รหัสโครงการ SUT7-712-56-24-23

รายงานการวิจัย

การวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์

(Resource-constrained Construction Scheduling Model with Precedence Relationships)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-712-56-24-23

รายงานการวิจัย

การวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์

(Resource-constrained Construction Scheduling Model with Precedence Relationships)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณพ.ศ. 2556-7

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2557

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากปราศจากการสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัยด้วยเงินงบประมาณจากสำนักงบประมาณ (ผ่านการพิจารณาจัดสรรโดยคณะกรรมวิจัยแห่งชาติ) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 และ 2557 และความร่วมมือจากผู้บริหารและพนักงานของบริษัทก่อสร้างที่สนับสนุนข้อมูลที่สำคัญในการวิจัย คณะผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

การวางแผนงานโครงการก่อสร้างที่คำนึงถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากร (Resource-constrained project scheduling problem: RCPSP) โดยทั่วไปจะจัดแผนงานด้วยการเลื่อนวันเริ่มของกิจกรรมต่างๆภายในขอบเขตระยะเวลาโฟลตที่มีหรือการแบ่งกิจกรรมหนึ่งออกเพื่อให้ระดับความต้องการใช้ทรัพยากรราบเรียบและหลีกเลี่ยงการจัดสรรใช้เกินกว่าที่มีอยู่ โดยยังคงรักษาเงื่อนไขอื่นๆไว้ตามเดิม อย่างไรก็ตามด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนดไว้จะทำให้การปรับแก้แผนงานดังกล่าวอยู่ภายในขอบเขตจำกัด การวิจัยนี้ได้พัฒนาหลักการใหม่ที่ใช้ทางเลือกของความสัมพันธ์ในการวางแผนงานด้วย โดยได้สร้างแบบจำลองที่ประกอบขึ้นจากสมการคณิตศาสตร์ต่างๆและสร้างโปรแกรมต้นแบบขึ้นในโปรแกรมกระดานคำนวณ ใช้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วย Genetic Algorithm based optimization และผลการทดสอบกับโครงการก่อสร้างตัวอย่างทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องในการคำนวณค่าเวลาต่างๆของแผนงานครอบคลุมกรณีความสัมพันธ์ที่หลากหลายรูปแบบ สามารถให้แผนงานคำตอบที่ดีได้อย่างต่อเนื่องและรวดเร็วและดีขึ้นกว่าการวางแผนด้วยวิธีเดิมหรือผลจากโปรแกรมสำเร็จรูปอย่างมากเกินกว่า 50% หลักการใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำให้การวางแผนโครงการมีความยืนหยุ่นมากยิ่งขึ้นในการปรับเลื่อนกิจกรรมซึ่งทำให้ได้แผนงานที่มีระดับความต้องการใช้ทรัพยากรที่มีความราบเรียบสม่ำเสมอดียิ่งขึ้นและมีระดับความต้องการใช้ทรัพยากรสูงสุดลดลง รวมทั้งยังช่วยกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่เหมาะสมที่สุดด้วย

คำสำคัญ : การวางแผนและการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง, ความสัมพันธ์ตามลำดับ, การจัดสรรทรัพยากรโครงการก่อสร้าง, การปรับระดับสมดุลการใช้ทรัพยากรโครงการ.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) is the arrangement of project activities by shifting their start time within their own available float time or splitting them. This attempt is to stabilize the level of resource demands and to avoid over-allocating resources whereas conforming to the other existing scheduling constraints, particularly precedence relationships of activities that are specified. The arrangement is restrained to some extent and efficient resource utilized schedules may not be obtained. This research initiates the new concept of RCPSP with relationship options. Any activity can have one or more alternative types of relationships with the other activity. The scheduling model was formulated with mathematical equations and the prototype was created on spreadsheet software. This scheduling problem model was solved using the Genetic Algorithm based optimization. The prototype was tested with two cases, both small and large construction projects. The test results showed that the new model could calculate and arrange project schedules correctly although different types of relationships were applied to the schedule. Also, the model could result optimal and efficient resource allocated schedules quickly and consistently, especially better than the conventional model and the commercial scheduling software by more than 50%. The resulting schedules had lower resource demand fluctuation and lower maximum resource demand level. This new RCPSP with relationship options can help planners arrange an efficient schedule. It not only provides the flexibility to level resource demands but also determines a suitable type of relationships for project activities.

Keywords: construction scheduling, planning, precedence relationships, resource allocation, resource levelling.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ช
บทคัดย่อ ..... ซ
Abstract ..... ฌ
สารบัญ ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฐ
สารบัญตาราง ..... ฒ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขต 2
1.4 วิธีวิจัย 3
1.5 แผนการวิจัย 6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6
บทที่ 2 หลักการวางแผนงานก่อสร้าง 8
2.1 หลักการวางแผนงานก่อสร้างเบื้องต้น 8
2.2 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม 10
2.3 แบบจำลองทั่วไปของปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีทรัพยากรจำกัด 13
2.3.1 การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด 15
2.3.2 การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร 16
2.4 เงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม 22
2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบทั่วไป 23
2.4.2 เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม 25
2.4.3 เงื่อนไขภายนอกด้านเวลา 26
2.5 วิธีการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหา 27
2.5.1 Genetic algorithms 29
2.6 ซอฟแวร์บริหารงานโครงการก่อสร้าง 32
2.6.1 ภารกิจการวางแผนโครงการ 34
2.6.2 ภารกิจการควบคุมโครงการ 35
2.6.3 การทำรายงาน 35
2.6.4 ข้อจำกัดของซอฟแวร์ 36
2.7 สรุปการทบทวนวรรณกรรม 37

บทที่ 3 แบบจำลองปัญหาการวางแผนที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ 41
3.1 แนวคิดและหลักการ 41
3.2 สมการของแบบจำลองปัญหาการวางแผนด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ 42
3.2.1 ตัวแปรคำตอบ 43
3.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 44
3.2.3 ฟังก์ชันข้อจำกัด 45
3.2.4 สมการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรม 45
3.3 การสร้างแบบจำลองด้วย Spreadsheet 49
3.3.1 ข้อมูลนำเข้า 49
3.3.2 ตัวแปรคำตอบ 51
3.3.3 การคำนวณแผนงานโครงการ 52
3.3.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 53
3.4 วิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ 54
3.5 การทดสอบ 58
3.5.1 โจทย์ปัญหาในการทดสอบ 58
3.5.2 ประเด็นทดสอบ 62
3.5.3 วิธีการทดสอบ 64
3.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ 66
3.6.1 ประเด็นที่ 1 ความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลอง 67
3.6.2 ประเด็นที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ 73
3.6.3 ประเด็นที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป 83
3.6.4 ประเด็นที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป 88
3.6.5 ประเด็นที่ 5 การเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ 94
3.7 สรุปผลการพัฒนา 102
บทที่ 4 บทสรุป 105
4.1 สรุปผลการวิจัย 105
4.2 ข้อจำกัด 107
4.3 ข้อเสนอแนะ 108
4.4 ผลลัพธ์ 108
ร่างบทความ 110
เอกสารอ้างอิง 132

ประวัตินักวิจัย..134

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพบาร์ชาร์ตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมรูปแบบต่างๆ....................................11
รูปที่ 2.2 ลักษณะความผันผวนของระดับความต้องการใช้ทรัพยากรรูปทรงต่างๆ................................17
รูปที่ 2.3 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวัน 18
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและวันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากร (d) 20
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนี RRH และ RID (El-Rayes and Jun 2009)................................21
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B 23
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor A 24
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lead time กับกิจกรรม predecessor B..............24
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แบบ SS ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B 24
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์แบบ SS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor B 24
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์แบบ FF ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B........................25
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์แบบ FF ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor B 25
รูปที่ 2.13 สายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทนโครโมโซม 29
รูปที่ 2.14 ปฏิบัติการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่เพื่อให้ได้รุ่นลูก 30
รูปที่ 2.15 ปฏิบัติการกลายพันธุ์ของโครโมโซมรุ่นลูก...30
รูปที่ 2.16 หน้าตาเริ่มต้นของโปรแกรม Microsoft Project 2010 (Stover 2010).................................33
รูปที่ 2.17 หน้าตาเริ่มต้นของโปรแกรม Primavera P6 (Oracle 2009) 34
รูปที่ 3.1 ส่วนการคำนวณแผนงานโครงการ 53
รูปที่ 3.2 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์..54
รูปที่ 3.3 หน้าต่างแสดงโปรแกรม Evolver ของ Palisade Corp..55
รูปที่ 3.4 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว 55
รูปที่ 3.5 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง...56
รูปที่ 3.6 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size และ Random Number Generator Seed ของ Evolver 57
รูปที่ 3.7 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการหยุดการค้นหาคำตอบ 58
รูปที่ 3.8 ตารางข้อมูลโครงการของโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก 59
รูปที่ 3.9 แผนภาพเน็ตเวิร์คของกิจกรรมของโจทย์โครงการขนาดเล็ก...60

รูปที่ 3.10 ตารางข้อมูลโครงการของโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ 61
รูปที่ 3.11 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 1 67
รูปที่ 3.12 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 1 67
รูปที่ 3.13 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 2 68
รูปที่ 3.14 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 2 68
รูปที่ 3.15 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 3 69
รูปที่ 3.16 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 3 69
รูปที่ 3.17 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 4 70
รูปที่ 3.18 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 4 70
รูปที่ 3.19 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 5 71
รูปที่ 3.20 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 5 71
รูปที่ 3.21 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 6 72
รูปที่ 3.22 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 6 72
รูปที่ 3.23 แสดงจุดค่า M_x ของคำตอบต่างๆที่ได้จากการทดสอบทั้ง 6 ชุด 82
รูปที่ 3.24 ผลการทดสอบด้วย ANOVA Single Factor กับผลของชุดทดสอบทั้ง 6 ชุด 82
รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบด้วย ANOVA Single Factor เมื่อตัดชุดทดสอบที่ 2.4 83
รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดเล็กจากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป 85
รูปที่ 3.27 แผนงานผลลัพธ์จากการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป 87
รูปที่ 3.28 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดใหญ่จากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป 88
รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดเล็กจากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป 90
รูปที่ 3.27 แผนงานผลลัพธ์จากการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป 92
รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดใหญ่จากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป 93

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนงานโครงการวิจัย........6
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของทั้งสองลักษณะปัญหาย่อยของแบบจำลอง RCPSP........37
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง RCPSP ที่ควบรวมสองปัญหาย่อย........38
ตารางที่ 3.1 ประเด็นการทดสอบแบบจำลอง........65
ตารางที่ 3.2 ผลคำตอบของการทดสอบชุดที่ 2.1........73
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.2........75
ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.3........76
ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.4........77
ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.5........78
ตารางที่ 3.7 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.6........79
ตารางที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 6 ชุด (ชุดที่ 2.1 - 2.6)........80
ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 3.1........84
ตารางที่ 3.10 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 3.2........86
ตารางที่ 3.11 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 4.1........89
ตารางที่ 3.13 การเปรียบเทียบแสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่ 3.1 และ 4.1 และจากโปรแกรมสำเร็จรูป........90
ตารางที่ 3.12 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 4.2........91
ตารางที่ 3.13 การเปรียบเทียบแสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่ 3.2 และ 4.2 และจากโปรแกรมสำเร็จรูป........93
ตารางที่ 3.14 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.1........94
ตารางที่ 3.15 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.2........96
ตารางที่ 3.16 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.3........97
ตารางที่ 3.17 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.4........98
ตารางที่ 3.18 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.5........100
ตารางที่ 3.19 แสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5........101
ตารางที่ 3.20 แสดงค่าเฉลี่ยของดัชนีต่างๆของคำตอบทั้งหมดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5........101
ตารางที่ 3.22 แสดงค่าที่ดีที่สุดของดัชนีต่างๆของคำตอบทั้งหมดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5........101

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวางแผนงานโครงการก่อสร้างมีภาระอันสำคัญในการกำหนดรายการกิจกรรมที่ต้องทำ ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน รวมทั้งต้องจัดสรรการใช้ทรัพยากรของโครงการที่มีอยู่อย่างจำกัดตามความต้องการใช้ของกิจกรรมต่างๆให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งได้แก่ เวลา งบประมาณ เงินสดพื้นที่ทำงาน แรงงาน และเครื่องจักรเป็นต้น การวางแผนเฉพาะทรัพยากรด้านเวลาเพียงอย่างเดียวด้วย Critical Path Method (CPM) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่แผนงานที่ได้อาจนำไปปฏิบัติจริงไม่ได้ เนื่องจากไม่ได้พิจารณาถึงความจำกัดของทรัพยากรโครงการอื่นๆ แบบจำลองปัญหาการวางแผนที่พิจารณาเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากรด้วยจึงถูกพัฒนาขึ้น ในลักษณะแบบ Optimization models เรียกโดยรวมว่า Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบ NP-hard optimization problem ที่หาคำตอบและจัดการยาก (Kolisch and Hartmann 2006) แบบจำลองปัญหาการวางแผนงานโครงการก่อสร้างจึงมีความซับซ้อนและอยู่ในความสนใจของนักวิจัยอย่างต่อเนื่อง

ทรัพยากรโครงการทั้งหมดที่ถูกกำหนดให้มีจำนวนจำกัด สามารถแบ่งออกเป็น ทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources: RR) คือทรัพยากรที่เมื่อใช้ดำเนินการกิจกรรมหนึ่งจนแล้วเสร็จ สามารถนำไปใช้ดำเนินการกิจกรรมอื่นต่อไปได้ เช่น เงินสด พื้นที่ทำงาน แรงงาน และเครื่องจักรและทรัพยากรไม่หมุนเวียน (Nonrenewable resources: NR) คือทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เช่น เวลา และงบประมาณ โดยที่ทรัพยากรหมุนเวียนประเภทใดๆ ที่ขณะเวลาใดๆ จะต้องนำไปใช้ไม่เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ส่วนทรัพยากรไม่หมุนเวียนประเภทใดๆ จะต้องรวมการใช้ตลอดทั้งโครงการแล้วไม่เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ (Hong Zhang, Tam, and Li 2006) นอกจากนี้แล้วเพื่อให้การจัดสรรใช้ทรัพยากรหมุนเวียนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรวางแผนเพื่อให้ระดับความต้องการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniform) ตลอดระยะเวลาของโครงการ ซึ่งความผันผวนของระดับความต้องการใช้จะทำให้ต้องจัดเตรียมจำนวนทรัพยากรที่ระดับความต้องการใช้ที่สูงที่สุด และเกิดการว่างงานในช่วงที่ระดับความต้องการใช้ต่ำ จึงเสียต้นทุนมากขึ้น (El-Rayes and Jun 2009)

องค์ประกอบของแบบจำลองปัญหา RCPSP โดยทั่วไปจะมีตัวแปรคำตอบเป็นกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรม (activities’ start times) และมีฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (dependence relationships) ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยที่ผ่านมามักจะกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นแบบ “แล้วเสร็จ-เริ่ม” (Finish-to-Start) ที่เป็นความสัมพันธ์อย่างง่ายเพียงแบบเดียวเท่านั้น ดังนั้นการค้นหาคำตอบจึงเป็นการเลื่อนเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆภายในระยะเวลาโฟลตของกิจกรรมนั้นๆ เพื่อให้ได้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าแผนงานผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ได้จะถูกจำกัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขความสัมพันธ์เพียงแบบเดียวตามสมมติฐาน จึงทำให้แผนงานผลลัพธ์ที่ได้อาจยังไม่ใช่แผนงานที่ดีตามต้องการ ทั้งที่เงื่อนไขความสัมพันธ์ของกิจกรรมเหล่านี้อาจถูกกำหนดขึ้นตามความจำเป็นหรือ

ตามนโยบายของผู้วางแผนที่ในทางปฏิบัติสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมและอาจเลือกใช้ได้หลายรูปแบบความสัมพันธ์ งานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการสร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผน RCPSP ที่สามารถพิจารณาชนิดของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมและสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมได้ เพื่อให้ได้แผนงานผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการพัฒนาต่อยอด 2. การสร้างสมการของแบบจำลองปัญหา และ 3 การทดสอบแบบจำลองและวิเคราะห์ผล

แบบจำลองปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่พิจารณาเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากรมีเป้าหมายสำคัญเพื่อจัดสรรใช้ทรัพยากรที่มีทั้งหมดของโครงการให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด แนวทางการหาคำตอบเป็นการเลื่อนเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆภายในระยะเวลาโฟลตของตนเองเท่านั้น โดยยังคงรักษาข้อกำหนดด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมไว้ซึ่งทำให้คำตอบที่เป็นไปได้ถูกจำกัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม งานวิจัยนี้จึงได้ริเริ่มการสร้างแบบจำลองปัญหาที่สามารถทบทวนเงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ โดยกำหนดให้มีทางเลือกของความสัมพันธ์ของบางกิจกรรม เพื่อเพิ่มโอกาสให้ได้แผนงานคำตอบที่ดีที่สุด แบบจำลองปัญหาใหม่นี้จะถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมประเภทกระดานคำนวณ (Spreadsheet) และใช้วิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น Genetic Algorithm (GA) และทำการทดสอบและประเมินผลแบบจำลองด้วยโครงการก่อสร้างกรณีตัวอย่าง

1.2 วัตถุประสงค์

จากปัญหาวิจัยดังกล่าว จึงมีวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยดังต่อไปนี้

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ สร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร (Resource-constrained project scheduling problem model) ที่สามารถพิจารณาชนิดของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมและสามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมได้ ซึ่งจะเป็นการพัฒนาเทคนิคการวางแผนโครงการให้มีประสิทธิผลดียิ่งขึ้น รวมทั้งการสร้างวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Solving algorithms) ที่เหมาะสมกับแบบจำลองปัญหาที่สร้างขึ้น

1.3 ขอบเขต

ขอบเขตของการวิจัยนี้จะครอบคลุมถึงเรื่องต่างๆดังนี้

โครงการก่อสร้างที่จะนำมาใช้เป็นกรณีตัวอย่างนั้นจะพิจารณาคัดเลือกให้มีขนาดใหญ่และซับซ้อนเหมาะสมกับเทคนิคการวางแผนใหม่ที่สร้างขึ้น และประเภทของงานก่อสร้างจะต้องเป็นงานที่มีความเป็นเอกลักษณ์ที่ไม่มีลักษณะซ้ำซึ่งจะเป็นประเภทงานก่อสร้างที่ซับซ้อน เพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของโครงการก่อสร้างทั่วไปที่เป็นกลุ่มเป้าหมายของการวิจัยนี้ ได้แก่ งานก่อสร้างสาธารณูปโภคขนาดใหญ่ งานก่อสร้างพิเศษเฉพาะด้าน

แบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมต้นแบบที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อทดสอบประเมินผลได้สะดวก และเพื่อการเผยแพร่องค์ความรู้ที่คิดค้นขึ้นจากการวิจัยนี้แก่ผู้ที่สนใจ แต่ทั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นสร้างฟังก์ชั่นอำนวยความสะดวกต่อการใช้งานหรือความสวยงามอย่างเต็มที่ โปรแกรมต้นแบบจะพัฒนาขึ้นจากซอฟแวร์สำนักงานพื้นฐานที่บริษัทก่อสร้างทั่วไปมีใช้อยู่ เพื่อให้สามารถเข้าใจการใช้งานได้รวดเร็ว และสามารถติดตั้งใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาซอฟแวร์เฉพาะทางอื่นใด การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบนี้เพื่อการค้าอยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

1.4 วิธีวิจัย

ลักษณะงานวิจัยที่เสนอนี้จะเป็นการพัฒนาวิธีการสร้างแบบจำลอง ดังนั้นวิธีการดำเนินการวิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การค้นคว้าทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อทำความเข้าใจให้ถ่องแท้และการพัฒนาปรับปรุงต่อยอด และมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการเก็บข้อมูลจากโครงการก่อสร้างเพื่อทำความเข้าใจกับวิธีการวางแผนโครงการและเงื่อนไขต่างๆที่พิจารณาในทางปฏิบัติจริง เพื่อให้ได้แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นที่สอดคล้องใกล้เคียงกับสภาพการทำงานจริงให้มากที่สุด อันจะทำให้ได้คำตอบแผนงานโครงการก่อสร้างที่มีประสิทธิผล ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการใช้กรณีตัวอย่างในการศึกษา ทั้งนี้โครงการก่อสร้างที่ถูกคัดเลือกเป็นกรณีศึกษาจะต้องอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสม คือเป็นงานก่อสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนและมีเนื้องานที่เป็นเอกลักษณ์ จึงเป็นโครงการก่อสร้างที่ต้องใช้เทคนิคการวางแผนงานที่ซับซ้อน การกำหนดพื้นที่ของโครงการก่อสร้างกรณีศึกษาควรเป็นโครงการก่อสร้างในประเทศไทยที่เปิดกว้างทั่วไปไม่มีขอบเขตของพื้นที่ตั้งโครงการ แต่ควรคัดเลือกให้ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะทั่วไปเหมาะเป็นตัวแทนของโครงการก่อสร้างที่เป็นกลุ่มเป้าหมาย เมื่อมีการพัฒนาแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดจนแล้วเสร็จ จะต้องมีขั้นตอนการทดสอบและประเมินผลของสิ่งที่สร้างขึ้น ด้วยการใช้วิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่เหมาะสม สถานที่ที่จะใช้เป็นที่ทำการวิจัยจะเป็นห้องทำงานปกติในหน่วยงานของมหาวิทยาลัย ส่วนการเก็บข้อมูลจะได้มาจากโครงการก่อสร้างกรณีศึกษาที่คัดเลือกมาอย่างเหมาะสมดังกล่าวข้างต้น

เพื่อที่จะดำเนินการวิจัยนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ จึงได้แบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็นลำดับ 6 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการดังนี้

ขั้นตอนที่1: ศึกษาวิเคราะห์วิธีการ ขั้นตอน สภาพเงื่อนไข และปัญหาในการวางแผนโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน และการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง โดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้างที่ปรากฏในวรรณกรรมวิชาการต่างๆ

วิธีการ: ศึกษาและทบทวนความรู้หรืองานวิจัยอื่นๆจากวรรณกรรมวารสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดวิธีการปฏิบัติงานจริงที่เป็นอยู่ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงกัน เห็นถึงจุดด้อยที่ควร

