$

ตารางที่ 7.57 ผลต่างระหว่างระยะทางของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันและค่าเฉลี่ยของระยะทาง

No.	d_i	$d_i - \bar{d}$	$\lvert d_i - \bar{d} \rvert$
1	0.3611	0.0525	0.0525
2	0.5321	0.2235	0.2235
3	0.3247	0.0161	0.0161
4	0.1273	-0.1813	0.1813
5	0.1978	-0.1109	0.1109
6	$\sum_{i=1}^{N-1} \lvert d_i - \bar{d} \rvert$		0.5843

ดังนั้นจากตัวอย่างดังกล่าวกลุ่มคำตอบที่หาได้จาก COIN plus M-NSGA-II จะมีการกระจายของคำตอบ เท่ากับ

$$\Delta = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} \lvert d_i - \bar{d} \rvert}{2.1019} = \frac{0.3611 + 0.1978 + 0.5843}{2.1019} = 0.5438$$

7.11.3 การวัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะกลุ่มคำตอบในด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นการวัดสมรรถนะโดยใช้หลักการ Pareto Dominance เปรียบเทียบกับจำนวนของคำตอบที่หาได้มีจำนวนที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) เป็นจำนวนอัตราส่วนเท่าไรจากจำนวนที่แท้จริงทั้งหมด สามารถคำนวณค่าตัววัดสมรรถนะนี้ได้ดังสมการที่ 7.7

$$Ratio=\frac{\left|S_j-\left\{x\in S_j \mid \exists y\in S: y\prec x\right\}\right|}{\left|S_j\right|} \tag{7.7}$$

โดยที่ S_j คือ เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j=1,2,...,J$

S คือ การร่วมกันของ j เซตคำตอบ $S=S_1\cup S_2...\cup S_J$

x คือ เซตคำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

จากสมการที่ 7.7 สัญลักษณ์ หมายถึง $y\prec x$ คำตอบ x ถูกข่มด้วยคำตอบ y และตัวเศษของสมการนั้น หมายถึงถ้าคำตอบ x แย่กว่าคำตอบอื่นๆใน y จะนำคำตอบนี้ออกไปในเซตคำตอบ S_j นั่นคือตัววัดนี้จะวัดอัตราส่วนของคำตอบใน S_j ที่ไม่ถูกข่มจากคำตอบอื่นใน S ซึ่งถ้าค่าอัตราส่วนในแต่ละเซตคำตอบมีค่าสูง แสดงว่ามีคำตอบที่หาได้ x ในเซต S_j ถูกข่มด้วยคำตอบที่แท้จริง y น้อย และถือว่ามีคุณภาพดีใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ถ้าค่าตัวสมรรถนะชนิดนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึมนั้นจะมีคำตอบที่สามารถเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

ตัวอย่างการคำนวณการวัดสมรรถนะในด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้จาก COIN plus M-NSGA-II ในตารางที่ 7.49เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แสดงได้ดังนี้

(1) สร้างเมตริกซ์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนคำตอบที่หาได้กับจำนวนคำตอบที่แท้จริง

(2) เปรียบเทียบคำตอบแต่ละคำตอบที่หาได้ (x) กับคำตอบที่แท้จริง (y) ด้วยหลักการ Pareto Dominance ดังนี้

- ถ้าค่าคำตอบหาได้ (x) ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 มีค่าไม่เท่ากับค่าคำตอบที่แท้จริง (y)ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 จะให้ค่าในช่องที่เปรียบเทียบระหว่าง x และ y มีค่าเท่ากับ 1

- ถ้าค่าคำตอบหาได้ (x) ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 มีค่าไม่เท่ากับค่าคำตอบที่แท้จริง (y)ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 จะให้ค่าในช่องที่เปรียบเทียบระหว่าง x และ y มีค่าเท่ากับ 0

(3) หาผลรวมของแต่ละแถว ค่าที่ได้นี้คือจำนวนคำตอบที่อยู่บนเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด จากนั้นหาผลรวมจำนวนแถวจะได้จำนวนคำตอบที่อยู่บนเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด และทำการคำนวณหาอัตราส่วนของจำนวนคำตอบโดยหารจำนวนคำตอบที่หาได้