พัฒนาปรับปรุงวิธีการ โดยที่ขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบทำความเข้าใจในรายละเอียดกับปัญหาวิจัยของโครงการวิจัยนี้และยืนยันถึงความสำคัญของปัญหา

ผลลัพธ์: ความเข้าใจในปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรและการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง และข้อด้อยของวิธีการที่เป็นอยู่

ขั้นตอนที่2: ทบทวนพัฒนาการของการสร้างแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบแผนงานโครงการก่อสร้างที่ดีที่สุด ด้วยเทคนิคต่างๆกันที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อบ่งชี้จุดในการพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้นและใกล้เคียงกับสภาพเงื่อนไขของงานก่อสร้างจริง

วิธีการ: สืบค้นหนังสือ วารสาร และบทความการประชุมทางวิชาการต่างๆและรวบรวมเพื่อทำความเข้าใจกับพัฒนาการและความหลากหลายของการแบบจำลองปัญหา เช่น Time-cost tradeoff, Resource allocation, Resource leveling, และ Constraint satisfaction problems รวมทั้งพัฒนาการและความหลากหลายของวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดทั้งแบบ heuristics, stochastic, linear programming, integer programming, และ constraint programming

ผลลัพธ์: ความเข้าใจในเทคนิควิธีการแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดประเภทต่างๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน รวมทั้งเห็นตัวอย่างความหลากหลาย แนวทางการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ รู้ขีดความสามารถของเทคนิคที่ดีที่สุดที่มีอยู่ในปัจจุบัน ทำให้สามารถคัดเลือกเทคนิคที่เหมาะสมเพื่อการคิดค้นพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้นจากที่มีอยู่เดิม งานเขียนสรุปประเด็นและเนื้อหา (literature reviews) ในสื่อที่อ่านเพื่อใช้ประกอบงานเขียนบทความเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ขั้นตอนที่3: สร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานโครงการก่อสร้างขึ้นมาใหม่ให้สอดคล้องกับลักษณะการปฏิบัติงานจริง รวมทั้งคิดค้นวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

วิธีการ: จากการวิเคราะห์ปัญหาจริงจากโครงการก่อสร้างในขั้นตอนที่ 1 และการวิเคราะห์เทคนิคการแบบจำลองปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาจุดด้อยหรือประเด็นเงื่อนไขที่ยังไม่ได้มีการพิจารณารวมเข้าไว้ในแบบจำลอง จากนั้นจึงสังเคราะห์แบบจำลองปัญหาการสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะที่สอดคล้องเหมาะสมกับความจริงที่สุด และจากการวิเคราะห์เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 ทำให้สามารถคิดค้นการปรับปรุง algorithms ใหม่ให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าและใช้เวลาหาคำตอบรวดเร็วกว่า ต่อมาจึงทำการทดสอบกับกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างและเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการแบบเดิม

ผลลัพธ์: องค์ความรู้ใหม่ที่เป็นการแบบจำลองปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างให้สอดคล้องกับลักษณะการปฏิบัติงานจริง และ algorithms ใหม่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีที่คิดค้นขึ้น ซึ่งเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ และเพื่อใช้ประกอบงานเขียนบทความเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ขั้นตอนที่4: พัฒนาโปรแกรมต้นแบบของแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่คิดค้นขึ้น เพื่อให้สะดวกและสอดคล้องกับการนำไปใช้ทดสอบและประเมินผลประสิทธิภาพ

วิธีการ: โปรแกรมต้นแบบสำหรับการวางแผนโครงการก่อสร้างจะถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่ได้ริเริ่มขึ้นมาใหม่ในขั้นตอนที่ผ่านมา โดยคณะผู้วิจัยที่มีองค์ความรู้นั้นพร้อมทั้งประสบการณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ และความเชี่ยวชาญในการพัฒนาซอฟแวร์ จะทำการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบขึ้นมาจากซอฟแวร์สำนักงานที่ใช้กันโดยทั่วไปในธุรกิจการก่อสร้าง โดยโปรแกรมต้นแบบจะถูกพัฒนาบนพื้นฐานข้อมูลของโครงการก่อสร้างที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษา การดำเนินการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบนี้จะเป็นแบบหลายรอบ เพื่อการปรับปรุงแก้ไขให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องสมบูรณ์

ผลลัพธ์: ซอฟแวร์ใหม่ของโปรแกรมต้นแบบสำหรับการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น พร้อมติดตั้งเพื่อทดสอบและประเมินผลการใช้

ขั้นตอนที่5: ทดสอบและประเมินผลความสำเร็จของโปรแกรมต้นแบบโดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้าง

วิธีการ: การทดสอบและประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมต้นแบบ และนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวางแผนแบบดั้งเดิม โดยการเลือกใช้กรณีตัวอย่างเป็นโครงการก่อสร้างที่มีความเหมาะสมกับเทคนิคการวางแผนที่พัฒนาขึ้นมา ผลลัพธ์จากการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาประเมินด้วยวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่เหมาะสม เพื่อยืนยันผลการทดสอบตามนัยยะทางสถิติ

ผลลัพธ์: ประสิทธิภาพและผลการประเมินคุณค่าที่ได้จากการใช้งานโปรแกรมต้นแบบและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่

ขั้นตอนที่6: เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยนี้สู่องค์ความรู้ส่วนรวมในที่ประชุมและวารสารทางวิชาการต่างๆทั้งระดับชาติและหรือนานาชาติ รวมทั้งเป็นแหล่งเผยแพร่การใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ให้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศ

วิธีการ: นำองค์ความรู้ใหม่จากผลการดำเนินโครงการวิจัยนี้ออกเผยแพร่สู่สาธารณะทั้งในและนอกประเทศ โดยการเขียนบทความทางวิชาการจากการวิเคราะห์ปัญหา สร้างแบบจำลองปัญหาและริเริ่มวิธีการวางแผนโครงการก่อสร้างที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น สามารถได้คำตอบเป็นแผนงานก่อสร้างที่ดีกว่าที่ทำให้ลดระยะเวลา ต้นทุน ระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการลงได้ และมีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้ความสัมพันธ์ชนิดต่างๆที่หลากหลายตามความเหมาะสม โดยมุ่งหมายให้ได้บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติและหรือสากล และนำเสนอบทความในการประชุมทางวิชาการระดับชาติและหรือสากล รวมทั้งเผยแพร่โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสู่ผู้ที่สนใจทั่วไป ทั้งยังเป็นแหล่งข้อมูลความช่วยเหลือและสนับสนุนให้บริษัทก่อสร้างที่สนใจได้นำผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้

ผลลัพธ์: บทความในวารสารวิชาการระดับชาติหรือสากลอย่างน้อย 1 เรื่อง และบทความการประชุมทางวิชาการระดับชาติหรือสากล รวมทั้งฟรีแวร์ของโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

1.5 แผนการวิจัย

จากรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินโครงการและผลลัพธ์ของแต่ละขั้นตอนข้างต้น ได้ประมาณระยะเวลาดำเนินงานของแต่ละขั้นตอน และวางแผนงานโดยได้แสดงไว้ในรูปแบบตารางดังต่อไปนี้ โดยโครงการนี้มีระยะเวลาวิจัย 2 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2557

ตารางที่ 1.1 แผนงานโครงการวิจัย

รายการกิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)	ไตรมาศที่							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1. ศึกษาวิเคราะห์ปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่เป็นอยู่	4								
2. ทบทวนพัฒนาการของแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่มีอยู่	6								
3. คิดค้นพัฒนาแบบจำลองปัญหาและวิธีการหาคำตอบที่ดีขึ้น	6								
4. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบเพื่อการทดสอบและประเมินผล	5								
5. ทดสอบการใช้และประเมินผลความสำเร็จของแบบจำลอง	4								
6. เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย	4								

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองปัญหาการวางแผนและวิธีการหาคำตอบที่เป็นผลลัพธ์ของโครงการวิจัยนี้ จะทำให้สามารถใช้ทางเลือกของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเพื่อการปรับปรุงคำตอบแผนงานที่ดีขึ้นได้ แบบจำลองนี้จึงช่วยนักวางแผนตัดสินใจเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่เหมาะสมระหว่างทางเลือกต่างๆที่มีอยู่ได้

ผลจากโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อธุรกิจการก่อสร้าง ทั้งต่อบริษัทก่อสร้างและเจ้าของงานก่อสร้าง เนื่องจากจะช่วยให้มีแบบจำลองปัญหาการวางแผนโครงการที่สอดคล้องใกล้เคียงกับสภาพการปฏิบัติงานจริงมากขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงสามารถสร้างตารางเวลางานก่อสร้างและติดตามความก้าวหน้าโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ซึ่งจะทำให้การใช้ทรัพยากรของโครงการเกิดคุณค่ามากที่สุด และช่วยให้ประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง ลดการใช้จ่ายเกินงบประมาณ รวมทั้งช่วยให้โครงการแล้วเสร็จได้ตรงตามกำหนดเวลาเพิ่มขึ้น ลดความล่าช้าที่นำมาสู่ปัญหาความขัดแย้ง ซึ่งผลงานที่เป็นรูปธรรมของ

โครงการวิจัยคือโปรแกรมต้นแบบที่สามารถเผยแพร่ไปสู่ผู้ที่สนใจทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจก่อสร้างของประเทศ เพื่อการพัฒนาโปรแกรมสำหรับการค้าต่อไป เป็นการลดการพึ่งพาซอฟแวร์จากต่างประเทศ

องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ คือวิธีการแบบจำลองปัญหาการจัดตารางเวลาที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ ซึ่งจะรวมเอาข้อเงื่อนไขต่างๆจากสภาพการปฏิบัติงานก่อสร้างจริงไว้ และ algorithms ใหม่สำหรับใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดนี้ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดจากที่มีอยู่เดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2 หลักการวางแผนงานก่อสร้าง

ในบทนี้ได้ศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการวางแผนงานก่อสร้างขั้นสูงที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยต่างๆ ลักษณะความสัมพันธ์ประเภทต่างๆระหว่างกิจกรรม และซอฟแวร์สำเร็จรูปสำหรับการวางแผนงานโครงการก่อสร้างที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังรวมถึงบทวิจารณ์ที่ได้จากการสรุปวิเคราะห์เนื้อหาในประเด็นต่างๆของการศึกษาทบทวนดังกล่าว

2.1 หลักการวางแผนงานก่อสร้างเบื้องต้น

งานก่อสร้างมีลักษณะแตกต่างจากอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไป คือดำเนินการแบบ “งานโครงการ” (Projects) ซึ่งเป็นงานที่มีเนื้องานแน่นอน มีความเป็นเอกลักษณ์ ไม่ซ้ำกัน ต้องออกแบบและเรียนรู้วิธีการก่อสร้างใหม่ทุกครั้ง และงานก่อสร้างมักมีขนาดชิ้นงานใหญ่จึงมีขั้นตอนการทำที่ซับซ้อนและต่อเนื่องจำนวนหลายขั้นตอน แต่งานก่อสร้างกลับมีความจำกัดทางด้านทรัพยากรที่ใช้ในการดำเนินงาน ที่สำคัญได้แก่งบประมาณ บุคคลากร ระยะเวลาที่แน่นอน โดยมีทีมงานชั่วคราวและสถานที่ทำงานชั่วคราว งานก่อสร้างจึงต้องการการวางแผนทุกครั้งก่อนเริ่มดำเนินการ เพื่อช่วยให้งานก่อสร้างประสบความสำเร็จตามต้องการได้ ซึ่งการวางแผนจัดเป็นภารกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของการบริหารโครงการก่อสร้าง ที่จะต้องทำให้แล้วเสร็จตั้งแต่ก่อนเริ่มดำเนินงานโครงการก่อสร้าง การวางแผนโครงการก่อสร้างเป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและหาคำตอบได้ยาก เนื่องจากมีขั้นตอนการก่อสร้างที่ต่อเนื่องกันเป็นลำดับเป็นจำนวนมากและมีข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรโครงการหลากหลายด้าน จึงทำให้อาจมีแผนงานที่เป็นไปได้จำนวนมากและรวมทั้งมีแผนงานที่เป็นไปไม่ได้อีกจำนวนมากรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้แผนงานที่เป็นไปได้เหล่านี้ยังอาจมีประสิทธิภาพดีหรือไม่ดีไม่เท่ากัน วิธีการวางแผนที่ดีจึงควรทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นแผนงานที่เป็นไปได้สอดคล้องกับเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ และยังมีประสิทธิภาพดีที่สุดทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเป้าหมายที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพ

การวางแผนงานก่อสร้างเบื้องต้นจะมุ่งไปที่เป้าหมายด้านเวลาเป็นหลัก โดยยังละเลยเงื่อนไขข้อจำกัดด้านอื่นๆ เพื่อให้ได้แผนงานที่เป็นตารางเวลาการดำเนินกิจกรรมต่างของโครงการ ซึ่งวิธีการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมต่างๆของโครงการเรียกว่า “วิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต” (Critical Path Method: CPM) ข้อมูลเบื้องต้นของกิจกรรมก่อสร้างจะถูกกำหนดขึ้น ได้แก่ โครงสร้างการกระจายของกิจกรรม (Work Breakdown Structure: WBS) ระยะเวลาของกิจกรรม และความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆ และนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรม ซึ่งมีค่าเวลาต่างๆดังนี้

Earliest Start Time (ES) หมายถึง เวลาเริ่มที่เร็วที่สุดของกิจกรรมนั้น

Earliest Finish Time (EF) หมายถึง เวลาเสร็จที่เร็วที่สุดของกิจกรรมนั้น

Latest Start Time (LS) หมายถึง เวลาเริ่มที่ช้าที่สุดของกิจกรรมนั้น

Latest Finish Time (LF) หมายถึง เวลาเสร็จที่ช้าที่สุดของกิจกรรมนั้น

Free Float (FF) หมายถึง ช่วงเวลาเลื่อนก่อนที่กิจกรรมนั้นจะทำให้กิจกรรมถัดไป (successor) ล่าช้า

Total Float (TF) หมายถึง ช่วงเวลาเลื่อนก่อนที่กิจกรรมนั้นจะทำให้โครงการล่าช้า

กิจกรรมก่อสร้างต่างๆจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ และมักมีความสัมพันธ์แบ่งเป็นกลุ่มๆ โดยที่กลุ่มงานหนึ่ง ที่มีกิจกรรมต่างๆที่สัมพันธ์กันและเรียงต่อกันเป็นลักษณะสายทางจะเรียกว่า “สายทางกิจกรรม” (Path) ขณะที่ในระหว่างกลุ่มงานที่ไม่สัมพันธ์กัน จะมีลักษณะเป็นเส้นสายทางกิจกรรมที่ขนานกันไป แบบจำลองเน็ตเวิร์คของโครงการก่อสร้างหนึ่งนั้นจะต้องมีสายทางกิจกรรมอย่างน้อยหนึ่งสายที่เป็นตัวบ่งการกำหนดเสร็จสิ้นของทั้งโครงการ โดยจะเรียกสายทางกิจกรรมนั้นว่า “สายทางกิจกรรมวิกฤต” (Critical Path) และกิจกรรมต่างๆที่อยู่ในสายทางเหล่านั้นเรียกว่า “กิจกรรมวิกฤต” (Critical Activities) ซึ่งผู้ดำเนินโครงการจะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษกับสายทางกิจกรรมวิกฤตเพราะมีผลกระทบต่อกำหนดเสร็จสิ้นของทั้งโครงการ

การคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมจะช่วยทำให้ระบุได้ว่ากิจกรรมใดเป็นกิจกรรมวิกฤต โดยที่กิจกรรมใดที่มี TF เท่ากับศูนย์คือกิจกรรมวิกฤต สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเวลา สำหรับกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์รูปแบบธรรมชาติ (ปกติ) หรือรูปแบบ Finish-to-Start ระหว่าง Predecessors และ Successors มีดังนี้

$$ES_i = Max(EF_h);\ \forall h$$ **สมการที่ (2.1)**

$$EF_i = ES_i + D_i$$ **สมการที่ (2.2)**

$$LF_i = Min(LS_j);\ \forall j$$ **สมการที่ (2.3)**

$$LS_i = LF_i - D_i$$ **สมการที่ (2.4)**

$$FF_i = Min(ES_j) - EF_i;\ \forall j$$ **สมการที่ (2.5)**

$$TF_i = LS_i - ES_i$$ **สมการที่ (2.6)**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยที่ i คือกิจกรรมใดๆที่มี predecessors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ h และมี successors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ j

D_i คือ ระยะเวลาของกิจกรรม i

ค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมที่ได้จะช่วยให้สามารถจัดตารางเวลางานของโครงการก่อสร้างได้ โดยที่ทำให้ได้ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ บอกกำหนดวันเริ่มอย่างช้าและอย่างเร็วที่สุด และกำหนดวันเสร็จอย่างช้าและอย่างเร็วที่สุดของแต่ละกิจกรรม ทำให้รู้ว่าในแต่ละกิจกรรมจะสามารถดำเนินการล่าช้าได้สักเท่าใด รวมทั้งรู้ว่ากิจกรรมใดบ้างที่ห้ามดำเนินการล่าช้า

2.2 รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม โดยทั่วไปกิจกรรมก่อสร้างต่างๆไม่สามารถเริ่มดำเนินการหรือแล้วเสร็จได้ตามอิสระ แต่ขึ้นอยู่กับกิจกรรมอื่นๆที่กิจกรรมนั้นไปมีความสัมพันธ์ด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัด (constraints) ของกิจกรรมอย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติแล้วความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมใดๆสามารถแบ่งระดับความจำเป็นออกได้เป็น 2 ระดับ (Hinze 2008) คือ

1. ความสัมพันธ์ที่จำเป็น (logically required relationships or mandatory relationships) เป็นความสัมพันธ์อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางกายภาพของกระบวนการก่อสร้าง ที่ทำให้บางกิจกรรมต้องถูกดำเนินการไปตามลำดับโดยไม่สามารถหลีกเหลี่ยงได้ เช่น กิจกรรมผูกเหล็ก“จำเป็นต้อง” ทำก่อนกิจกรรมเทคอนกรีต หรือกิจกรรมการก่อสร้างโครงสร้างข้างบน “จำเป็นต้อง”ทำก่อนกิจกรรมการก่อสร้างโครงสร้างข้างล่าง (Project Management Institute 2012)

2. ความสัมพันธ์ที่ปรารถนา (preferred relationships or discretionary relationships) เป็นความสัมพันธ์เชิงนโยบายที่กำหนดลำดับการดำเนินการกิจกรรมต่างๆ เพื่อช่วยเอื้อประโยชน์ในการบริหารจัดการด้านต่างๆได้แก่ ด้านความปลอดภัย ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านข้อสัญญา ด้านการเงิน และด้านทรัพยากร ตัวอย่างเช่น กิจกรรมตกแต่งภายใน “ปรารถนาให้” มาก่อนกิจกรรมปรับปรุงบริเวณ หรือการที่ต้องทำกิจกรรมก่อนหลังเป็นลำดับอันเนื่องมาจากต้องการหมุนเวียนใช้ทรัพยากรชุดเดียวกัน

ในการวางแผนงานจึงควรกำหนดให้มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น เนื่องจากการมีความสัมพันธ์มากเกินไปจะทำให้เกิดข้อจำกัดในการจัดตารางเวลาและไม่ยืดหยุ่น และกำหนดให้มีความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างความสัมพันธ์ทั้งสองระดับ เพื่อให้เงื่อนไขความสัมพันธ์ที่ปรารถนาสามารถถูกทบทวนและปรับแก้ได้ตามความเหมาะสม อย่างไรก็ตามจะพบว่าแบบจำลองปัญหาการวางแผนของงานวิจัยที่ผ่านมาหรือซอฟแวร์ที่มีอยู่ ไม่มีความสามารถในการนี้ และภาระการพิจารณาตัดสินใจหรือทบทวนเงื่อนไขความสัมพันธ์จึงตกอยู่กับผู้วางแผนเอง (Hendrickson and Au 1989)

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมยังแบ่งออกได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้

1. Finish-to-Start (FS) คือเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่กำหนดให้กิจกรรมหนึ่งจะสามารถเริ่มดำเนินการได้ก็ต่อเมื่อ predecessor(s) ทั้งหมดเสร็จสมบูรณ์แล้ว ซึ่งความสัมพันธ์รูปแบบนี้เป็นรูปแบบปกติทั่วไปที่มักใช้ในการทำแผนงาน และในโครงการตัวอย่างของงานวิจัยต่างๆ

2. Start-to-Start (SS) คือเงื่อนไขที่กำหนดให้กิจกรรมหนึ่งจะสามารถเริ่มดำเนินการได้ก็ต่อเมื่อ predecessor(s) ทั้งหมดได้เริ่มดำเนินการแล้ว

3. Finish-to-Finish (FF) คือเงื่อนไขที่กำหนดให้กิจกรรมหนึ่งจะสามารถดำเนินการแล้วเสร็จได้ก็ต่อเมื่อ predecessor(s) ทั้งหมดได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว

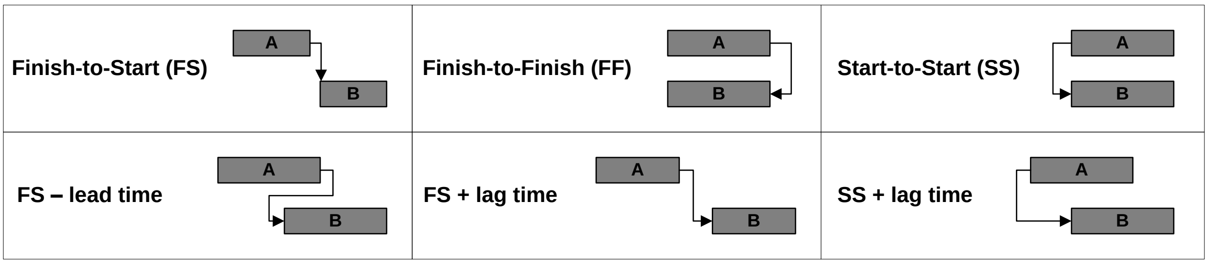
4. Start-to-Finish (SF) คือเงื่อนไขที่กำหนดให้กิจกรรมหนึ่งจะสามารถแล้วเสร็จได้ก็ต่อเมื่อ predecessor(s) ทั้งหมดได้เริ่มดำเนินการแล้ว ซึ่งความสัมพันธ์รูปแบบนี้เป็นความสัมพันธ์ที่ควรหลีกเลี่ยงการใช้เนื่องจากผิดธรรมชาติของการดำเนินโดยทั่วไป

นอกจากนี้ความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆเหล่านี้ยังมีสามารถมีการซ้อนเหลื่อมของเวลา (lead time) หรือการตามหลังเวลา (lag time) ได้อีกด้วย

Lead time คือการกำหนดช่วงเวลาที่ซ้อนเหลื่อมกัน เพื่อให้กิจกรรม successor มีกำหนดการดำเนินการเร็วขึ้น ซึ่งจะใช้ค่าตัวเลขติดลบเป็นการแสดงระยะเวลาที่ซ้อนเหลื่อมนี้ เช่น FS-5 days หมายถึงว่ากิจกรรมนี้ถูกกำหนดให้เริ่มทำก่อนที่กิจกรรม predecessor ของมันจะแล้วเสร็จเป็นเวลา 5 วัน

Lag time คือการกำหนดช่วงเวลาที่ตามหลังกัน เพื่อเป็นการชะลอกิจกรรม successor ให้มีกำหนดการดำเนินการช้าลง ซึ่งจะใช้ค่าตัวเลขบวกเป็นการแสดงระยะเวลาที่ตามหลังนี้ เช่น SS-5 days หมายถึงว่า กิจกรรมนี้ถูกกำหนดให้เริ่มทำหลังจากที่กิจกรรม predecessor ของมันได้เริ่มไปแล้วเป็นเวลา 5 วัน

รูปที่ 2.1 แสดงรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เป็นได้ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆเหล่านี้สามารถมีผลโดยตรงต่อกำหนดการเริ่มหรือเสร็จของกิจกรรมต่างๆ ที่จะส่งผลต่อไปยังระดับความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวัน การพิจารณาทบทวนรูปแบบความสัมพันธ์หรือการสร้างทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ จะช่วยให้การวางแผนงานโครงการมีความยืดหยุ่นขึ้นจึงช่วยเพิ่มโอกาสให้ได้แผนงานผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้นจากแบบจำลองปัญหาได้อย่างไรก็มีงานวิจัยจำนวนไม่มากที่สร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผนโดยพิจารณาผลของรูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลาย (Chassiakos and Sakellaropoulos 2005)



รูปที่ 2.1 แผนภาพบาร์ชาร์ตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมรูปแบบต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบพิเศษ (Special precedence relationships) ได้แก่ Start-to-Start (SS) และ Finish-to-Finish (FF) ที่นอกเหนือจากแบบอย่างง่าย Finish-to-Start นอกจากนี้ความสัมพันธ์แบบพิเศษนี้ยังใช้อาจกำหนดร่วมกับระยะเวลาซ้อนเหลื่อม (lead time) หรือตามหลัง(lag time) อีกด้วย โดยให้ค่าระยะเวลาซ้อนเหลื่อมเป็นจำนวนลบ และค่าระยะเวลาตามหลังเป็นจำนวนบวก ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบพิเศษเหล่านี้ทำหน้าที่เป็น constraints ของแบบจำลองปัญหา มีสมการดังนี้ (Chassiakos and Sakellaropoulos 2005)

Subject to:

FS: $$ST_j - FT_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.7)**

FS+L: $$ST_j - FT_i \geq L$$ **สมการที่ (2.8)**

FS-L: $$ST_j - FT_i \geq -L$$ **สมการที่ (2.9)**

SS: $$ST_j - ST_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.10)**

SS+L: $$ST_j - ST_i \geq L$$ **สมการที่ (2.11)**

FF: $$FT_j - FT_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.12)**

FF+L: $$FT_j - FT_i \geq L$$ **สมการที่ (2.13)**

โดยที่ให้ *ST* = เวลาเริ่มของกิจกรรม

FT = เวลาเสร็จของกิจกรรม

กิจกรรมที่ *i* คือ predecessor ของกิจกรรมที่ *j*

L = ระยะเวลาซ้อนเหลื่อมหรือตามหลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 แบบจำลองทั่วไปของปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีทรัพยากรจำกัด

ในการวางแผนงานโครงการก่อสร้างเบื้องต้นจะเริ่มต้นจากการกำหนดเวลาการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของโครงการด้วยเทคนิควิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต (CPM) เพื่อให้ได้กำหนดการทางเวลาของกิจกรรมทั้ง 6 ค่า คือ ES, EF, LS, LF, TF, และ FF โดยทั้งนี้ CPM มีสมมติฐานสำคัญที่กำหนดให้กิจกรรมต่างๆใช้ระยะเวลา (duration) ในการดำเนินการเป็นค่าที่แน่นอนค่าหนึ่ง (deterministic values) ซึ่งเมื่อเริ่มดำเนินกิจกรรมใดๆ แล้วจะไม่อนุญาตให้หยุดกลางคันจนกว่าแล้วเสร็จ (non-preemptable duration) และพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (activity dependency) เป็นหลักซึ่งเป็นมิติด้านเวลา โดยที่วิธี CPM ได้ละเลยเงื่อนไขที่สำคัญคือ ความจำกัดของทรัพยากรของโครงการที่ต้องใช้ในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ

กิจกรรมก่อสร้างใดๆจะต้องการใช้ทรัพยากรจำนวนหนึ่งที่ถูกกำหนดขึ้นโดยประมาณ ในการดำเนินการ กิจกรรมก่อสร้างใดๆอาจมีความต้องการใช้ทรัพยากรหลากหลายประเภท ได้แก่ แรงงาน เครื่องจักร พื้นที่ทำงาน ต้นทุน เงินสด และรวมทั้งระยะเวลา ซึ่งหากวิธี CPM ไม่ได้พิจารณาถึงข้อจำกัดของปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ในโครงการก่อสร้าง จึงอาจทำให้กำหนดเวลาของกิจกรรมที่คำนวณได้จากวิธี CPM เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากมีปริมาณทรัพยากรไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ วิธี CPM จึงเป็นการวางแผนงานในขั้นเบื้องต้นที่ต้องมีการปรับแก้กำหนดเวลาอีกครั้งหลังจากที่ได้พิจารณาเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากร (resources limitation)

เมื่อได้ตารางเวลาดังกล่าวในเบื้องต้นแล้วจึงนำมาปรับปรุงด้วยการพิจารณาถึงข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่มีอยู่จริงอีกทีหนึ่ง เนื่องจากสภาพความจำกัดของทรัพยากรเหล่านี้เองเป็นตัวกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของแผนงานก่อสร้าง ในลักษณะเดียวกับ Constraints ของแบบจำลองปัญหา Optimization ดังนั้น การวางแผนงานจึงสามารถถูกสร้างเป็นแบบจำลองปัญหาเพื่อทำการ Optimization ได้ การสร้างแบบจำลองปัญหาและการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problems) ทำให้ได้คำตอบเป็นแผนงานที่เหมาะสมที่สุดในด้านต่างๆที่เป็นเป้าหมายหลักของโครงการก่อสร้าง ได้แก่ เวลา ต้นทุน และทรัพยากร หรือเป็นการกำหนดแผนการใช้เวลา ต้นทุน และทรัพยากรของโครงการ (ที่มีอยู่อย่างจำกัด) ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (ในทุกด้าน หรือบางด้านที่ต้องการ)

มีงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากที่มุ่งพัฒนาการวางแผนและควบคุมงานโครงการก่อสร้าง ด้วยการใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองปัญหาและการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการก่อสร้าง และเงื่อนไขเฉพาะจำนวนมากที่มีผลกระทบต่อเป้าหมายหลักของโครงการ ทำให้ความพยายามในการพัฒนาเทคนิคเหล่านี้ยังคงต้องดำเนินต่อไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นแผนงานก่อสร้างที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดผลประโยชน์กับทีมงานโครงการก่อสร้าง อันจะนำไปสู่การพัฒนาของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซึ่งงานวิจัยที่มีความน่าสนใจและเกี่ยวข้องจำนวนหนึ่งได้ถูกรวบรวมและทบทวนไว้ในบทนี้ ลักษณะแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่พิจารณาเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากรโครงการอาจเรียกโดยรวมว่า Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) RCPSP จัดเป็นปัญหาแบบ NP-hard

optimization problem ที่หาคำตอบและจัดการยาก (RCPSP ‘‘is one of the most intractable problems in Operations Research” (Kolisch and Hartmann 2006)) โดยเฉพาะเมื่อมีขนาดใหญ่หรือมีจำนวนกิจกรรมมาก

ทรัพยากรของโครงการสามารถแบ่งประเภทออกเป็น ทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources) คือทรัพยากรที่เมื่อใช้ดำเนินการกิจกรรมหนึ่งจนแล้วเสร็จ สามารถนำไปใช้ดำเนินการกิจกรรมอื่นต่อไปได้ ตัวอย่างเช่น คนงาน และเครื่องจักร อีกประเภทคือ ทรัพยากรไม่หมุนเวียน (Nonrenewable resources: NR) คือทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เช่น งบประมาณ และวัสดุ ซึ่งทรัพยากรทั้งสองประเภทถูกกำหนดให้มีจำนวนจำกัด โดยที่ทรัพยากรหมุนเวียนจะมีความจำกัดที่ขณะเวลาใดๆต้องนำไปใช้ไม่เกิน RR_k (ทรัพยากรประเภทที่ k) และทรัพยากรไม่หมุนเวียนจะต้องใช้ตลอดทั้งโครงการรวมกันแล้วไม่เกิน NR_k (ทรัพยากรประเภทที่ k) (Zhang et al. 2006) ซึ่งหากพิจารณาแล้วจะพบว่าการจัดการทรัพยากรหมุนเวียนจะมีความยุ่งยากมากกว่าทรัพยากรไม่หมุนเวียน เนื่องจากต้องคำนึงถึงระดับการใช้งานทรัพยากรหมุนเวียนเทียบกับ ณ เวลาต่างๆของโครงการด้วย ทรัพยากรที่กล่าวถึงในปัญหา RCPSP จึงมักหมายถึงทรัพยากรประเภทหมุนเวียน

คำจำกัดความลักษณะทั่วไปของปัญหา RCPSP มีดังนี้ งานโครงการหนึ่งที่ประกอบด้วยกิจกรรมที่ต้องดำเนินการจำนวนทั้งหมด N กิจกรรม โดยกิจกรรมเหล่านี้มีเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ 2 ประเภทหลัก คือหนึ่ง เงื่อนไขความสัมพันธ์ของลำดับในการดำเนินการก่อนหลัง (Precedence constraints) ที่บังคับให้กิจกรรมที่ j ใดๆจะต้องไม่เริ่มดำเนินการก่อนที่ “กิจกรรมก่อนหน้า” (predecessors) ทั้งหมดของมันได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว เงื่อนไขประเภทที่สองคือ กิจกรรมเหล่านี้มีความต้องการใช้ทรัพยากรต่างๆในการดำเนินการ จำนวนทั้งหมด K ประเภท โดยที่ทรัพยากรเหล่านี้มีจำนวนจำกัด กิจกรรมที่ j ใดๆมีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทที่ k จำนวน r_{jk} หน่วย คงที่ตลอดระยะเวลาการดำเนินกิจกรรม d_j วัน โดยที่การดำเนินกิจกรรมเหล่านี้เป็นแบบต่อเนื่องจะไม่สามารถหยุดพักรอระหว่างกลางได้ (non-preemptable duration) ทรัพยากรประเภทที่ k ใดๆจะมีจำนวนจำกัดที่ R_k ที่ขณะเวลาใดๆ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลองปัญหาได้แก่ d_j, r_{jk}, R_k ถูกประมาณกำหนดขึ้นให้เป็นค่าแบบ non-negative and deterministic values วัตถุประสงค์ทั่วไปของ RCPSP คือการหาลำดับการดำเนินกิจกรรมทั้งหมด โดยสอดคล้องกับเงื่อนไข เพื่อให้ได้เวลาเสร็จสิ้นโครงการ (makespan) ที่สั้นที่สุด (Kolisch and Hartmann 2006)

อย่างไรก็ตามยังมีการจำกัดความเพิ่มเติมประเภทของแบบจำลองอีกเป็นแบบ multimode เนื่องจาก RCPSP โดยทั่วไป จะกำหนดให้แต่ละกิจกรรมมีวิธีการดำเนินการได้เพียง 1 วิธีเท่านั้น (single execution mode) โดยมี d_j, และ r_{jk} ตามลำดับ หากกิจกรรมใดๆสามารถมีวิธีการดำเนินการได้หลายวิธี (multiple execution modes) จะเรียกว่าเป็นแบบจำลองปัญหา Multimode resource-constrained project scheduling problem (MRCPSP) แต่ละวิธีดำเนินการของแต่ละกิจกรรมใดๆจะกำหนดให้ใช้ระยะเวลาและจำนวนทรัพยากรที่ต่างกัน (Zhang et al. 2006)

แต่ละกิจกรรมจะต้องเลือกวิธีดำเนินการเท่ากับวิธีใดวิธีหนึ่ง (m_j) ในจำนวนทางเลือกทั้งหมด M_j ของกิจกรรมนั้น โดยกิจกรรม j ใดๆที่เลือกดำเนินการวิธีที่ m_j จะมีระยะเวลา d_{jm} และมีความต้องการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนที่ k เป็นจำนวน rr_{jkm} หน่วยและต้องการใช้ทรัพยากรไม่หมุนเวียนที่ k เป็นจำนวน nr_{jkm} หน่วย วัตถุประสงค์ทั่วไปของแบบจำลองปัญหา MRCPSP จะเป็นการหา ส่วนผสมของวิธีดำเนินการ (mode combination) และลำดับการดำเนินการของกิจกรรมทั้งหมด เพื่อให้ได้ระยะเวลาโครงการที่สั้นที่สุด (Minimization of project duration or makespan) โดยเป็นไปตามเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากร

ประเด็นปัญหาในการพิจารณาปรับปรุงแผนงานตามข้อจำกัดของทรัพยากรโครงการหรือปัญหา RCPSP อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเด็นคือ การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด (Resource allocation) และการปรับระดับสมดุลการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) การจัดการกับปัญหาข้อจำกัดของทรัพยากรโครงการเหล่านี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าแผนงานโครงการที่ได้จะสามารถจัดสรรใช้ทรัพยากรที่มีได้อย่างต่อเนื่องและเต็มประสิทธิภาพ (Ammar and Mohieldin 2002) ซึ่งรายละเอียดของประเด็นปัญหาทั้งสองกล่าวไว้ในหัวข้อย่อยดังนี้

2.3.1 การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด

การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด (Resource allocation) เป็นแบบจำลองปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดการกับทรัพยากรโครงการประเภทต่างๆที่มีอยู่อย่างจำนวนจำกัด ได้แก่ แรงงาน, เครื่องจักร, พื้นที่ทำงาน เป็นต้น ทั้งประเภทหมุนเวียนและไม่หมุนเวียน และจะต้องจัดสรรใช้ไม่เกินกว่าขีดจำกัดนี้ (availability) ด้วยหลักการที่ว่า กิจกรรมก่อสร้างใดๆมีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆในปริมาณที่กำหนดแตกต่างกันไป กิจกรรมสองกิจกรรมใดที่ใช้ทรัพยากรเดียวกันและมีกำหนดเวลาดำเนินการซ้อนทับกัน จะทำให้ผลรวมจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรนั้นเพิ่มขึ้น โดยที่ ณ ขณะเวลาหนึ่ง จะไม่สามารถจัดสรรทรัพยากรหมุนเวียนประเภทหนึ่งได้เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ และผลรวมจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรไม่หมุนเวียนประเภทหนึ่งตลอดทั้งโครงการก็ไม่สามารถจัดสรรได้เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ (Hong Zhang, Tam, and Li 2006)

แนวทางที่ทำได้โดยที่ต้องรักษาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (dependence constraints) ไว้ คือ การเลื่อนกิจกรรมหนึ่งออกไปเพื่อดำเนินการในช่วงเวลาที่ไม่ทำให้เกิดการแย่งชิงทรัพยากรกันเอง โดยพยายามให้ระยะเวลาโครงการทั้งหมดเพิ่มขึ้นน้อยที่สุดหรือคงที่ ซึ่งหมายถึงควรเลื่อนกิจกรรมที่ไม่วิกฤตก่อนแล้วจึงเลื่อนกิจกรรมที่วิกฤตให้น้อยที่สุด คำตอบของปัญหาจึงเป็นกำหนดวันดำเนินการของกิจกรรมต่างๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรทุกประเภทไม่เกินขีดจำกัดและได้ระยะเวลาโครงการ (makespan) ที่สั้นที่สุด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดมีเป้าหมายในการจัดเรียงลำดับกิจกรรมต่างๆที่เหมาะสม ปัญหานี้จึงสามารถจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาประเภทการจัดเรียงลำดับ (Leu and Yang 1999) (Kolisch and Hartmann 2006) สมการทั่วไปของแบบจำลองปัญหา Resource allocation มีดังนี้

Solution variables: ST_i = เวลาเริ่ม (start time) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$Minimize\ T = Max\{EF_i\}; \forall i$$ สมการที่ (2.14)

Subject to: $\sum_i rr_{ikt} \leq RR_k; \forall t$

และ Activity dependency

โดยที่ T คือระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ

t คือวันที่ใดๆของโครงการ

rr_{ikt} คือจำนวนทรัพยากรหมุนเวียนประเภท k ที่กิจกรรม i ต้องการใช้ในวันที่ t

RR_k คือจำนวนทรัพยากรหมุนเวียนประเภท k ที่มีอยู่

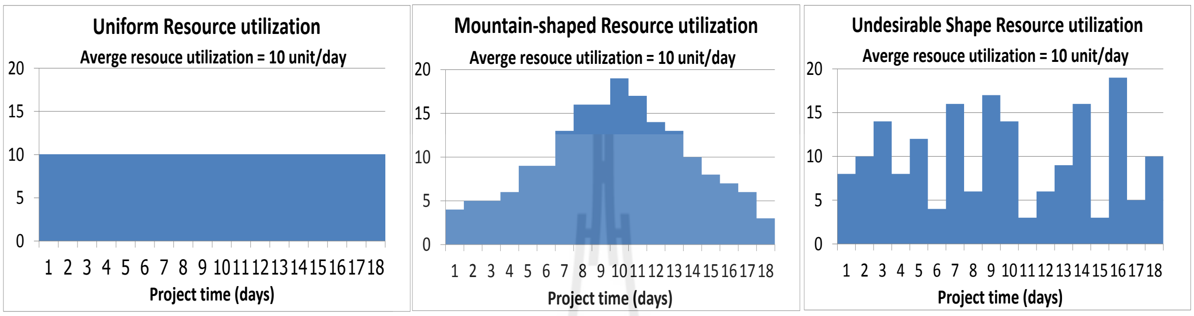
ส่วนงานของ (Ellis and Kim 2005) ได้เสนออีกวิธีการในการแบบจำลองปัญหาการจัดสรรทรัพยากรด้วยใช้หลักการของ future float เพื่อจัดลำดับความสำคัญของกิจกรรมต่างๆที่มีแย่งชิงการใช้ทรัพยากรกันและใช้เทคนิค genetic algorithms ในการหาคำตอบที่ให้ระยะเวลาโครงการสั้นที่สุด

2.3.2 การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร

การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) เป็นแบบจำลองปัญหาที่มีเป้าประสงค์ในการกำหนดหาวันดำเนินการของกิจกรรมต่างๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่างๆในแต่ละหน่วยเวลาใดๆมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาโครงการ ภายในระยะเวลาของโครงการที่กำหนด และยังคงต้องรักษาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (dependence constraints) ด้วยหลักการที่ว่ากิจกรรมก่อสร้างใดๆมีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทต่างๆในปริมาณที่กำหนดแตกต่างกันไป กิจกรรมสองกิจกรรมใดที่ใช้ทรัพยากรเดียวกันและมีกำหนดเวลาดำเนินการซ้อนทับกัน จะทำให้ผลรวมจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรนั้นเพิ่มขึ้น แนวทางการหาคำตอบที่ทำได้คือการเลื่อนกำหนดวันดำเนินการของกิจกรรมต่างๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรแต่ละประเภทมีค่าที่คงที่ที่สุด (Leu, Yang, and Huang 2000) เมื่อผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่างๆในแต่ละหน่วยเวลาใดๆมีความผันผวน (fluctuation) น้อยและเข้าใกล้ค่าเฉลี่ย จะทำให้ทรัพยากรโครงการที่ต้องจัดหาไว้มีจำนวนน้อยที่สุดที่เป็นไปได้

รูปลักษณะความผันผวนของระดับความต้องการใช้ทรัพยากรอาจแบ่งออกตามผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากร เป็น 2 ลักษณะคือ แบบที่เป็นที่ยอมรับได้ (acceptable fluctuations) และแบบที่ไม่เป็นที่ต้องการ (undesirable fluctuations) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 รูปลักษณะกราฟระดับความต้องการใช้ทรัพยากรที่มีความสม่ำเสมอที่เป็นที่ต้องการและยอมรับได้นั้น ควรจะเป็นรูปลักษณะกราฟสี่เหลี่ยม (rectangular shape) หรือรูปทรงภูเขา (mountain or parabolic shape) ทั้งนี้เนื่องจากรูปทรงภูเขามีแนวโน้มความต้องการใช้ที่สามารถบริหารจัดการได้ คือเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากตอนเริ่มโครงการจนถึงสูงสุด

ที่กลางโครงการและค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องจนจบโครงการ ซึ่งทำให้ผู้บริหารสามารถทยอยนำคนงานเข้าสู่โครงการโดยที่อาจมาจากโครงการก่อนหน้าและทยอยนำคนงานออกเมื่อจบโครงการ เพื่อนำไปให้โครงการถัดไป ซึ่งตรงข้ามกับลักษณะรูปกราฟที่ไม่เป็นที่ต้องการ ที่มีการขึ้นๆลงๆของระดับความต้องการใช้หลายรอบไม่แน่นอน ซึ่งถ้าไม่จ้าง-ปลด-จ้าง คนงานแบบไปๆมาๆก็จะต้องจัดหาเท่ากับจำนวนที่ต้องการสูงสุดเพื่อเตรียมพร้อมไว้ โดยต้องปล่อยให้ว่างงานบางช่วง (El-Rayes and Jun 2009) ดัชนีที่ใช้บ่งชี้ความผันผวนของระดับความต้องการใช้ทรัพยากรถูกเสนอโดยนักวิจัยต่างๆกัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะความผันผวนของระดับความต้องการใช้ทรัพยากรรูปทรงต่างๆ