จากตารางที่ 7.58 เป็นตัวอย่างการเปรียบเทียบสมาชิกคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึม COIN plus M-NSGA-II กับคำตอบที่แท้จริง โดยใช้หลักการ Pareto Dominance เช่น การเปรียบเทียบคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริง ที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เท่ากับ (4.5, 246.612) และ (4.4444, 554.544) จะเห็นได้ว่าค่าทั้ง 2 วัตถุประสงค์มีค่าไม่เท่ากันทั้งสองค่า ค่าที่เปรียบเทียบจึงมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าคำตอบที่หาได้ยังไม่ใช่คำตอบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด และเมื่อทำการเปรียบเทียบคำตอบที่หาได้กับคำตอบที่แท้จริง ที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เท่ากับ (4.5, 246.612) และ (4.5, 246.612) สังเกตว่าคำตอบทั้งสองค่ามีค่าเท่ากันหมด ดังนั้นแสดงว่าคำตอบที่มีค่า (4.5, 246.612) เป็นคำตอบที่ตกอยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด จึงกำหนดค่าในช่องการเปรียบเทียบกับ 1 เมื่อทำการรวมช่องการเปรียบเทียบทั้งหมดจะพบว่ามีคำตอบที่หาได้ตกอยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับ 2 ค่า และเมื่อคำนวณถึงจำนวนอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{5} = 0.3333$

ตารางที่ 7.58 การเปรียบเทียบคำตอบที่หาได้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงด้วยหลักการ Pareto Dominance

true-Pareto		No.	Obtained Pareto from COIN plus M-NSGA-II												Value
			1		2		3		4		5		6		
			4.5	246.612	4.5455	224.048	4.5833	182.502	4.6429	176.896	4.6667	176.062	4.6875	162.251	
4.4444	554.544	1	0		0		0		0		0		0		0
4.5	246.612	2	1		0		0		0		0		0		1
4.5455	224.048	3	0		1		0		0		0		0		1
4.5833	179.096	4	0		0		0		0		0		0		0
4.6154	79.407	5	0		0		0		0		0		0		0
Total Value															2
Ratio of solution															*0.3333*

7.12 สรุปท้ายบท

จากข้อเสียของอัลกอริทึมการบรรจวบ การที่จะช่วยในการไม่ให้เดินหลงทางหรือดึงคำตอบที่เหมาะสมถูกตัดทิ้งไป ทำให้คำตอบสุดท้ายออกมาไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมหรือดีที่สุด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอัลกอริทึมการบรรจวบขึ้นมาใหม่ โดยการนำข้อดีของอัลกอริทึมการบรรจวบในการตัดทอนคำตอบที่คิดว่าเป็นสตริงคำตอบที่แย่ ทำให้พื้นที่ของคำตอบที่เหมาะสมมีพื้นที่ลดลง และยังมีความรวดเร็วในการคำนวณ มาประยุกต์รวมกับอัลกอริทึม NSGA-II และ M-NSGA-II ที่ช่วยทำให้ได้คำตอบที่ลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมและมีความหลากหลายมากขึ้น ที่เกิดจากการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) และกระบวนการผสมพันธุ์ (Mating Pool) จะช่วยทำให้คำตอบที่เกิดจากอัลกอริทึมการบรรจวบมีความหลากหลายมากขึ้น

อัลกอริทึมการบรรจวบที่รวมกับอัลกอริทึม NSGA-II (COIN plus NSGA-II) และ M-NSGA-II (COIN plus M-NSGA-II) มีโครงสร้างการคำนวณเหมือนกับ อัลกอริทึมการบรรจวบและอัลกอริทึม NSGA-II ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 และ 5 ซึ่งจะทำการคำนวณในอัลกอริทึมการบรรจวบก่อน ในช่วงเจนเนอเรชั่นหนึ่งก่อน เพื่อคัดกรองคำตอบที่มีจำนวนมากให้เหลือคำตอบที่น้อยลง และนำสตริงคำตอบที่ทำการคัดกรองเท่ากับจำนวน *popsize* ตัว มาผ่านกระบวนการของอัลกอริทึม NSGA-II ในจำนวนเจนเนอเรชั่นหนึ่ง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบลักษณะตัวยู คำตอบมีประสิทธิภาพในการลู่เข้าและมีคำตอบที่หลากหลายมากกว่าอัลกอริทึมการบรรจวบ