ดัชนีที่ใช้บ่งชี้ความผันผวนของความต้องการใช้ทรัพยากรแต่ละประเภท มีใช้กันอยู่ 3 ลักษณะคือ การวัดค่าความเบี่ยงเบน (Resource deviation index) (Chan et al. 1996) (Leu, Yang, and Huang 2000) การวัดค่าโมเมนต์ของความผันผวน (Fluctuation moment) (Harris 1978); (Hegazy 1999) และการวัดค่าความไม่มีประสิทธิภาพ (El-Rayes and Jun 2009)

สมการทั่วไปของแบบจำลองปัญหา Resource leveling ด้วยลักษณะการใช้ค่าดัชนีเพื่อหาค่าความเบี่ยงเบนน้อยที่สุด มีดังต่อไปนี้

Solution variables: ST_i = เวลาเริ่ม (Start time) ของกิจกรรมที่ i

Objective function:

$$\boldsymbol{Minimize\ RDI = \sum_k^K w_k\, RD_k} \qquad \text{สมการที่ (2.15)}$$

$$\boldsymbol{RD = \sum_t^T (|r_t - \bar{R}|)} \qquad \text{สมการที่ (2.16)}$$

$$\boldsymbol{r_t = (\sum_i^n r_i)_t} \qquad \text{สมการที่ (2.17)}$$

$$\boldsymbol{\bar{R} = \sum_t^T \sum_i^n (r_i)_t / T} \qquad \text{สมการที่ (2.18)}$$

Subject to: $\boldsymbol{Max\{EF_i\}; \forall i = T}$

Activity dependency

โดยที่ให้ RDI = ดัชนีค่าความเบี่ยงเบนรวมของทรัพยากรทุกประเภท

w_k = ค่าน้ำหนักถ่วงความสำคัญของทรัพยากรประเภทที่ k

K = จำนวนประเภททั้งหมดของทรัพยากร

RD_k = ค่าความเบี่ยงเบนของทรัพยากรประเภทที่ k

r_t = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ในวันที่ t ใดๆ

r_i = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ของกิจกรรมที่ i

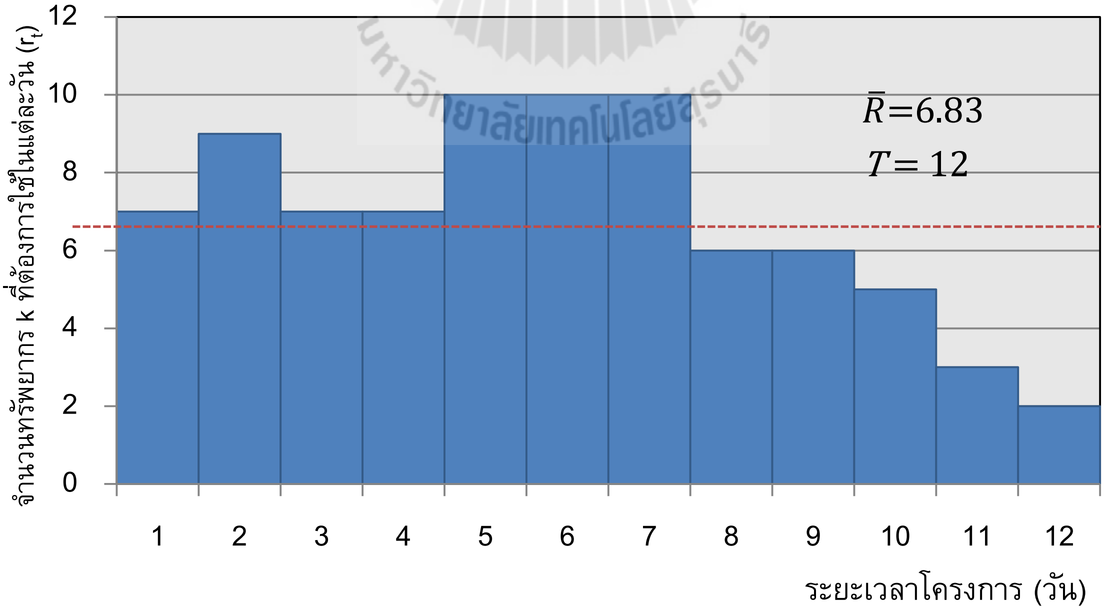
n = จำนวนกิจกรรมทั้งหมด

t = วันที่ใดๆของโครงการ

$\bar{\boldsymbol{R}}$ = จำนวนทรัพยากรเฉลี่ยที่ต้องการในแต่ละวัน

T = ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างกราฟแผนภูมิแท่งของความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทหนึ่งในแต่ละวัน (r_t) ของโครงการซึ่งมีค่าที่ผันผวนไม่คงที่ แต่มีค่าเฉลี่ย $\bar{\boldsymbol{R}}$ เท่ากับ 6.83



รูปที่ 2.3 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวัน

สมการทั่วไปของแบบจำลองปัญหา Resource leveling ด้วยลักษณะการใช้ค่าดัชนีเพื่อวัดค่าโมเมนต์ของความผันผวนน้อยที่สุด โดยเป็นการพิจารณาโมเมนต์ของความผันผวนทั้งรอบแกน x และแกน y ควบคู่กัน ซึ่งแกน x กำหนดให้เป็นแกน horizontal axis ที่แสดงระยะเวลาของโครงการ ขณะที่แกน y กำหนดให้เป็นแกน vertical axis ที่แสดงจำนวนทรัพยากรโครงการที่ต้องการใช้ มีดังนี้

Solution variables: ST_i = เวลาเริ่ม (start time) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize} \sum_{k}^{K} \left(\boldsymbol{M_{xk}} + \boldsymbol{M_{yk}}\right)$$ **สมการที่ (2.19)**

$$\boldsymbol{M_x} = \sum_{t}^{T} (\boldsymbol{r_t})^2$$ **สมการที่ (2.20)**

$$\boldsymbol{M_y} = \sum_{t}^{T} \left(\boldsymbol{r_t} \cdot (\boldsymbol{t} - \boldsymbol{d})\right)$$ **สมการที่ (2.21)**

Subject to: $\boldsymbol{Max}\{\boldsymbol{EF_i}\}; \forall \boldsymbol{i}$ = T

Activity dependency

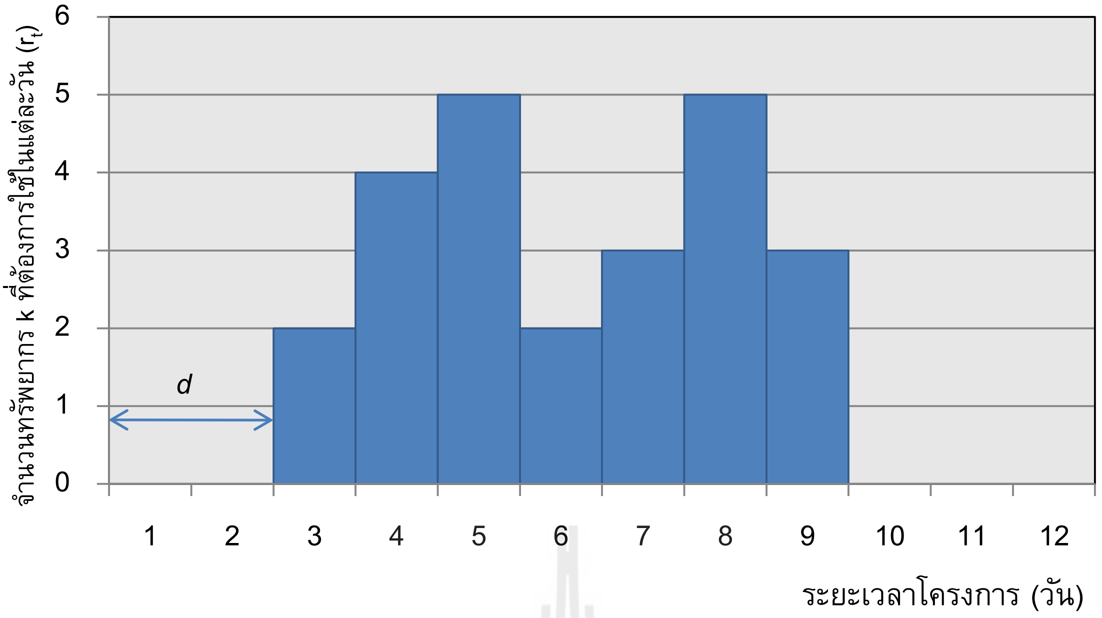
โดยที่ให้ M_{xk}= โมเมนต์รอบแกนนอน (แกน x แทนระยะเวลาโครงการ) ของความผันผวนของความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทที่ k

M_{yk} = โมเมนต์รอบแกนตั้ง (แกน y แทนจำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้) ของความผันผวนของความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทที่ k

r_t = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ในวันที่ t ใดๆ

d = วันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทหนึ่ง

T = ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ



รูปที่ 2.4 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและวันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากร (d)

รูปที่ 2.4 แสดงกราฟแผนภูมิแท่งของความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวัน (r_t) โดยมีแกนนอน (x) เป็นค่าระยะเวลาของโครงการ และแกนตั้ง (y) เป็นค่าจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากร และระยะเวลาห่างจากแกนตั้งเป็นวันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากร (d)

โดยงานวิจัยต่อมาของ El-Rayes and Jun (2009) ได้ชี้ว่ารูปแบบวิธีวัดค่าระดับสมดุลที่มีอยู่นั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากเป็นวิธีที่วัดค่าความต่างระหว่างระดับการใช้ที่เป็นอยู่กับรูปทรงระดับการใช้ที่เป็นที่ต้องการ (predetermined desirable shapes) ซึ่งได้แก่ รูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงภูเขา ดังนั้นคำตอบที่หาได้จึงมุ่งไปสู่รูปทรงเฉพาะที่เป็นที่ต้องการเท่านั้นและก็เป็นไปได้ยากที่จะได้รูปทรงที่ต้องการเนื่องจากข้อจำกัดต่างๆของแผนงาน นอกจากนี้วิธีวัดค่าระดับสมดุลที่มีอยู่ยังอาจใส่ค่าปรับ (penalize) รูปทรงอื่นๆของระดับการใช้ที่อาจมีประสิทธิภาพดีก็ได้ พวกเขาจึงได้เสนอวิธีการวัดค่าความสมดุลของระดับการใช้ทรัพยากรแบบใหม่ที่ไม่ยึดติดกับ predetermined desirable shapes เพียงเท่านั้น แต่มุ่งเน้นไปที่การลดรูปทรงที่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร (minimize undesirable resource fluctuations)ดัชนีที่ใช้วัดความไม่มีประสิทธิภาพของระดับการใช้ทรัพยากรถูกเสนอเป็น 2 ประเภท คือ Release and Re-Hire (RRH) และ Resource Idle Days (RID)

RRH คือดัชนีที่ใช้วัดผลรวมจำนวนทรัพยากรที่ต้องปล่อยให้ว่างงานชั่วคราวในช่วงที่ความต้องการใช้ต่ำ และต้องนำกลับมาใช้อีกครั้งในช่วงที่ความต้องการใช้กลับเพิ่มขึ้นมา ตลอดระยะเวลาของโครงการ

$$RRH = H - MRD = {}^{HR}/_{2} - MRD$$ **สมการที่ (2.22)**

$$HR = \left[r_1 + \sum_{t}^{T-1}|r_t - r_{t+1}| + r_T\right]$$ **สมการที่ (2.23)**

$$MRD = max(r_1,\ r_2, \ldots,\ r_T)$$ **สมการที่ (2.24)**

โดยที่ให้ H = ผลรวมจำนวนทรัพยากรประจำวันที่ต้องการเพิ่มขึ้น

HR = ผลรวมความผันผวนรายวันของความต้องการใช้ทรัพยากร

MRD = จำนวนทรัพยากรประจำวันที่ต้องการมากที่สุด

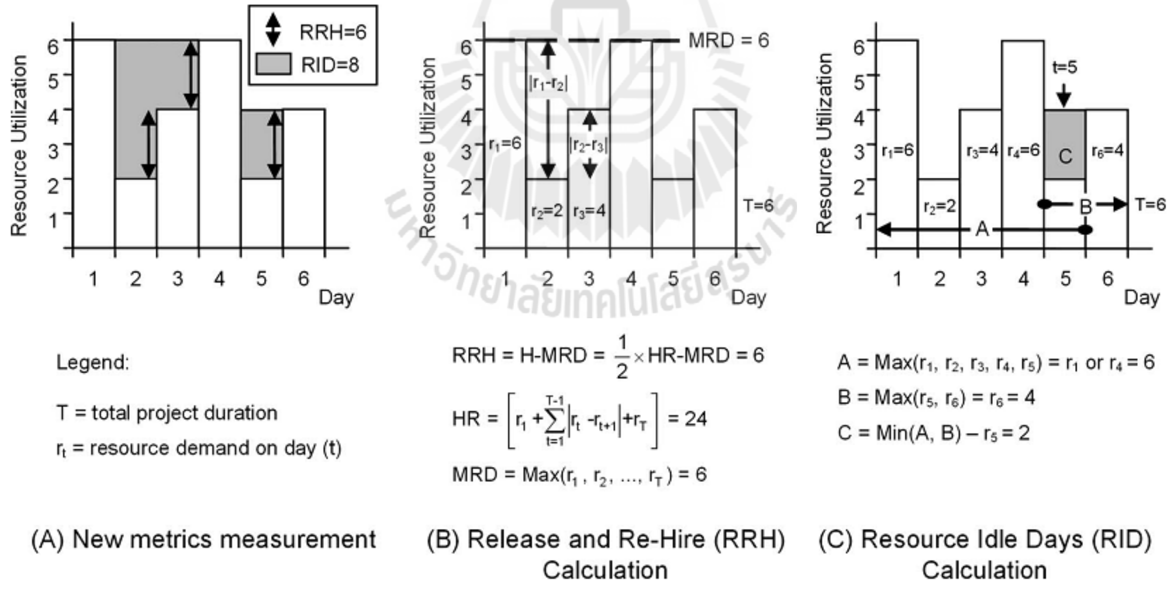
r_t = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการประจำวันที่ t

T = ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ

ดัชนีอีกตัวที่ใช้วันความไม่มีประสิทธิภาพของระดับการใช้ทรัพยากรคือ RID ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้วัดผลรวมของจำนวนทรัพยากรที่ว่างงานอันเนื่องมาจากความผันผวนของระดับความต้องการใช้

$$RID = \sum_t^T [r_t - min(\ max(r_1, r_2, \ldots,\ r_t), max(r_t, r_{t+1}, \ldots,\ r_T)\ )\ ]$$ **สมการที่ (2.25)**

รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนี RRH และ RID ที่เสนอโดย El-Rayes and Jun (2009) ด้วยการแสดงตัวเลขที่ได้จากการคำนวณค่าตามสูตรในสมการต่างๆ



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนี RRH และ RID (El-Rayes and Jun 2009)

สมการทั่วไปของแบบจำลองปัญหา Resource leveling ด้วยลักษณะการใช้ค่าดัชนีเพื่อวัดค่าความไม่มีประสิทธิภาพ ได้แก่ RRH RID ที่เสนอโดย El-Rayes and Jun (2009) มีดังนี้

Solution variables: ST_i = เวลาเริ่ม (start time) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize} \sum_{\boldsymbol{k}}^{K}(w_1\boldsymbol{RRH_k} + w_2\boldsymbol{RID_k})$$ **สมการที่ (2.26)**

Subject to: $\boldsymbol{Max}\{\boldsymbol{EF_i}\}; \forall \boldsymbol{i}$ = T

Activity dependency

โดยที่ให้ RRH_k = ดัชนีค่า Release and Re-Hire ของทรัพยากรประเภทที่ k

RID_k = ดัชนีค่า Resource Idle Days ของทรัพยากรประเภทที่ k

w_1 และ w_2 = ค่าถ่วงน้ำหนักของดัชนี RRH_k และ RID_k ตามลำดับ

แบบจำลองปัญหา RCPSP ที่ถูกเสนอโดยทั่วไปในการวิจัย จะกำหนดใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบ Finish-to-Start (FS) เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทั้งที่ในทางปฏิบัติ การวางแผนโครงการอาจกำหนดใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมหลากหลายแบบ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาโครงการและระดับการจัดสรรทรัพยากรซึ่งอาจทำให้ได้แผนงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงมากยิ่งขึ้น

การพิจารณา RCPSP ภายใต้เงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนดขึ้นเองนั้น อาจทำให้ไม่ได้แผนงานคำตอบที่ดีที่สุดอย่างที่ต้องการ เนื่องจากคำตอบแผนงานที่เป็นไปได้จะเป็นการเลื่อนวันเริ่มของกิจกรรมต่างๆภายในระยะเวลาโฟลตของตนเองเท่านั้น การสร้างทางเลือกของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมบางอัน (เท่าที่จำเป็น) สามารถช่วยให้แผนงานที่สร้างขึ้นมีความยืดหยุ่นขึ้น มีคำตอบที่เป็นไปได้มากขึ้น จึงเพิ่มโอกาสในการได้แผนงานที่ดีขึ้น รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่หลากหลายได้แก่ การมีหรือไม่มีความสัมพันธ์, Finish-to-Start, Start-to-Start, และ Finish-to-Finish ที่ใช้กันอยู่ในทางปฏิบัตินั้น รวมทั้งลักษณะการซ้อนเหลื่อมของเวลา (lead time) หรือการตามหลังเวลา (lag time) สามารถนำมาสร้างทางเลือกเป็นตัวแปรคำตอบของแบบจำลองปัญหาได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4 เงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม

จากการทบทวนแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานก่อสร้าง RCPSP นั้นมีข้อจำกัดเบื้องต้นที่ใช้ในการจัดตารางเวลา คือความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (activity relationships) และเงื่อนไขด้านเวลาซึ่งงานวิจัยต่างๆที่พัฒนาแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานมักจะสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นรูปแบบปกติคือแบบ Finish-to-Start (FS) เพียงแบบเดียวเท่านั้นโดยละเลยความหลากหลายของเงื่อนไขด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในทางปฏิบัติการวางแผนงานโครงการก่อสร้างมักกำหนดใช้ความสัมพันธ์หลายรูปแบบ บางก็เพื่อพยายามเร่งรัดกิจกรรมก่อสร้างให้ถูกดำเนินการไปแบบขนานกันเพื่อลดระยะเวลาของโครงการ รวมทั้งบางกิจกรรมก็ยังมีเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาเป็นตัวกำหนดวันเริ่มและวันเสร็จที่เหมาะสมนอกเหนือจากการถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเอง เงื่อนไขด้านเวลาของกิจกรรมต่างๆที่มีใช้กันอยู่ในการวางแผนโครงการ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบทั่วไปต่างๆ เงื่อนไขด้านการวางแผน

กิจกรรม และเงื่อนไขภายนอกด้านเวลา ซึ่งการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนที่สามารถรวมเอาเงื่อนไขด้านเวลาต่างๆเหล่านี้ได้จะช่วยให้แผนงานที่ได้มีความสมจริงสอดคล้องกับโครงการก่อสร้างในทางปฏิบัติ

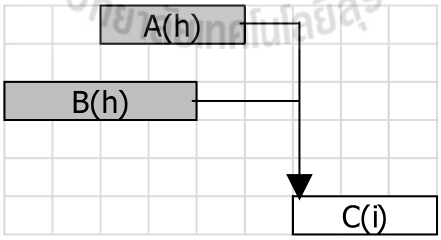
งานวิจัยของ Chassiakos and Sakellaropoulos (2005) ได้เสนอแบบจำลองปัญหาการแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน (Time-Cost Trade-off: TCT) ที่มุ่งเน้นพิจารณาถึงความหลากหลายของเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง โดยที่พวกเขาได้จัดแบ่งเงื่อนไขพิเศษออกเป็นสามกลุ่มคือ ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบทั่วไป (Generalized precedence relationships) เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม (Activity planning constraints) และเงื่อนไขภายนอกด้านเวลา (External time constraints) และได้สร้างสมการเพื่อรวมเอาเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาเหล่านี้เข้าไว้ในแบบจำลองปัญหาการวางแผน

2.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบทั่วไป

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบทั่วไป (Generalized precedence relationships) ได้แก่ ความสัมพันธ์รูปแบบ Start-to-Start (SS) และ Finish-to-Finish (FF) (ไม่พิจารณาความสัมพันธ์รูปแบบ Start-to-Finish (SF) เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ที่ผิดธรรมชาติและเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ) ที่นอกเหนือจากรูปแบบปกติ Finish-to-Start (FS) นอกจากนี้ความสัมพันธ์รูปแบบทั่วไปนี้ยังใช้อาจกำหนดร่วมกับระยะเวลาซ้อนเหลื่อม (lead time) หรือตามหลัง (lag time) อีกด้วย โดยให้ค่าระยะเวลาซ้อนเหลื่อมเป็นจำนวนลบและค่าระยะเวลาตามหลังเป็นจำนวนบวก ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบพิเศษเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันข้อจำกัด (constraints) ของแบบจำลองปัญหา มีสมการดังนี้

Subject to:

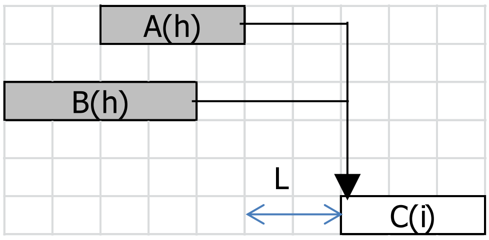
FS: $$ST_i - FT_h \geq 0$$ **สมการที่ (2.27)**



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B

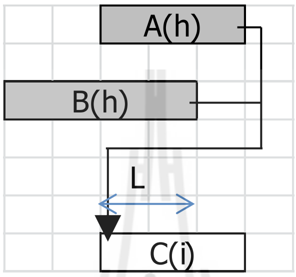
FS+L: $$ST_i - FT_h \geq L$$ **สมการที่ (2.28)**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



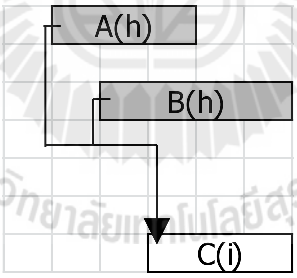
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor A

FS-L: $$ST_i - FT_h \geq -L$$ **สมการที่ (2.29)**



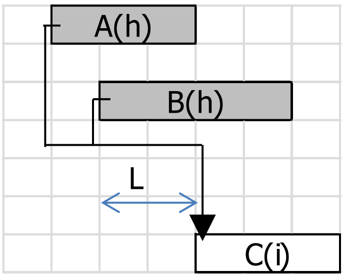
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์แบบ FS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lead time กับกิจกรรม predecessor B

SS: $$ST_i - ST_h \geq 0$$ **สมการที่ (2.30)**



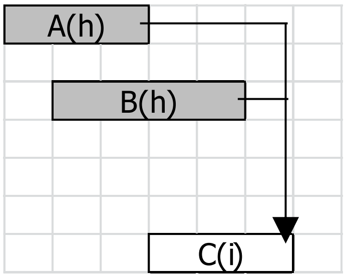
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์แบบ SS ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B

SS+L: $$ST_i - ST_h \geq L$$ **สมการที่ (2.31)**



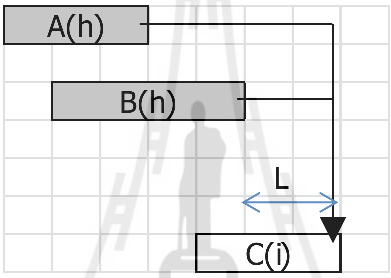
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์แบบ SS ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor B

FF: $$FT_i - FT_h \geq 0$$ **สมการที่ (2.32)**



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์แบบ FF ที่กิจกรรม C มีกับกิจกรรม predecessors A และ B

FF+L: $$FT_i - FT_h \geq L$$ **สมการที่ (2.33)**



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์แบบ FF ที่กิจกรรม C มีเวลา Lag time กับกิจกรรม predecessor B

โดยที่ให้ ST_i = เวลาเริ่มของกิจกรรม *i* ใดๆ

FT_i = เวลาเสร็จของกิจกรรม *i* ใดๆ

กิจกรรมที่ *h* = กิจกรรม predecessors ทั้งหมดของกิจกรรมที่ *i*

L = ระยะเวลาซ้อนเหลื่อมหรือระยะเวลาตามหลัง

จะเห็นได้ว่าสมการที่ 2.27-2.33 เป็นสมการที่ใช้เป็นฟังก์ชันข้อจำกัดของแบบจำลองที่ใช้บังคับให้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างคู่กิจกรรมใดๆเป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งสมการบังคับความสัมพันธ์รูปแบบทั่วไปนี้สามารถใช้ร่วมกับได้กับสมการที่ 2.1-2.6 ซึ่งแสดงเงื่อนไขความสัมพันธ์รูปแบบปกติหรือ Finish-to-Start (FS)

2.4.2 เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม

เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม (Activity planning constraints) ได้แก่ As Soon As Possible (ASAP) และ As Late As Possible (ALAP) คือการกำหนดให้กิจกรรมถูกเริ่มดำเนินการหรือให้เสร็จสิ้นอย่างเร็วที่สุดที่เป็นไปได้ (ภายในช่วงระยะเวลาโฟลต (Total float) ที่กิจกรรมนั้นมีอยู่) และอย่างช้าที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งลักษณะเงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรมนี้จะมีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นไม่ตายตัว เนื่องจากไม่ได้กำหนด

ระยะเวลาหรือวันที่ที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นเงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรมจึงถูกนำมาสร้างเป็นสมการในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง ได้ดังนี้

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize}(\dots\dots + \boldsymbol{w_1}\sum_{i\in ASAP}\boldsymbol{ST_i} - \boldsymbol{w_2}\sum_{i\in ALAP}\boldsymbol{FT_i}) \qquad \text{สมการที่ (2.34)}$$

โดยที่ให้ ST_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i

FT_i = เวลาเสร็จของกิจกรรมที่ i

ASAP = เซ็ตของกิจกรรมที่ถูกกำหนดเงื่อนไข ASAP

ALAP = เซ็ตของกิจกรรมที่ถูกกำหนดเงื่อนไข ALAP

w_1 , w_2 = ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ปรับความสำคัญของเงื่อนไขกลุ่มนี้

การเพิ่มพจน์ของเงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรมไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นแบบ Minimization ช่วยบังคับให้โมเดลหาคำตอบที่เป็นไปตามเงื่อนไขตามที่กำหนด เนื่องจากเงื่อนไขแบบ ASAP จะต้องการให้ผลรวมของค่าเวลาเริ่มของกิจกรรม (ที่มีเงื่อนไขนี้) น้อยที่สุด ในขณะที่เงื่อนไขแบบ ALAP จะต้องการให้ผลรวมของค่าเวลาเริ่มของกิจกรรม (ที่มีเงื่อนไขนี้) มากที่สุด ซึ่งในที่นี้สามารถสร้างด้วยการใช้เครื่องหมาย “ลบ” หน้าพจน์นี้

2.4.3 เงื่อนไขภายนอกด้านเวลา

เงื่อนไขภายนอกด้านเวลา (External time constraints) ได้แก่ Start No Earlier Than (SNET), Start No Later Than (SNLT), Finish No Earlier Than (FNET), Finish No Later Than (FNLT), Must Start On (MSO), และ Must Finish On (MFO) ซึ่งลักษณะเงื่อนไขภายนอกด้านเวลาเหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงตายตัว ที่ถูกกำหนดเงื่อนไขมาพร้อมกับระยะเวลาหรือวันที่ที่ต้องดำเนินการ ดังนั้นเงื่อนไขภายนอกด้านเวลาจึงถูกนำมาสร้างเป็นสมการที่ทำหน้าที่เป็น constraints ของแบบจำลองปัญหา มีสมการดังนี้

Subject to:

SNET+C_i :

$$\boldsymbol{ST_i \geq C_i} \qquad \text{สมการที่ (2.35)}$$

MSO+C_i :

$$\boldsymbol{ST_i = C_i} \qquad \text{สมการที่ (2.36)}$$

SNLT+C_i : $$ST_i \leq C_i$$ สมการที่ (2.37)

FNET+C_i : $$FT_i \geq C_i$$ สมการที่ (2.38)

MFO+C_i : $$FT_i = C_i$$ สมการที่ (2.39)

FNLT+C_i : $$FT_i \leq C_i$$ สมการที่ (2.40)

โดยที่ให้ ST_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i

FT_i = เวลาเสร็จของกิจกรรมที่ i

C_i = วันที่ที่เป็นเงื่อนไขภายนอกของกิจกรรมที่ i

การนำสมการทั้งหลายเหล่านี้ไปรวมกับแบบจำลองปัญหาการวางแผนจะช่วยทำให้เกิดการพิจารณาถึงความหลากหลายของเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง อันจะทำให้แบบจำลองปัญหาการวางแผนที่ได้มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น รวมทั้งช่วยให้ผู้วางแผนสามารถเลือกใช้เงื่อนไขด้านเวลาต่างๆสำหรับกิจกรรมหนึ่งใดๆได้อย่างอิสระตามที่ต้องการ

2.5 วิธีการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหา

แบบจำลองปัญหาการวางแผนที่พิจารณาความจำกัดของทรัพยากร (Resource-constrained project scheduling problem: RCPSP) ดังที่ทบทวนผ่านมาในข้างต้น ทำให้สามารถจัด RCPSP ได้ว่าเป็นปัญหาแบบ NP-hard problem (Leu and Yang 1999) ซึ่งหมายถึงว่าเป็นปัญหาที่ต้องใช้ความพยายามและเวลาอย่างมากในการคำนวณหาคำตอบ (NP มาจาก Nondeterministic polynomial time) เนื่องจากมีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solution space) ทั้งหมดเป็นจำนวนมากมายมหาศาล วิธีในการหาคำตอบของ RCPSP มีอยู่หลากหลายวิธี (Feng et al. 2000) ซึ่งอาจแบ่งเป็น 4 กลุ่มหลักคือ Heuristic methods, Mathematical methods, Simulations และ Searching Algorithms

Heuristic methods เป็นวิธีดั้งเดิมที่สามารถใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลายรูปแบบด้วยการใช้กฎหรือขั้นตอนมาตรฐานที่เป็น rules of thumb โดยไม่มีเหตุผลทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีที่เรียบง่าย ใช้เวลาไม่มากในการหาคำตอบและมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีข้อเสียที่ไม่รับประกันว่าคำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ optimal และคำตอบที่ได้ก็ขึ้นอยู่กับโจทย์ปัญหานั้นๆ (problem dependent)

Mathematical methods เป็นการจัดรูปปัญหาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการแก้สมการและหาคำตอบที่ optimal ด้วย Linear programming, Non-linear programming, Integer programming และ Dynamic Programming ซึ่ง Mathematical methods เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลกับปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก แต่ต้องใช้ความพยายามในการคำนวณหาคำตอบมาก

Simulation เป็นวิธีการหาคำตอบด้วยการสุ่มค่าพารามิเตอร์บางตัวของแบบจำลองปัญหา เช่น ระยะเวลา หรือต้นทุนของกิจกรรม คำตอบที่ได้จากวิธีนี้ก็ไม่รับประกันว่าเป็น optimal แต่เป็นประมาณหาคำตอบที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด

Searching algorithms เป็นวิธีการสุ่มเลือกคำตอบใดๆจากคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solutions) จำนวนมากขึ้นมาพิจารณาเปรียบเทียบว่าคำตอบใดดีกว่ากัน โดยจะบังคับทิศทางการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นเรื่อยๆ วิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้ได้แก่ Simulated Annealing, Tabu Search, Genetic Algorithms, Swarm Particle, และ Neural Networks นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ยังสามารถใช้ได้ดีกับแบบจำลองปัญหาที่มีหลายเป้าหมาย (Multi-objective function) (Feng et al. 2000) เนื่องจากให้คำตอบที่เป็น Non-dominated solutions (Leu and Yang 1999) และกับแบบจำลองปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน (Zhang et al. 2005) และยังเรียกวิธีการหาคำตอบกลุ่มนี้ว่า Metaheuristic methods การพัฒนาของวิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้คือ ความพยายามลดเวลาที่ใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่ดี และการปรับปรุงคุณภาพของคำตอบที่ได้โดยการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ใน local optima (Elbeltagi et al. 2005)

หากพิจารณาที่คำตอบที่ได้อาจแบ่งวิธีการหาคำตอบออกเป็นแบบ exact solution methodsกับ approximate solution methods (Zhang et al. 2005) (Chassiakos and Sakellaropoulos 2005) วิธีการแก้ปัญหาที่ให้คำตอบแบบ exact solution หรือคำตอบที่รับประกันว่าเป็น optimal solution ได้แก่ วิธี linear และ non-linear programming, integer programming, และ constraint programming ส่วนวิธีแบบ approximate solution จะพยายามหาคำตอบที่ดีเท่าที่หาได้ ซึ่งในปัญหาที่มีขนาดใหญ่อาจได้คำตอบที่ไม่ใช่ optimal solution ได้แก่ วิธี simulated annealing, tabu search, genetic algorithms, swarm particle, และ neural networks

ในความเป็นจริงแล้ว แผนงานของโครงการก่อสร้างหนึ่ง มักนำมาสร้างได้เป็นแบบจำลองปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ดูจะเป็นวิธีการที่เหมาะสม ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองปัญหาที่ซับซ้อนใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานเพื่อทำให้ง่าย (Simplification) การทบทวนวิธีการหาคำตอบต่อไปนี้จึงได้เลือกเฉพาะวิธีที่มีศักยภาพเหมาะสำหรับแบบจำลองปัญหาที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่

2.5.1 Genetic algorithms

Genetic algorithms เป็นวิธีการหาคำตอบแบบที่ค้นหาสุ่มตามโอกาส (Stochastic search) ที่มีหลักการพื้นฐานได้มาจากการเลียนแบบพันธุกรรมและกระบวนการวิวัฒนาการ (Evolution) ของสิ่งมีชีวิต เริ่มแรก คำตอบที่เป็นไปได้ของปัญหาจำนวนกลุ่มหนึ่งจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ตัวแทนของ “ประชากร” (Population) ของ “โครโมโซม” (Chromosomes) โดยในแต่ละโครโมโซมจะใช้แทนหนึ่งคำตอบที่เป็นไปได้ โครโมโซมเหล่านี้จะผ่านเข้าสู่กระบวนการวิวัฒนาการเป็นประชากรใน “รุ่น” (Generations) ถัดๆไป โครโมโซมของรุ่นลูกได้จากผลของ “ปฏิบัติการจับคู่แลกเปลี่ยนยีน” (Crossover operation) ของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ และ “ปฏิบัติการกลายพันธุ์” (Mutation operation) ของยีนใดๆในโครโมโซมรุ่นลูกนั้น กระบวนการวิวัฒนาการนี้จะถูกกำหนดด้วยหลักการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural selection) หรือ “Survival of the fittest” คือการที่โครโมโซมรุ่นพ่อแม่ใดๆที่มี“ความแข็งแรง” (Fitness) มากกว่าก็ย่อมมีโอกาสมากกว่าที่จะให้กำเนิดรุ่นลูก ถ่ายทอดโครโมโซมที่ดีไปสู่รุ่นต่อไป ในขณะที่โครโมโซมใดไม่แข็งแรงเท่าก็มีโอกาสจะหายไป การพิจารณาความแข็งแรงของโครโมโซมใดๆในที่นี้หาได้จากการนำคำตอบที่เป็นโครโมโซมนั้นแทนค่าลงใน Objective function แล้วเปรียบเทียบและประเมินค่าของ Objective function ที่ได้ สุดท้ายจะได้ประชากรรุ่นสุดท้ายที่เป็นกลุ่มโครโมโซมที่เป็นคำตอบของปัญหา ที่แสดงแทน optimal หรือ near-optimal solutions

ขั้นตอนที่สำคัญมากอันหนึ่งของ GA คือ “การเข้ารหัส” (Encoding) ของโครโมโซม เนื่องจากโครโมโซมจะต้องเป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้ใดๆอันหนึ่ง ลักษณะของโครโมโซมโดยทั่วไปจะใช้แสดงแทนด้วยสายของตัวอักษร (String of characters) ซึ่ง string นี้จะแสดงถึงคำตอบที่เป็นไปได้อันหนึ่งด้วยดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าในโครโมโซมจะประกอบไปด้วย ยีน (Genes) ต่างๆ โดยมีค่าของยีน (Gene value) และตำแหน่งของยีน (Gene position) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งในแบบจำลอง RCPSP ในลักษณะปัญหา Resource leveling นั้น โดยทั่วไปมีคำตอบที่ต้องการหาหรือตัวแปรคำตอบ (solution variables) เป็นวันเริ่มของกิจกรรม (activities’ start times) สามารถทำการเข้ารหัสค่าตัวเลขวันเริ่มเหล่านี้เป็นค่ายีนของสายโครโมโซมหนึ่ง โดยที่ตำแหน่งของยีนจะสามารถใช้แทนหมายถึงตัวกิจกรรมที่ i ของโครงการ เช่น ตำแหน่งยีนที่ 1 เป็นค่าวันเริ่มของกิจกรรม A ตำแหน่งยีนที่ 2 เป็นค่าวันเริ่มของกิจกรรม B เป็นต้น ดังนั้นโครโมโซมจึงมีจำนวนยีนเท่ากับจำนวนกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	8	10	19	22	28	30	38	41	49	51	57	61	69	70

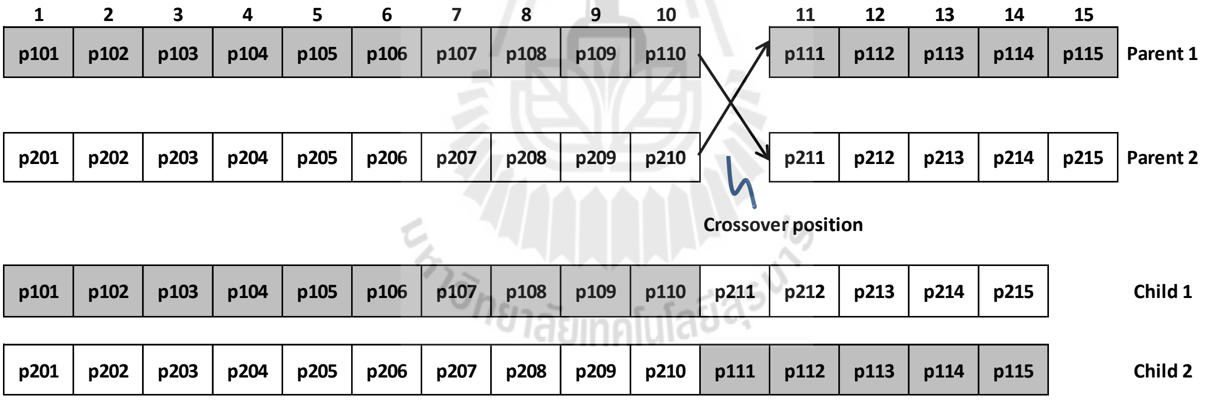
legend:

Gene position
Gene value

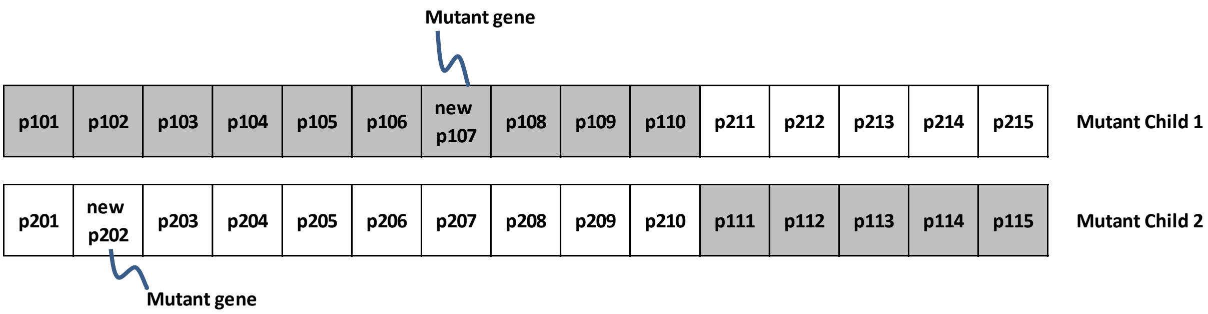
รูปที่ 2.13 สายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทนโครโมโซม

เนื่องจาก GA ใช้วิธีค้นหาคำตอบที่ดีด้วยการเลียนแบบหลักการของการวิวัฒนาการ ดังนั้นสมมติฐานหลักของ GA คือ โครโมโซมพ่อแม่ที่ดีย่อมทำให้เกิดโครโมโซมลูกที่ดีกว่าขึ้นได้ ซึ่งหากเป็นไปตามสมมติฐานก็จะทำให้การถ่ายทอดโครโมโซมต่อๆกันเป็นรุ่นไม่สูญเปล่าแต่ได้คำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆ กระบวนการวิวัฒนาการของโครโมโซมคำตอบที่สร้างขึ้นแล้ว เกิดขึ้นจากปฏิบัติการ ของ GA ในระดับโครโมโซม 2 กระบวนการคือ Crossover operation และ Mutation operation การค้นหาคำตอบด้วย GA จึงจะมีประสิทธิภาพดี ดังนั้นแสดงว่า Crossover operation จะต้องทำเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (Parent chromosomes) คู่หนึ่งเพื่อให้ได้โครโมโซมรุ่นลูก (Offspring chromosomes) และรูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการกลายพันธุ์ของโครโมโซมรุ่นลูก เพื่อให้ได้ค่ายีนใหม่ที่ต่างจากยีนของพ่อและแม่

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง คำตอบที่ดีอยู่แล้วอาจโดนทำลายด้วย Crossover operation (Chan et al. 1996) บางครั้งอาจทำให้เกิดโครโมโซมรุ่นลูกที่ไม่เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ หรือเป็น illegal schedules ได้เนื่องจากเช่น ให้กิจกรรมที่ซ้ำกัน หรือละเมิดเงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม หรือด้านเวลา หรือด้านข้อจำกัดด้านทรัพยากร ดังนั้นการนำวิธี GA มาใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหาการวางแผนต้องมีส่วนที่จัดการหรือมีมาตรการปรับปรุงแก้ไขกับคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ที่อาจเกิดขึ้นได้เหล่านี้ การที่ต้องจัดการกับ illegal schedules ที่เกิดขึ้นมีผลให้เพิ่มเวลาในการค้นหาคำตอบเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.14 ปฏิบัติการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่เพื่อให้ได้รุ่นลูก



รูปที่ 2.15 ปฏิบัติการกลายพันธุ์ของโครโมโซมรุ่นลูก

ดังนั้นวิธีการเข้ารหัสโครโมโซมจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบ เนื่องจากส่งผลให้มีเกิดโอกาสการเกิด illegal schedules ได้มากหรือน้อย (Chan et al. 1996) ได้ชี้ว่ามีประเด็นที่ควรพิจารณาในการเข้ารหัสโครโมโซมให้เหมาะสมอยู่สามประการคือ การกำหนดตัวแปรคำตอบของแบบจำลอง (Solution variables) การเข้ารหัสค่าตำแหน่งของยีน (Gene positions) และการเข้ารหัสค่าของยีน (Gene values) สำหรับแบบจำลองปัญหาการวางแผนงาน โครโมโซมที่เป็นสายตัวอักษรแสดงแทนคำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้ของแผนงานมักเข้ารหัสเป็นดังนี้ การจัดการกับ illegal schedules มีหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ได้ผลดีถูกเสนอโดย (Bean 1994) ด้วยการใช้ random number ในการเข้ารหัสค่าของยีน แล้วใช้การเปรียบเทียบค่าแบบ relative values แทนการใช้ค่าของยีนนั้นๆโดยตรง ซึ่งทำให้โครโมโซมรุ่นลูกที่ได้หลังจากปฏิบัติการทางพันธุกรรม ยังคงเป็นคำตอบที่เป็นไปได้

อีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญของวิธีการหาคำตอบแบบ GA คือการ mapping ลำดับของกิจกรรมเป็นสายของโครโมโซม (Activity-to-gene mapping) เนื่องจากโครโมโซมมีลักษณะเป็นสายของตัวอักษรแบบสายเดียว 1 มิติ (linear string of genes) ในขณะที่เน็ตเวิร์คของกิจกรรมก่อสร้างมีลักษณะเป็นโครงสร้างความสัมพันธ์ 2 มิติ การเข้ารหัสแผนงานเป็นโครโมโซมจึงเป็นการแปลงที่ทำให้โครงสร้างของเน็ตเวิร์คหายไป การกระทำแบบนี้เรียกว่า Topological sorting ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ (Chan et al. 1996) ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธี topological sorting และ linear sorting ในการทำ Activity-to-gene mapping พบว่าการใช้วิธี topological sorting ให้ผลที่ดีกว่า โดยสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วกว่า

ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมของงานวิจัยต่างๆที่น่าสนใจมีดังนี้ Chan et al. (1996) สร้างแบบจำลองปัญหาแบบ Resource-constrained project scheduling โดยใช้ค่าตำแหน่งของยีนแทนกิจกรรมที่ i และใช้ค่าของยีนแทน ค่าความสำคัญ (priority) ของการจัดสรรทรัพยากร และยังใช้ค่าของยีนแทนสัดส่วนระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรมด้วย งานของ Feng et al. (2000) สร้างแบบจำลองปัญหาแบบ Time Cost Trade-off ใช้ค่าตำแหน่งของยีนแทนกิจกรรมที่ i และใช้ค่าของยีนแทน “ทางเลือก” ของการดำเนินกิจกรรม งานของ (Leu and Yang 1999) แบ่งแบบจำลองออกเป็นสองเฟส ทั้งสองเฟสใช้ค่าตำแหน่งของยีนแทนกิจกรรมที่ i โดยที่เฟสแรกเป็นแบบจำลองปัญหาแบบ Time Cost Trade-off และ Resource allocation ใช้ค่าของยีนเป็นระยะเวลาของกิจกรรมและเฟสที่สองเป็นแบบจำลองปัญหาแบบ Resource leveling ใช้ค่าของยีนเป็นวันเริ่มของกิจกรรมที่ i พบว่าการเข้ารหัสโครโมโซมของแบบจำลองของ (Leu and Yang 1999) ทำให้เกิด illegal schedules ได้ง่าย ลักษณะการแบ่งแบบจำลองปัญหาออกเป็นสองเฟสนี้พบได้อีกครั้งในงานของ Chen and Weng (2009)

กระบวนการวิวัฒนาการของประชากรโครโมโซมคำตอบจะเกิดขึ้นจากรุ่มเริ่มแรกไปสู่รุ่นถัดๆไปเรื่อยๆ ตามแต่ที่กำหนดไว้ในค่าพารามิเตอร์ของ GA โดยการค้นหาคำตอบที่ต้องทำให้ได้ประชากรโครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งรุ่นสุดท้ายจึงหยุดการวิวัฒนาการ และแสดงผลเป็นโครโมโซมคำตอบที่ดีที่สุดได้ค้นพบ กระบวนการนี้มีลักษณะแบบวนลูปซึ่งมี Pseudocode ดังนี้

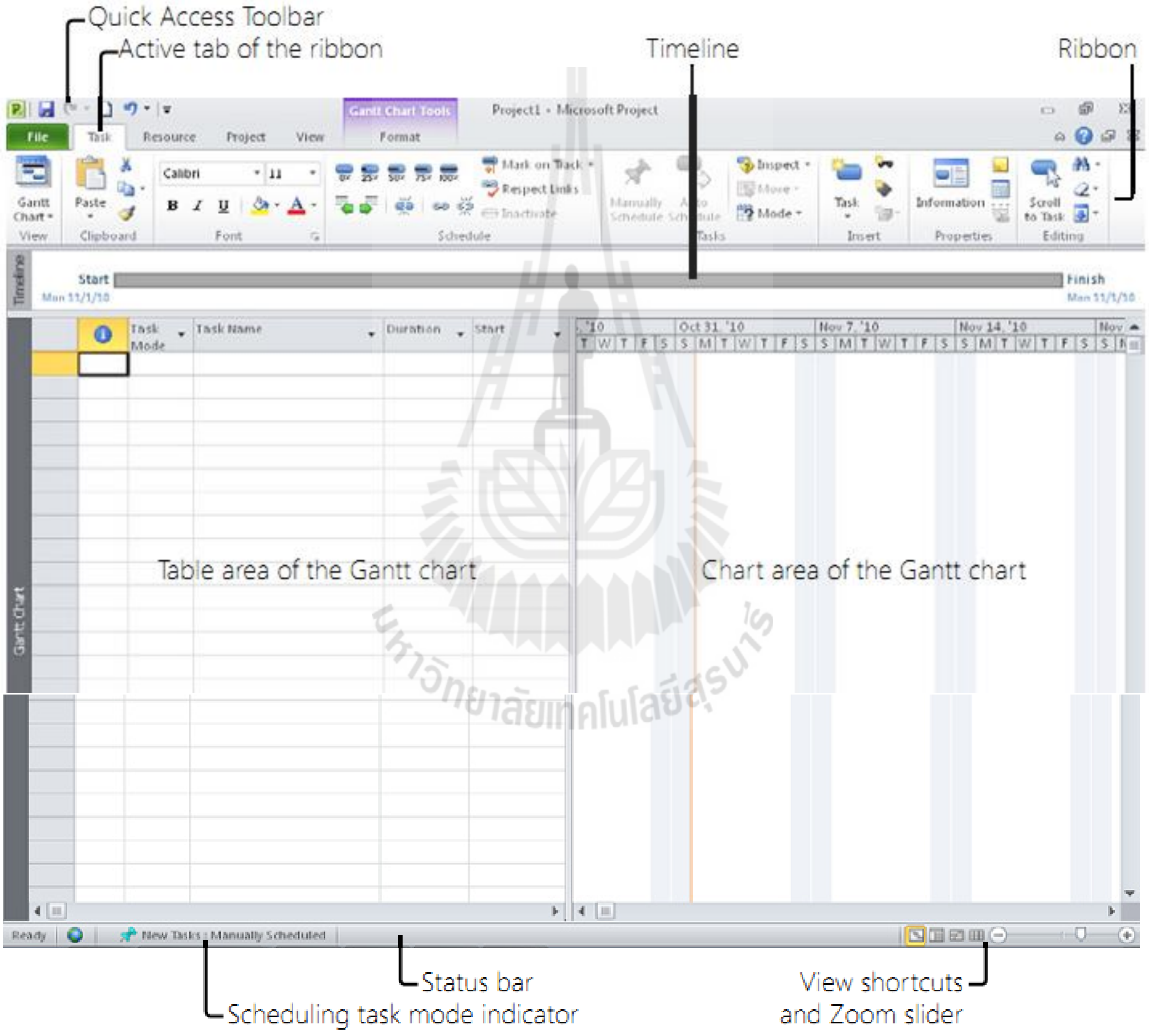
Pseudocode สำหรับ GA (Elbeltagi et al. 2005)

```
Begin;
    Generate random population of P solutions (chromosomes);
    For each individual i∈P: calculate fitness (i);
    For i=1 to number of generations;
        Randomly select an operation (crossover or mutation);
        If crossover;
            Select two parents at random i_a and i_b;
            Generate on offspring i_c∈ crossover(i_a and i_b);
        Else If mutation;
            Select one chromosome i at random;
            Generate an offspring i_c∈ mutate (i);
        End if;
        Calculate the fitness of the offspring i_c;
        If i_c is better than the worst chromosome then: replace the worst
    chromosome by i_c;
    Next i;
Check if termination = true;
End;
```

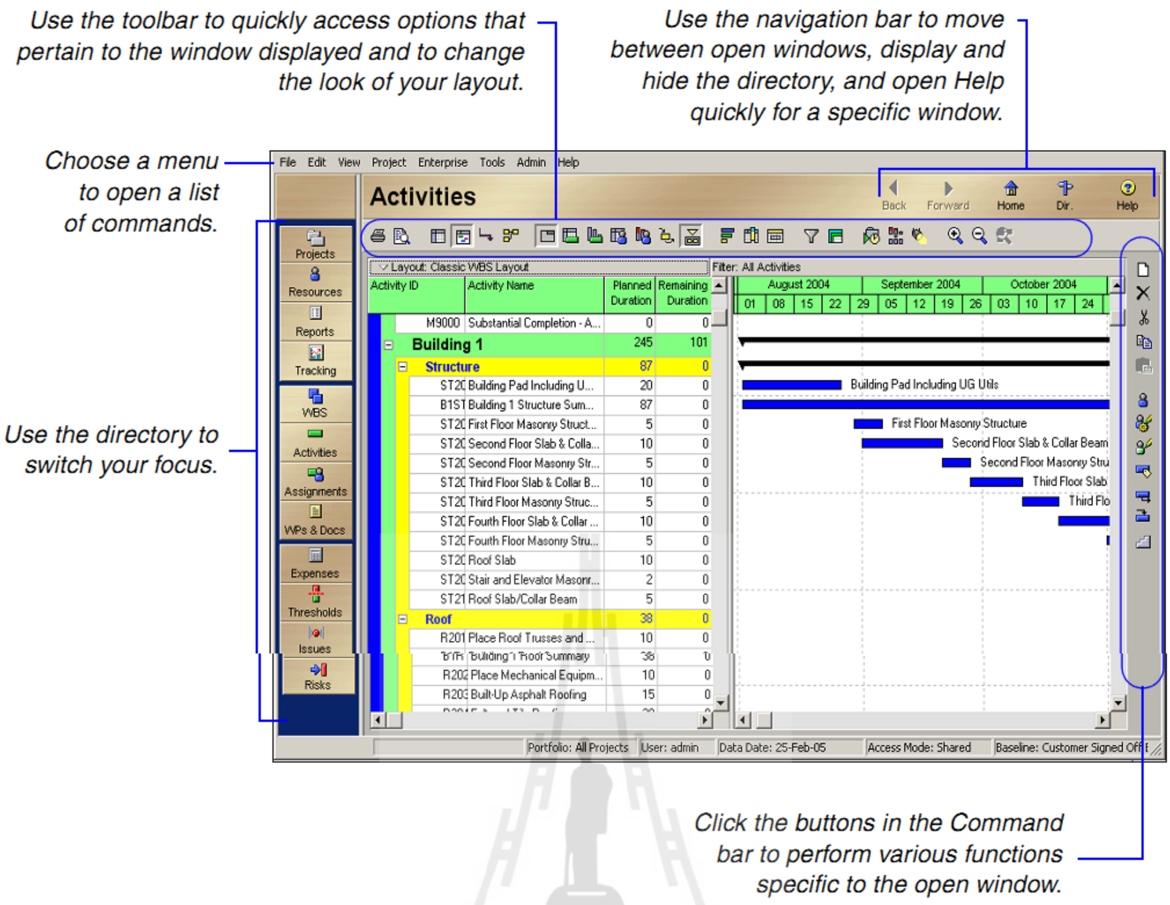
2.6 ซอฟแวร์บริหารงานโครงการก่อสร้าง

ในการบริหารงานโครงการก่อสร้าง ซึ่งประกอบไปด้วยภารกิจหลักได้แก่ การวางแผนและการควบคุมโครงการ เพื่อให้โครงการบรรลุเป้าหมายทั่วไปสามด้านคือ ด้านเนื้องาน ด้านเวลา และด้านต้นทุน/ทรัพยากร จะต้องเกี่ยวข้องกับข้อมูลจำนวนมากของโครงการหนึ่งๆ ซึ่งในปัจจุบันมีซอฟแวร์สำเร็จรูปอยู่จำนวนหนึ่งที่พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยในการบริหารงานโครงการ ที่เป็นที่นิยมใช้แพร่หลายได้แก่ Microsoft Project^{TM} (Stover 2010) และ Primavera^{TM} (Oracle 2009) โดยซอฟแวร์กลุ่มนี้จะมีความสามารถโดยทั่วไปคล้ายๆกันต่างกันที่รูปแบบของส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) โดยซอฟแวร์กลุ่มนี้จะต้องมีโครงสร้างในการจัดเก็บและ

วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆทั้งหมดของโครงการ การจัดเก็บข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกันและเป็นรายละเอียดที่เชื่อมโยงกัน ในลักษณะฐานข้อมูลของโครงการ ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นชุดคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณและแสดงผลลัพธ์ที่ได้เพื่อช่วยในการตัดสินใจต่างๆในการบริหารงานโครงการ ซึ่งซอฟแวร์บริหารงานโครงการก่อสร้างโดยทั่วไปจะมีฟังก์ชันการใช้งานที่ช่วยเหลือภารกิจหลักในการบริหารโครงการทั้งสองช่วงคือ ภารกิจช่วงการวางแผนโครงการและช่วงการควบคุมการดำเนินโครงการ นอกจากนี้ยังมีชุดคำสั่งที่คอยช่วยสร้างรายงานแบบต่างๆเพื่อแสดงผลลัพธ์สำหรับการนำไปใช้งานต่อไป การทบทวนต่อไปนี้จะแสดงรายละเอียดของความสามารถทั่วไปที่คล้ายกันของซอฟแวร์บริหารงานโครงการเหล่านี้ โดยไม่ได้เฉพาะเจาะจงไปที่ตัวใดตัวหนึ่งโดยเฉพาะ



รูปที่ 2.16 หน้าตาเริ่มต้นของโปรแกรม Microsoft Project 2010 (Stover 2010)



รูปที่ 2.17 หน้าตาเริ่มต้นของโปรแกรม Primavera P6 (Oracle 2009)

2.6.1 ภารกิจการวางแผนโครงการ

ในช่วงการวางแผนโครงการนั้นซอฟแวร์จะทำหน้าที่ช่วยจัดเก็บข้อมูลของโครงการเบื้องต้นที่ผู้วางแผนได้ป้อนนำเข้าไป แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของโครงการ ข้อมูลด้านงานกิจกรรม ข้อมูลด้านทรัพยากร และข้อมูลด้านการมอบหมายงาน

ข้อมูลทั่วไปของโครงการ จะใช้เพื่อกำหนดแนวทางในการจัดตารางเวลาให้กับกิจกรรมของโครงการ ได้แก่ ปฏิทินของโครงการ วันเวลาทำงานและวันเวลาหยุดของโครงการ วันเริ่มโครงการ เป็นต้น ข้อมูลด้านงานกิจกรรมเป็นรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับเนื้องานที่ต้องทำทั้งหมดของโครงการ เป็นข้อมูลส่วนสำคัญที่ใช้ในการจัดตารางเวลาของโครงการ ได้แก่ รายการกิจกรรมและการแบ่งกลุ่มเป็นโครงสร้างระดับชั้น Work Breakdown Structure ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมในรูปแบบต่างๆ พร้อมทั้งเงื่อนไขพิเศษทางเวลาอื่นๆ ระยะเวลาของกิจกรรม และต้นทุน เป็นต้น ข้อมูลด้านทรัพยากรเป็นรายละเอียดทรัพยากรที่ใช้กลุ่มประเภทต่างๆแบ่งเป็น ทรัพยากรด้านการดำเนินงานที่มีหน่วยการใช้เป็นเวลาทำงาน ทรัพยากรด้านวัสดุมีหน่วยการใช้เป็นหน่วยลักษณะนามของวัสดุนั้นๆ และทรัพยากรด้านต้นทุน เพื่อรวบรวมรายการและปริมาณของทรัพยากรที่มีอยู่ทั้งหมด อัตราค่าใช้จ่ายหรือต้นทุนต่อหน่วย และปฏิทินการทำงานของทรัพยากร ข้อมูลด้านการมอบหมายงานเป็นข้อมูลที่แสดงการเชื่อมโยงระหว่างตัวกิจกรรมและทรัพยากรที่จัดสรร ให้รายละเอียดว่า

กิจกรรมหนึ่งๆต้องการใช้ทรัพยากรใดบ้างจำนวนเท่าใด หรือในทางกลับกันจะได้รายละเอียดว่าทรัพยากรหนึ่งๆถูกมอบหมายให้กับกิจกรรมใดบ้าง ข้อมูลด้านการมอบหมายงานนี้ยังบันทึกปริมาณ “เนื้องาน” ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการมอบหมายงาน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ทำให้เกิดการคิดคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้น

นอกจากการบันทึกข้อมูลแล้ว ซอฟแวร์ยังมีส่วนช่วยคำนวณค่าต่างๆที่สำคัญที่เกิดจากข้อมูลนำเข้าเหล่านี้ การคำนวณจะเป็นไปตามตรรกะที่ออกแบบไว้และมักเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ได้แก่ การคำนวณค่าเวลาต่างๆของแผนงาน ตามลักษณะรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆระหว่างกิจกรรม กำหนดตารางเวลาของกิจกรรมโครงการ การคำนวณระยะเวลาเสร็จสิ้นโครงการ สายทางกิจกรรมวิกฤต ระดับความต้องการใช้ทรัพยากรโครงการ ปริมาณ “เนื้องาน”ที่เกิดจากการมอบหมายงาน คำนวณผลกระทบจากการปรับแก้แผนงานในลักษณะ Effort driven หรือลักษณะอื่นๆได้ ต้นทุนที่เกิดจากการใช้ทรัพยากร การจัดสรรทรัพยากร และการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) ชุดคำสั่งสำหรับการคำนวณเหล่านี้ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งานซอฟแวร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและปรับเปลี่ยนแผนงานได้หลายรอบได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามการคำนวณเหล่านี้เป็นไปตามตรรกะที่ผู้ออกแบบซอฟแวร์ได้กำหนดไว้ จึงทำให้ไม่สามารถปรับแต่งได้ตรงตามความต้องการใช้ได้ทุกอย่าง รวมทั้งไม่สามารถกำหนดตรรกะการคำนวณแบบใหม่ตามที่ต้องการได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้งานซอฟแวร์สำเร็จรูปเหล่านี้

2.6.2 ภารกิจการควบคุมโครงการ

สำหรับภารกิจการควบคุมโครงการ จะเกิดขึ้นภายหลังจากที่โครงการได้เริ่มดำเนินการไปแล้วและจะต้องทำต่อเนื่องไปจนกระทั่งโครงการเสร็จสิ้น เริ่มจากการกำหนดแผนงานฐานด้วยซอฟแวร์ ส่วนข้อมูลนำเข้าที่ต้องป้อนให้แก่ซอฟแวร์ประกอบด้วย วันที่ปรับปรุงสถานะ ความก้าวหน้าที่ทำได้จริงหรือผลการดำเนินงานจริงของกิจกรรมต่างๆ รวมทั้งอาจเป็นการปรับแก้แผนงานเพื่อให้ผลงานเป็นไปตามเป้าหมาย ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะต้องป้อนนำเข้าไปอย่างต่อเนื่องตามรอบระยะเวลาการปรับปรุงสถานะ

ซอฟแวร์จะนำข้อมูลนำเข้าเหล่านี้ไปคำนวณเพื่อให้ได้แผนงานปรับปรุงที่ ณ วันที่ปรับปรุงสถานะนั้นๆ ความก้าวหน้าจริงของโครงการหรือแผนงานปรับปรุงนี้จะถูกบันทึกและเปรียบเทียบวิเคราะห์ความแตกต่างกับแผนงานฐาน ซึ่งซอฟแวร์จะมีชุดคำสั่งสำหรับใช้วิเคราะห์ความก้าวหน้าด้วย Earned Value Method เพื่อประเมินสถานะโครงการในขณะนั้นว่าดีกว่าหรือแย่กว่าแผนงานฐานเพียงใด รวมทั้งยังสามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ตอนโครงการแล้วเสร็จได้อีกด้วย ซอฟแวร์ช่วยจัดการข้อมูลโครงการโดยแบ่งออกเป็นชุดข้อมูลแผนงานกับชุดข้อมูลผลงานจริง ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบและประเมินสถานะ รวมทั้งยังมีชุดคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆที่ต้องใช้ในการเปรียบเทียบอย่างอัตโนมัติอีกด้วย

2.6.3 การทำรายงาน

นอกจากการจัดเก็บข้อมูลต่างๆของโครงการและชุดคำสั่งการคำนวณอัตโนมัติต่างๆแล้ว ซอฟแวร์ยังมีหน้าที่สำคัญในการช่วยเตรียมการทำรายงานเพื่อแสดงข้อมูลส่วนต่างๆตามต้องการ ด้วยการเตรียมรายงานแบบร่าง (templates) ประเภทต่างๆไว้ให้กับผู้ใช้งาน ผู้ใช้สามารถสั่งให้ซอฟแวร์แสดงผลข้อมูลกลุ่มต่างๆของ

โครงการได้ เนื่องจากข้อมูลของโครงการหนึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากโดยไม่อาจนำมาแสดงได้ในคราวเดียวกัน รายงานที่แสดงข้อมูลจึงมักแยกแสดงข้อมูลแต่ละประเภทตามที่ผู้ใช้กำหนด ซึ่งนอกจากข้อมูลจะสามารถถูกแสดงในรูปแบบตารางแล้ว ยังอาจมีการนำเสนอเป็นกราฟเส้น กราฟแท่ง บาร์ชาร์ต แผนภาพเน็ตเวิร์ค หรือแบบปฏิทิน หรืออาจเป็นรายงานที่แสดงการเชื่อมโยงข้อมูลข้ามกลุ่ม เช่น การมอบหมายงาน หรือภาระงานเป็นต้น ชุดคำสั่งการซ่อนหรือแสดงข้อมูล การใช้มุมมองแบบต่างๆ การคัดกรองข้อมูล จัดเรียงข้อมูล และการจัดกลุ่มข้อมูลของซอฟแวร์จะมีประโยชน์ช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจข้อมูลของโครงการโดยพิจารณาแบบพุ่งเป้าได้สะดวกยิ่งขึ้น รายงานที่พิมพ์ออกมาทางเครื่องพิมพ์จะช่วยเป็นสื่อในการประสานงานกับบุคคลที่เกี่ยวข้องต่อไป

2.6.4 ข้อจำกัดของซอฟแวร์

จากความสามารถช่วยการบริหารโครงการในภารกิจต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ซอฟแวร์เหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการจัดการกับข้อมูลจำนวนมากของโครงการให้เกิดประสิทธิผลสูงตามต้องการ โดยลักษณะการจัดการกับข้อมูลจะมีทั้งส่วนจัดเก็บข้อมูลที่มีโครงสร้างเป็นระบบระเบียบแบบฐานข้อมูล และส่วนคำนวณวิเคราะห์ที่นำข้อมูลพื้นฐานต่างๆมาคำนวณไปตามสูตรหรือตรรกะต่างๆที่ได้วางเอาไว้แล้ว ซึ่งหากเปรียบเทียบลักษณะการจัดการกับข้อมูลเหล่านี้ก็เสมือนกับตัวซอฟแวร์เป็นทั้งโปรแกรมฐานข้อมูล (database) และโปรแกรมแผ่นตารางคำนวณ (spreadsheet) ที่มีการสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ให้สะดวกต่อการนำเข้าข้อมูลหรือเรียกแสดงข้อมูลที่ต้องการได้

อย่างไรก็ตามการใช้งานซอฟแวร์ให้เกิดผลดีจำเป็นต้องป้อนข้อมูลนำเข้าอย่างละเอียดจำนวนมากเช่นกัน ตามที่ซอฟแวร์กำหนด ซึ่งในบางครั้งอาจไม่มีข้อมูลที่ซอฟแวร์ต้องการ จึงทำให้ซอฟแวร์ไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ รวมทั้งความสามารถช่วยคำนวณค่าต่างๆเพิ่มเติมจากข้อมูลนำเข้าก็เป็นไปตามตรรกะต่างๆที่ได้วางแล้วโดยผู้พัฒนาซอฟแวร์ ซึ่งอาจไม่ตรงกับความต้องการใช้งานในบางกรณี เหล่านี้คือความไม่ยืดหยุ่นในการใช้งานของซอฟแวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาอย่างเฉพาะด้านเช่นนี้

ถึงแม้ว่าซอฟแวร์บริหารงานโครงการโดยทั่วไปจะมีความสามารถจัดการกับข้อจำกัดของทรัพยากรโครงการ เช่น มีการพิจารณาถึงปริมาณที่มีอยู่จำกัดของทรัพยากรประเภทต่างๆ และพยายามวางแผนงานให้สอดคล้องกับปริมาณทรัพยากร รวมทั้งสามารถพิจารณาปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) ได้ โดยที่ซอฟแวร์จะเป็นการวางแผนงานโครงการออกมาจากข้อมูลนำเข้าต่างๆที่ป้อนให้ ซึ่งเป็นผลลัพธ์คำตอบที่ตายตัวเพียงแผนงานแบบเดียวที่สร้างขึ้นมาจากข้อมูลนำเข้า แต่ตัวซอฟแวร์จะขาดส่วนที่เป็นการหาคำตอบที่ดีตามการประเมินค่าตามวัตถุประสงค์หรือการ Optimization ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนค่าข้อมูลส่วนนำเข้าบางค่าตามช่วงที่กำหนดไว้อย่างต่อเนื่องจำนวนหลายๆรอบ เพื่อค้นหาแผนงานผลลัพธ์ที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งการ Optimization จะสามารถทำได้ด้วยการสร้างแบบจำลอง RCPSP ขึ้นมาก่อน และการสร้างแบบจำลอง RCPSP ขึ้นเองด้วยโปรแกรมแผ่นตารางคำนวณ (spreadsheet) ยังทำให้การวางแผนงานมีความยืดหยุ่นมากกว่าสามารถปรับเปลี่ยนตรรกะต่างๆที่ต้องการใช้ในการสร้างแผนงานได้ด้วย

2.7 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร (RCPSP) และการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ที่ผ่านมาที่ได้ถูกนำมาทบทวนไว้ในบทนี้ สามารถสรุปเป็นประเด็นหลักต่างๆในการสร้างแบบจำลอง RCPSP ซึ่งแบ่งออกได้เป็น Resource allocation และ Resource leveling นั้นมีจุดร่วมกันบางประการ คือใช้ตัวแปรคำตอบเป็นการกำหนดหาวันเริ่มของกิจกรรมต่างๆ (Activity’s start time) แต่สำหรับจุดที่ต่างกันก็มีลักษณะในทางที่เป็นคู่ตรงข้ามกันเท่านั้นคือ ปัญหา Resource allocation ต้องการ Minimize ระยะเวลาโครงการ โดยกำหนดให้จำนวนทรัพยากรที่มีอยู่เป็นค่าจำกัดคงที่ ในขณะที่ปัญหา Resource leveling ต้องการ Minimize ความผันผวนของระดับการใช้ทรัพยากร (ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องให้จำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรต่ำที่สุด) โดยกำหนดให้ระยะเวลาโครงการเป็นค่าจำกัดคงที่ ตารางที่ 2.2 ได้สรุปส่วนประกอบหลักของ RCPSP ทั้งสองลักษณะปัญหา

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของทั้งสองลักษณะปัญหาย่อยของแบบจำลอง RCPSP

	Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)	
	Resource allocation	Resource leveling
Solution variables (solutions)	Activities’s start times	Activities’s start times
Objective	Minimize project time	Minimize resources fluctuation
Constraints	- Maximum available resources - Activity dependency	- Project time - Activity dependency

ซึ่งหากพิจารณาหลักการวางแผนทั่วไปแล้วจะเห็นได้ว่า ข้อมูลเบื้องต้นเมื่อเริ่มการวางแผนงานคือระยะเวลาของดำเนินงานโครงการที่มีอยู่ตามสัญญา ซึ่งเป็นระยะเวลาทั้งหมดที่สัญญากำหนดให้ และต้องดำเนินโครงการให้แล้วเสร็จไม่เกินกว่านี้ จึงเสมือนกับว่าข้อมูลระยะเวลาของโครงการควรเป็นค่าที่ถูกจำกัดไว้ให้คงที่ (อาจวางแผนด้วยระยะเวลาน้อยกว่าที่กำหนดไว้ในสัญญาเพื่อเป็นส่วนป้องกันความเสี่ยงที่อาจมีผลงานจริงล่าช้ากว่าแผนงาน) ส่วนจำนวนทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ เป็นหน้าที่ที่ผู้บริหารโครงการต้องจัดหามาให้เพียงพอกับความต้องการใช้ ซึ่งไม่ได้เป็นค่าที่จำกัดตั้งแต่ตอนเริ่มวางแผนงาน แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อจัดหาทรัพยากรได้ตามจำนวนที่ต้องการแล้วจะต้องบริหารจัดการให้การใช้ทรัพยากรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (มีความผันผวนของระดับการใช้ต่ำที่สุด) ดังนั้นแบบจำลองปัญหา Resource leveling จึงมีลักษณะที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สอดคล้องกับขั้นตอนการวางแผนมากกว่าและสมเหตุสมผลกว่าในทางปฏิบัติ โดยแบบจำลองที่ควบรวมปัญหาทั้งสองลักษณะเข้าด้วยกันควรมีลักษณะดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง RCPSP ที่ควบรวมสองปัญหาย่อย

	Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)
	Integrated resource allocation with resource leveling
Solution variables (solutions)	Activities's start times
Objective	Minimize resources fluctuation
Constraints	Hard constraints: - Maximum available resources - Activity dependency Soft constraints: - Project time

แบบจำลองปัญหาที่รวมเอารูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายและเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม (Generalized activity relationships and constraints) เป็นแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นให้สามารถจัดการกับรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่หลากหลาย รวมทั้งเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาต่างๆของกิจกรรมที่มักจะต้องใช้ในการวางแผนโครงการโดยทั่วไป ซึ่งความสามารถนี้มีอยู่ในโปรแกรมช่วยวางแผนทั่วไปอยู่แล้ว (ได้แก่ Microsoft Project™ Primavera™) หากแต่แบบจำลองปัญหาของงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมามักกำหนดให้มีเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบปกติคือ แบบ Finish-to-start เพียงเท่านั้น จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่จะพัฒนาให้แบบจำลองปัญหา RCPSP และการหาคำตอบ Optimization สามารถพิจารณาและจัดการกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายและเงื่อนไขด้านเวลาแบบต่างๆที่อาจถูกกำหนดขึ้นได้ ซึ่งจะกลายเป็นแบบจำลองใหม่ที่ยังไม่เคยมีงานวิจัยใดทำมาก่อน อย่างไรก็ตาม แผนงานที่ดีไม่ควรมีความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่หลากหลายและซับซ้อน เพราะจะทำให้เข้าใจยากและไม่สะดวกในการนำแผนงานไปใช้ปฏิบัติจริง หากแต่ควรวางแผนให้เรียบง่ายที่สุด ในบางกรณีอาจทดแทนการใช้ความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่ซับซ้อน ด้วยการปรับเปลี่ยนการแบ่งกิจกรรมออกมาใหม่ หรือการเปลี่ยนคู่ความสัมพันธ์ให้ง่ายลง

ข้อจำกัดของซอฟแวร์บริหารโครงสำหรับการใช้สร้างแผนงานโครงการก่อสร้างอยู่ที่ตัวแผนงานคำตอบที่ได้จะเป็นแบบตายตัวขึ้นอยู่กับข้อมูลนำเข้าที่ป้อนให้กับซอฟแวร์ ถึงแม้ว่าซอฟแวร์เหล่านี้โดยทั่วไปจะสามารถสร้างแผนงานโดยพิจารณาถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากรโครงการได้ คล้ายกับที่ทำโดยแบบจำลอง RCPSP ทั้งในลักษณะปัญหา Resource allocation และ Resource leveling แต่การหาคำตอบของซอฟแวร์

จะต่างออกไปจากคำตอบที่ได้จากแบบจำลอง RCPSP ที่เป็นการหาคำตอบจากการ Optimization แบบจำลองจะมีการสร้างชุดคำตอบเป็นแผนงานที่เป็นไปได้ขึ้นมาจำนวนมากเพื่อนำมาประเมินหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวประเมินค่าของคำตอบ การสร้างแผนงานที่ดีด้วยแบบจำลอง RCPSP จึงเกิดขึ้นจากการสร้างแผนงานที่เป็นไปได้จำนวนมากก่อนจากการปรับเปลี่ยนค่าข้อมูลนำเข้าพื้นฐาน แล้วจึงนำมาคัดเลือกหาแผนงานที่ดีที่สุดอีกที รวมทั้งแบบจำลองจะมีความยืดหยุ่นกว่าซอฟแวร์สำเร็จรูปโดยสามารถปรับแต่งวิธีการคำนวณหรือตรรกะที่ใช้ในการวางแผนงานได้ ซึ่งหากแบบจำลอง RCPSP ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมแผ่นตารางคำนวณจะทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลพื้นฐานให้เป็นระบบระเบียบได้เสมือนกับเป็นฐานข้อมูลขนาดเล็กที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังสามารถเรียกใช้ฟังก์ชันคำนวณค่าต่างๆจากข้อมูลพื้นฐานเหล่านี้ได้ตามต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้ที่ต้องการพัฒนาวิธีการสร้างแผนงานวิธีใหม่ขึ้นมาจึงต้องเลือกใช้การสร้างแบบจำลอง RCPSP ด้วยโปรแกรมแผ่นตารางคำนวณแทนการใช้ซอฟแวร์สำเร็จรูปสำหรับการบริหารโครงการ

วิธีการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานได้เริ่มต้นมาจากวิธีแบบ heuristic ที่ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมาก และสามารถคิดหาคำตอบได้ด้วยการคำนวณมือเอง ซึ่งก็มีข้อจำกัดที่ขนาดของปัญหาต้องไม่ใหญ่มากเกินไป ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วขนาดปัญหาของแผนงานก่อสร้างจริงมักมีขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในงานวิจัย จึงกล่าวได้ว่าวิธีการหาคำตอบแบบ heuristic ไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง จนการพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ได้ก้าวหน้าขึ้น ทำให้วิธีการหาคำตอบที่ต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อน หรือการสุ่มค่าตัวเลขแบบ random สามารถเป็นไปได้ นำมาสู่วิธีการหาคำตอบใหม่ๆที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบที่มีอยู่เดิมได้แก่ วิธีการสุ่มจำลองเลียนแบบเหตุการณ์ (simulations) และมาสู่วิธีการหาคำตอบด้วย searching algorithms แบบต่างๆ สรุปได้เป็นข้อจำกัดของแต่ละกลุ่มวิธีการหาคำตอบดังนี้

วิธีแบบ heuristic มีบทบาทสำคัญในยุคที่คอมพิวเตอร์ยังไม่มีศักยภาพและแพร่หลายในการใช้งานมาก แต่ไม่รับประกันว่าจะได้คำตอบที่เป็น optimum solution ทุกครั้ง ประสิทธิผลของคำตอบที่ได้ยังขึ้นอยู่กับโจทย์ปัญหา นอกจากนี้ยังไม่สามารถหาคำตอบของโจทย์ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากเกินไป

วิธีแบบ simulations เป็นวิธีที่อาศัยศักยภาพของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการจำลองเหตุการณ์ และวิเคราะห์สรุปผลเป็นคำตอบที่ได้ตามหลักการทางสถิติเรื่องของโอกาสและความน่าจะเป็น ซึ่งทำให้ได้ผลคำตอบที่เป็นค่าเฉลี่ย แต่ไม่สามารถให้ผลคำตอบที่ดีที่สุดได้ และความน่าเชื่อถือของคำตอบที่ค่าเฉลี่ยที่ได้ยังขึ้นอยู่กับจำนวนเหตุการณ์ที่กำหนด โดยหากกำหนดให้จำนวนเหตุการณ์มากๆจะทำให้ผลคำตอบที่ได้น่าเชื่อถือมากขึ้น แต่ก็ต้องแลกกับเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบที่มากขึ้นด้วย

วิธีแบบ searching algorithms ก็เป็นวิธีที่ต้องอาศัยศักยภาพของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสุ่มค่าคำตอบและประเมินผลคำตอบ วิธีการแบบ searching algorithms ได้ถูกเสนอขึ้นมาหลากหลายต่างๆกันตั้งแต่การค้นหาแบบสุ่มเดาอย่างไร้ทิศทางโดยที่เน้นการใช้จำนวนรอบมากๆในการค้นหา และพัฒนาจนได้เป็นการค้นหาแบบมีกลยุทธ์ที่ช่วยให้การค้นหาคำตอบที่ดีได้เร็วยิ่งขึ้น วิธีแบบ searching algorithms นั้นมีจุดเด่นที่ไม่มีข้อจำกัดด้านขนาดของแบบจำลองปัญหา สามารถใช้หาคำตอบของแบบจำลองปัญหาขนาดใหญ่

ที่ซับซ้อนที่ใกล้เคียงกับโจทย์ปัญหาจริงได้มาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถรับประกันว่าคำตอบที่ได้เป็น optimum solution ถึงแม้ว่าจะเป็นคำตอบที่ดี ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องนี้ด้วยการเพิ่มเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบที่จะช่วยให้ได้คำตอบที่ดียิ่งๆขึ้นจนเป็นที่พอใจ

จึงเห็นได้ว่า การคัดเลือกวิธีการหาคำตอบควรให้ความสำคัญกับความสามารถจัดการกับขนาดปัญหาที่ใหญ่ที่ใกล้เคียงกับสภาพปัญหาจริงก่อน นั่นจึงหมายถึงวิธีแบบ searching algorithms ควรเป็นวิธีที่ถูกเลือกใช้ในการวิจัยนี้ โดยสามารถเลือกใช้ algorithms ที่มีความสามารถสูง ซึ่งพิจารณาคุณภาพของ searching algorithms ต่อไปด้วยประเด็น ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ความเร็วหรือจำนวนรอบที่ไม่มากเพื่อให้ได้คำตอบที่ดี และความแพร่หลายของการใช้งาน รวมทั้งประเด็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ ซึ่งจะช่วยให้การวิจัยนี้สะดวกขึ้น ดังนั้นวิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms จึงเป็นวิธีที่ถูกเลือกใช้ในครั้งนี้

บทที่ 3 แบบจำลองปัญหาการวางแผนที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์

3.1 แนวคิดและหลักการ

จุดมุ่งหมายหลักของการบริหารงานโครงการก่อสร้างแท้จริงแล้วก็คือการจัดสรรการใช้ทรัพยากรของโครงการที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อให้โครงการแล้วเสร็จสมบูรณ์ ทั้งนี้ในโครงการประกอบไปด้วยกิจกรรมก่อสร้างขั้นตอนต่างๆกันจำนวนมากที่มีความต้องการใช้ทรัพยากรต่างๆกัน ผู้บริหารจะต้องวางแผนจัดสรรใช้ทรัพยากรประเภทไม่หมุนเวียนให้เหลือเพียงพอจนกว่าจะเสร็จสิ้นโครงการ แต่สำหรับทรัพยากรประเภทหมุนเวียนนั้นจะต้องวางแผนการหมุนเวียนใช้ในระหว่างกิจกรรมต่างๆอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของโครงการ โดยไม่ให้เกิดการแย่งชิงกันหรือปล่อยให้ทรัพยากรทิ้งว่างในบางช่วงเวลา ซึ่งการวางแผนการจัดสรรใช้ทรัพยากรหมุนเวียนให้ต่อเนื่องสม่ำเสมอนั้นเป็นงานที่ยากและซับซ้อนเนื่องจากต้องพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดและเงื่อนไขด้านต่างๆไปพร้อมกัน

ซึ่งจากการทบทวนหลักการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างทำให้เห็นได้ว่า แบบจำลองของปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีทรัพยากรจำกัด (Resource-constrained project scheduling problem: RCPSP) นั้นสามารถจัดตารางกิจกรรมก่อสร้างภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากรโครงการได้ โดยเฉพาะการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) ที่มุ่งหมายทำให้แผนงานที่ได้มีการใช้ทรัพยากรประเภทหมุนเวียนอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของโครงการ หลักการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรนั้นใช้การเลื่อนเวลาเริ่มกิจกรรมต่างๆออกไปตามระยะเวลาโฟลต (Float) ที่กิจกรรมนั้นมีเพื่อให้ลดหรือเพิ่มระดับการใช้ในช่วงเวลาที่กิจกรรมนั้นต้องดำเนินการ ตัวแปรคำตอบที่ใช้ในการจัดแผนงานก็คือเวลาเริ่มของกิจกรรมของโครงการ โดยที่โฟลตของกิจกรรมจะเป็นตัวกำหนดความยืดหยุ่นในการปรับระดับหากมีโฟลตมากจะสามารถปรับเลื่อนได้หลายรูปแบบทำให้มีโอกาสจัดวางให้ได้ระดับที่สมดุลได้มากกว่า เมื่อกิจกรรมตัวหนึ่งถูกปรับเลื่อนออกไปจากตำแหน่งเดิมแล้ว กิจกรรมตัวอื่นๆในสายทางเดียวกันจะมีระยะเวลาโฟลตที่เปลี่ยนไปทำให้สามารถปรับเลื่อนตามๆกันไปได้อีก ส่งผลให้ระดับการใช้ทรัพยากรของทั้งโครงการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่สมดุลมากขึ้น อย่างไรก็ตามระยะเวลาโฟลตของกิจกรรมนั้นเป็นผลโดยตรงที่เกิดจากลักษณะความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแบบจำลองของปัญหาการวางแผนงานจะกำหนดให้ใช้ความสัมพันธ์แบบ Finish-to-Start ทั้งสิ้น ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นปกติทั่วไป เรียบง่ายและธรรมชาติที่สุด ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมยังสามารถเป็นแบบอื่นได้อีกหลายรูปแบบ เช่น Start-to-Start Finish-to-Finish และการมี lag หรือ lead time แต่การใช้ความสัมพันธ์รูปแบบอื่นนอกจาก Finish-to-Start อาจทำให้แผนงานมีความซับซ้อน คำนวณค่าเวลาได้ยาก และเข้าใจยาก ซึ่งประเด็นเหล่านี้อาจไม่ใช่สาระสำคัญหากใช้ซอฟแวร์ช่วยวางแผน นอกจากนี้ยังพบว่าในทางปฏิบัติแผนงานของโครงการก่อสร้างยังคงมีการใช้

รูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายประกอบอยู่ด้วย โดยมีความสัมพันธ์แบบ Finish-to-Start เป็นหลัก ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าการใช้ความสัมพันธ์ที่หลากหลายประกอบกันจะส่งผลให้แผนงานที่ได้มีโฟลตเกิดขึ้นได้ตามที่ต้องการ ซึ่งผลลัพธ์ก็คือแผนงานที่ยืดหยุ่นมากขึ้น

นอกจากนี้ในทางปฏิบัติความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนดขึ้นในแผนงานยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ เพิ่มหรือลดได้ตามต้องการ ระหว่างความพยายามในการปรับแผนงาน ทั้งนี้เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมมีอยู่ได้ 2 ระดับ คือความสัมพันธ์ที่จำเป็น และความสัมพันธ์ที่ปรารถนา ความสัมพันธ์ในระดับที่ปรารถนานี้เองที่ผู้วางแผนสามารถพิจารณาปรับเปลี่ยนได้ตามที่เหมาะสมเพื่อให้สมประโยชน์ในการบริหารโครงการ ความสัมพันธ์ที่ปรารถนาเหล่านี้ถูกกำหนดขึ้นจากนโยบายของผู้วางแผนเองและไม่มีข้อจำกัดทางกายภาพของกิจกรรมเองมาเป็นตัวกำหนด ผู้วางแผนจึงค่อนข้างมีอิสระในการเลือกใช้หรือกำหนด หรือปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ที่ปรารถนาเหล่านี้ได้ตามที่เห็นสมควร ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้อาจอยู่ในรูปแบบ Finish-to-Start, Start-to-Start, Finish-to-Finish, หรือใช้ร่วมกัน lag หรือ lead time หรืออาจปรับให้ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันก็ได้

ด้วยความเป็นจริงเหล่านี้เองในการวางแผนทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างแบบจำลองของปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่สามารถรวมการพิจารณาปรับเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมได้ ทั้งนี้เพื่อผลในการจัดสรรการใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นไปอีก อันเนื่องมาจากความสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของความสัมพันธ์จะทำให้แผนงานยืดหยุ่นและเกิดมีระยะเวลาโฟลตมากขึ้น จึงสามารถปรับเลื่อนเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆได้หลากหลายมากขึ้น ด้วยมุ่งหวังให้ได้ระดับการใช้ทรัพยากรที่ดีขึ้นกว่าวิธีเดิม ทั้งนี้วิธีการใหม่นี้จะสอดคล้องกับการวางแผนงานในทางปฏิบัติที่ผู้วางแผนอาจปรับเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์ตามความเหมาะสมได้ด้วย

ซึ่งแบบจำลองใหม่ที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้ จะมีหลักในการปรับระดับสมดุลการใช้ทรัพยากรด้วยการใช้ตัวแปรคำตอบหลัก 2 กลุ่มคือ ระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรม และตัวเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ ซึ่งตัวแปรคำตอบทั้งสองกลุ่มนี้จะทำงานร่วมกันส่งผลต่อระยะเวลาโฟลตของกิจกรรมและระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการ ส่วนข้อมูลพื้นฐานอื่นๆที่ยังคงต้องใช้ในการจัดทำแผนงานของโครงการ ได้แก่ รายชื่อกิจกรรม ความสัมพันธ์ ระยะเวลา อัตราการใช้ทรัพยากร

3.2 สมการของแบบจำลองปัญหาการวางแผนด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์

ส่วนประกอบหลักของแบบจำลองปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ แบ่งเป็น 3 ส่วนเหมือนกับแบบจำลองปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยทั่วไป (Optimization problems) คือ ตัวแปรคำตอบ (Solution Variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) และฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint functions) นอกจากนี้ในแบบจำลองปัญหาการวางแผนยังมีตรรกะที่ใช้ในการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ซึ่งสมการ

ต่างๆของการคำนวณค่าเวลาที่ใช้ในแบบจำลองนี้เองที่เป็นสิ่งที่ต้องพัฒนาขึ้นใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่มีทางเลือกรูปแบบต่างๆ ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีดังนี้

3.2.1 ตัวแปรคำตอบ

ตัวแปรคำตอบ กำหนดให้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรม (Activity’s shifting start time) และกลุ่มตัวเลือกรูปแบบของความสัมพันธ์ (Relationship options) ตัวแปรคำตอบเหล่านี้จะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นแผนงานของโครงการที่มีประสิทธิภาพดีตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

กลุ่มแรกระยะเลื่อน (Shifting time) ของเวลาเริ่มของกิจกรรมจะเป็นค่าคำตอบที่ใช้ในการกำหนดเวลาของแผนงาน โดยจะเป็นค่าระยะเวลาที่เลื่อนออกจากค่าเวลาเริ่มที่เร็วที่สุด (Earliest Start Time: ES) ของกิจกรรมที่คำนวณได้จากวิธีสายทางวิกฤต (Critical Path Method: CPM) ซึ่งต้องมีค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งระยะเลื่อนนี้เมื่อนำมาบวกกับเวลาเริ่มที่เร็วที่สุดของกิจกรรม ก็จะได้เป็นเวลาเริ่ม (Start time) ของกิจกรรมนั้น โดยที่เวลาเริ่มที่เร็วที่สุดจะเป็นไปตามเงื่อนไขของความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆระหว่างกิจกรรมที่กำหนด

การเพิ่มระยะเลื่อนก็เสมือนกับเป็นการปรับเลื่อนกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมนั้นจากค่าเวลาเริ่มที่เร็วที่สุด ทั้งนี้สามารถปรับเลื่อนกิจกรรมใดๆให้ล่าช้าออกได้ไม่เกินกว่าระยะเวลาโฟลตที่กิจกรรมนั้นมีอยู่ การปรับเลื่อนเวลาเริ่มของกิจกรรมใดๆจะส่งผลต่อกิจกรรมที่อยู่ใกล้กันทั้ง predecessors และ successors และกิจกรรมอื่นๆในสายทางเดียวกันนั้น นอกจากนี้การปรับเลื่อนเวลาเริ่มของกิจกรรมยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อระดับการจัดสรรทรัพยากรของโครงการ จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรคำตอบสำหรับการจัดแผนงานของโครงการที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

Solution variables 1: $\boldsymbol{S_i}$ = ระยะเลื่อน (Shifting time) เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ *i*

$$\boldsymbol{ST_i = ES_i + S_i} \qquad \textbf{สมการที่ (3.1)}$$

โดยที่ให้ $\boldsymbol{ST_i}$ = เวลาเริ่ม (Start time) ของกิจกรรมที่ *i*

$\boldsymbol{ES_i}$ = เวลาเริ่มที่เร็วที่สุด (Earliest start time) ของกิจกรรมที่ *i*

$\boldsymbol{S_i}$ = ตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ส่วนตัวแปรคำตอบกลุ่มที่สอง ตัวเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ (Relationship options) นั้น เป็นการกำหนดให้บางกิจกรรมสามารถมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ตามที่ผู้วางแผนเห็นว่าเหมาะสม ตัวอย่างเช่น กิจกรรม A และ B กำหนดให้มีตัวเลือกรูปแบบความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start หรือ Start-to-Start ซึ่งความสัมพันธ์ที่สามารถมีทางเลือกนั้นจะต้องเป็นความสัมพันธ์ในระดับที่ปรารถนา (preferred relationships) เท่านั้น ส่วนบางกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์ในระดับที่จำเป็น (mandatory relationships) ไม่สามารถมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ได้ รูปแบบความสัมพันธ์ที่ถูกเลือกแล้วจะเป็นตัวกำหนดวิธีการคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมต่อไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกิจกรรมทั้งหมดในแผนงาน

ตัวแปรกลุ่มทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์นี้จะใช้เป็นค่าตัวเลขฐานสอง (Binary) ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรมีค่าเท่ากับ 1 ก็ต่อเมื่อทางเลือกนั้นมีสถานะถูกเลือก แต่หากตัวแปรมีค่าเท่ากับ 0 จะหมายถึงทางเลือกนั้นไม่ถูกเลือก โดยที่ตัวแปรตัวเลือกนี้จะต้องมีลักษณะที่ต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นหรือ mutually exclusive

Solution variables 2: $\boldsymbol{x_{ihm}}$ = ตัวเลือกรูปแบบที่ m ของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ *i* และ *h* โดยที่กิจกรรม *h* เป็น predecessors ของ *i*

โดยที่ให้ $\sum_m \boldsymbol{x_{ihm}} = \boldsymbol{1};\ \forall \boldsymbol{i}$

ตัวอย่างเช่น กำหนดให้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม A และ B มี 2 ทางเลือก (m=2) โดย ตัวเลือกที่ 1 เป็น Finish-to-Start โดยค่าตัวแปรคือ $\boldsymbol{x_{AB1}}$ และ ตัวเลือกที่ 2 เป็น Start-to-Start โดยค่าตัวแปรคือ $\boldsymbol{x_{AB2}}$ ดังนั้น $\sum_{m=1}^{2} \boldsymbol{x_{ABm}} = \boldsymbol{1}$

3.2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำหนดให้เป็นการประเมินความสมดุลของระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการ ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้ค่าดัชนีต่างๆกันหลายตัว เช่น M_x, M_y, *MRD, RDI*, *RRH*, และ *RID* แต่การวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าดัชนี M_x (ดูสมการที่ 2.20) เป็นหลักสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากเห็นว่าเป็นค่าดัชนีที่เรียบง่ายสามารถสะท้อนจำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้สูงที่สุดหรือที่ต้องจัดหาไว้ในโครงการนั้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนของโครงการ และยังมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าดัชนี *MRD* และ *RDI* แต่มีความละเอียดหรือไวกว่าเนื่องจากอยู่ในรูปดีกรีกำลังสอง ค่าดัชนี M_x จะต่ำที่สุดเมื่อระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการคงที่ราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ยของความต้องการใช้ ส่วนค่าดัชนี M_y (ดูสมการที่ 2.21) นั้นเห็นว่าทำให้ได้แผนงานที่ front-loaded หรือมีทิศทางที่ให้กิจกรรมก่อสร้างเริ่มดำเนินการเร็วเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งอาจไม่ก่อให้เกิดผลดีและไม่ได้สะท้อนประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ สำหรับดัชนี RRH และ RID นั้นจะยอมรับระดับการใช้ทรัพยากรในรูปทรงราบเรียบค่อนไปทางทรงระฆังคว่ำ ซึ่งเป็นดัชนีที่มีประสิทธิภาพดีแต่ก็มีความซับซ้อนในการคำนวณ และอาจเหมาะสมเมื่อมีการพิจารณาสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรต่อเนื่องกันหลายโครงการก่อสร้าง เพื่อประโยชน์ในการบริหารโยกย้ายทรัพยากรระหว่างโครงการ ช่วงเริ่มต้นและช่วงท้ายของโครงการก่อสร้างใดๆ สำหรับการวิจัยนี้จะกำหนดขอบเขตการพิจารณาปัญหาไว้ที่โครงการก่อสร้างคราวละหนึ่งโครงการ ดังนั้นดัชนีหลักที่เหมาะสมที่สุดที่นำมาใช้จึงเป็นดัชนี M_x อย่างไรก็ตามจะมีการคำนวณค่าดัชนีที่เหลืออื่นๆประกอบการพิจารณาด้วย

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำหนดให้เป็นแบบ Single-objective ได้สมการค่าดัชนีโมเมนต์รอบแกน x

$$\boldsymbol{M_x} = \sum_t^T (\boldsymbol{r_t})^2 \qquad \textbf{สมการที่ (3.2)}$$

โดยที่ให้ M_X = โมเมนต์รอบแกนนอน (แกน X แทนระยะเวลาโครงการ) ของความผันผวนของความต้องการใช้ทรัพยากรโครงการ

r_t = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ในวันที่ t ใดๆ

T = ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ

ส่วนค่าดัชนีที่เหลืออื่นๆที่ใช้พิจารณาประกอบกันได้แก่ *MRD* (ดูสมการที่ 2.24), *RRH* (ดูสมการที่ 2.22), *RID* (ดูสมการที่ 2.25)

3.2.3 ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัด เป็นกลุ่มฟังก์ชันที่ใช้กำหนดลักษณะของแผนงานที่ยอมรับได้ แผนงานที่อยู่ภายใต้หรือสอดคล้องกับฟังก์ชันข้อจำกัดทุกฟังก์ชันเท่านั้นที่จะนำมาพิจารณาประเมิน ส่วนแผนงานที่ไม่สอดคล้องกับฟังก์ชันข้อจำกัดข้อใดข้อหนึ่งหรือทั้งหมดจะเป็นแผนงานที่ใช้ไม่ได้และไม่นำมาพิจารณาต่อ ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้จะมีฟังก์ชันข้อกำจัดหลักที่เป็นเงื่อนไขระยะเวลาของโครงการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Subject to: เงื่อนไขระยะเวลาของโครงการ

$$\boldsymbol{Max(FT_i) \leq T} ; \forall \boldsymbol{i} \qquad \textbf{สมการที่ (3.3)}$$

โดยที่ $\boldsymbol{FT_i}$ = เวลาแล้วเสร็จของกิจกรรมที่ $\boldsymbol{i}$

$\boldsymbol{T}$ = ระยะเวลาของโครงการที่กำหนดในการวางแผนงาน

ฟังก์ชันข้อจำกัดนี้ทำให้การวางแผนงานของโครงการต้องได้แผนงานที่มีระยะเวลาของโครงการไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ $\boldsymbol{T}$ ซึ่งทำให้การปรับเลื่อนกิจกรรมต่างๆของโครงการถูกจำกัดอยู่ภายใต้กรอบเวลาหนึ่งที่กำหนด

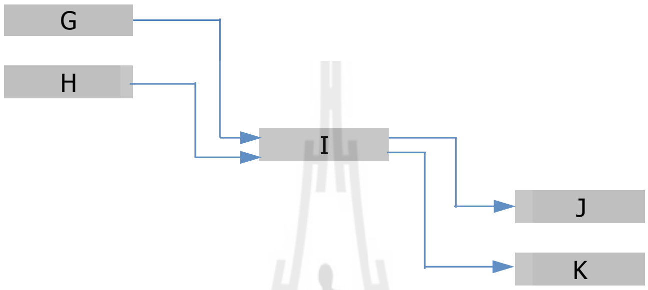
3.2.4 สมการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรม

การกำหนดให้แบบจำลองมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ส่งผลให้ต้องปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณค่าเวลาเริ่มและค่าเวลาแล้วเสร็จของกิจกรรม ซึ่งโดยปกติแล้วค่าเวลาของกิจกรรมจะคำนวณโดยอาศัยวิธีสายทางวิกฤต (CPM) เพื่อหาค่าเวลาต่างๆของกิจกรรม ได้แก่ เวลาเริ่มอย่างเร็วที่สุด (Earliest start time: ES), เวลาแล้วเสร็จอย่างเร็วที่สุด (Earliest finish time: EF), เวลาเริ่มอย่างช้าที่สุด (Latest start time: LS), เวลาแล้วเสร็จอย่างช้าที่สุด (Latest finish time: LF), เวลาโฟลตทั้งหมด (Total float: TF), และเวลาโฟลตอิสระ (Free float: FF) บางค่าเวลาต่างๆเหล่านี้จะมีสมการที่ใช้ในการคำนวณแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม แต่บางค่าเวลาจะมีสมการเหมือนเดิมไม่ขึ้นกับรูปแบบของความสัมพันธ์ นอกจากนี้การกำหนดให้มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ในแบบจำลอง ยังทำให้ต้องนำตัวแปรทางเลือกผนวกเข้าไปในสมการด้วย

การมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์จะทำให้เกิดผลกระทบกับสมการคำนวณเวลาเริ่ม (Start time: ST) ของกิจกรรมถัดไป (succeeding activity) ในรอบการคำนวณขาไป (Forward pass calculation)

และสมการคำนวณเวลาแล้วเสร็จอย่างช้าที่สุด (Latest finish time: LF) ของกิจกรรก่อนหน้า (preceding activity) ในรอบการคำนวณขากลับ (Backward pass calculation) นอกจากนี้ยังส่งผลต่อสมการคำนวณเวลาโฟลตอิสระ (Free float: FF) ของกิจกรรมก่อนหน้าอีกด้วย ส่วนสมการคำนวณค่าเวลาอื่นๆยังคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง รายละเอียดของสมการคำนวณค่าเวลาต่างๆทั้งหมดที่แบ่งแสดงออกเป็นกรณีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ 4 กรณีดังนี้

1. กรณีไม่มีทางเลือกและใช้รูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start (Case of FS without option) กำหนดให้ใช้รูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start เป็นแบบปกติพื้นฐาน สำหรับคู่กิจกรรมใดๆที่ไม่มีตัวเลือกความสัมพันธ์ ตัวอย่างทั่วไปของกรณีที่ 1 นี้แสดงดังรูปแผนภาพความสัมพันธ์ข้างล่าง



รูปที่ 3.1 กรณีความสัมพันธ์ Finish-to-Start สำหรับคู่กิจกรรมที่ไม่มีตัวเลือก

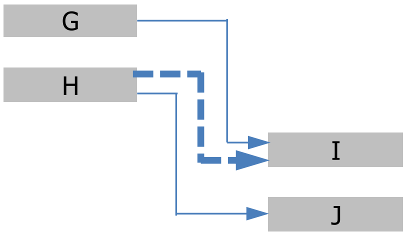
จากรูปในแผนภาพ กิจกรรม I มีความสัมพันธ์แบบ FS กับกิจกรรม G, H, J, และ K โดยที่กิจกรรม G, H เป็น predecessors ของ I และ กิจกรรม J, K เป็น successors ของ I สมการคำนวณค่าเวลาสำหรับกรณีความสัมพันธ์นี้ได้แก่

Forward pass: $$\boldsymbol{ST_I = Max(FT_G, FT_h) + S_I}$$ **สมการที่ (3.4)**

Backward pass: $$\boldsymbol{LF_I = Min(LS_j, LS_k)}$$ **สมการที่ (3.5)**

Float calculation: $$\boldsymbol{FF_I = Min(ST_j, ST_k) - FT_I}$$ **สมการที่ (3.6)**

2. กรณีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับไม่มีความสัมพันธ์ (Case of FS and No relationship options) ตัวอย่างทั่วไปของกรณีที่ 2 นี้แสดงดังรูปแผนภาพความสัมพันธ์ข้างล่าง



รูปที่ 3.2 กรณีความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับตัวเลือกไม่มีความสัมพันธ์

จากรูปในแผนภาพ กิจกรรม I มีทางเลือกของความสัมพันธ์รูปแบบ FS หรือไม่มีความสัมพันธ์กับ H แสดงความสัมพันธ์ที่มีทางเลือกด้วยเส้นลูกศรประและหนา นอกจากนี้กิจกรรม H และ I ยังมีความสัมพันธ์

ปกติรูปแบบ FS กับกิจกรรมอื่นๆ โดยที่กิจกรรม G และ H เป็น Predecessors ของ I และ กิจกรรม I และ J เป็น successors ของ H สมการคำนวณค่าเวลาสำหรับกรณีความสัมพันธ์นี้ได้แก่

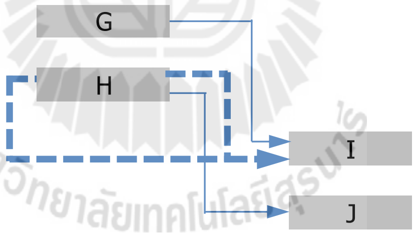
Forward pass: $$ST_I = Max(FT_G, FT_H * x_{IH1}) + S_I$$ สมการที่ (3.7)

Backward pass: $$LF_H = Min(LS_I + BN * x_{IH2}, LS_J)$$ สมการที่ (3.8)

Float calculation: $$FF_H = Min(ST_I + BN * x_{IH2}, ST_J) - FT_H$$ สมการที่ (3.9)

โดยที่ BN คือค่าตัวเลขมากๆค่าหนึ่ง (เทียบกับระยะเวลาของโครงการ), x_{IH1} และ x_{IH2} เป็นตัวแปรชนิด binary แทนการเลือกตัวเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งหากทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ใดถูกเลือกใช้ตัวแปรที่แทนตัวเลือกนั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนตัวแปรที่เหลือจะถูกกำหนดค่าให้เป็น 0 เช่น หากรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 ถูกเลือก x_{IH1} จะมีค่าเท่ากับ 1 และ x_{IH2} จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งหมายถึงเลือกใช้ความสัมพันธ์แบบ FS แต่ในทางกลับกันหากรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ถูกเลือก x_{IH1} จะมีค่าเท่ากับ 0 และ x_{IH2} จะมีค่าเป็น 1 ซึ่งหมายถึงเลือกให้ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม H และ I ซึ่งสมการที่ 3.6 และ 3.7 จะทำการคำนวณค่าเวลาโดยนำค่า x_{IH1} และ x_{IH2} ร่วมในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าเวลาที่ถูกต้องสอดคล้องกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่เลือกใช้ และตัวแปรแทนการเลือกตัวเลือก x_{IH1} และ x_{IH2} นี้จะมีลักษณะ mutually exclusive

3. กรณีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับ Start-to-Start (Case of FS and SS relationship options) ตัวอย่างทั่วไปของกรณีที่ 3 นี้แสดงดังรูปแผนภาพความสัมพันธ์ข้างล่าง



รูปที่ 3.3 กรณีความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับ Start-to-Start

จากรูปในแผนภาพ กิจกรรม I มีทางเลือกของความสัมพันธ์รูปแบบ FS หรือ SS กับ H แสดงความสัมพันธ์ที่มีทางเลือกด้วยเส้นลูกศรประและหนา นอกจากนี้กิจกรรม H และ I ยังมีความสัมพันธ์ปกติรูปแบบ FS กับกิจกรรมอื่นๆ โดยที่กิจกรรม G และ H เป็น Predecessors ของ I และ กิจกรรม I และ J เป็น successors ของ H สมการคำนวณค่าเวลาสำหรับกรณีความสัมพันธ์นี้ได้แก่

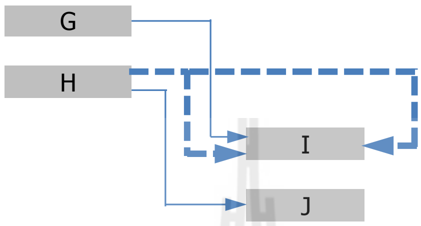
Forward pass: $$ST_I = Max(FT_G, FT_H * x_{IH1}, ST_H * x_{IH2}) + S_I$$ สมการที่ (3.10)

Backward pass: $$LF_H = Min(LS_I + D_H + BN * x_{IH1}, LS_I + BN * x_{IH2}, LS_J)$$ สมการที่ (3.11)

Float calculation: $$FF_H = Min(ST_I, ST_J) - FT_H * x_{IH1} - ST_H * x_{IH2}$$ สมการที่ (3.12)

ผลของการนำตัวแปรชนิด binary (มีค่าเป็น 0 หรือ 1) มาใช้แทนสถานะการเลือกทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ เมื่อค่าตัวแปรคูณกับค่าเวลาอื่นจะได้ผลลัพธ์เป็นการใช้ค่าเวลานั้น (เมื่อตัวแปรเป็น 1) หรือตัดค่าเวลานั้นทิ้ง (เมื่อตัวแปรเป็น 0) แต่หากค่าตัวแปร binary นี้คูณอยู่กับ BN จะเป็นการเพิ่มค่าอย่างมาก (เมื่อตัวแปรเป็น 1) หรือไม่เพิ่มค่าเลย (เมื่อตัวแปรเป็น 0) และนำมาใช้ร่วมกับฟังก์ชัน Min() จะได้ผลลัพธ์เป็นการใช้ค่าเวลานั้นหรือตัวค่าเวลานั้นทิ้งได้ตามต้องการ

4. กรณีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับ Finish-to-Finish (Case of FS and FF relationship options) ตัวอย่างทั่วไปของกรณีที่ 4 นี้แสดงดังรูปแผนภาพความสัมพันธ์ข้างล่าง



รูปที่ 3.4 กรณีความสัมพันธ์ Finish-to-Start กับ Finish-to-Finish

จากรูปในแผนภาพ กิจกรรม I มีทางเลือกของความสัมพันธ์รูปแบบ FS หรือ FF กับ H แสดงความสัมพันธ์ที่มีทางเลือกด้วยเส้นลูกศรประและหนา นอกจากนี้กิจกรรม H และ I ยังมีความสัมพันธ์ปกติรูปแบบ FS กับกิจกรรมอื่นๆ โดยที่กิจกรรม G และ H เป็น Predecessors ของ I และ กิจกรรม I และ J เป็น successors ของ H สมการคำนวณค่าเวลาสำหรับกรณีความสัมพันธ์นี้ได้แก่

Forward pass: $$ST_I = Max(FT_G, FT_H - D_I * x_{IH2}) + S_I$$ สมการที่ (3.13)

Backward pass: $$LF_H = Min\big(LS_I + BN * x_{IH2}, LF_I + BN * x_{IH1}, LS_J\big)$$ สมการที่ (3.14)

Float calculation: $$FF_H = Min\big(ST_I + BN * x_{IH2}, FT_I + BN * x_{IH1}, ST_J\big) - FT_H$$ สมการที่ (3.15)

ผลของการนำตัวแปรชนิด binary (มีค่าเป็น 0 หรือ 1) มาใช้แทนสถานะการเลือกทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ เมื่อค่าตัวแปรคูณกับค่าเวลาอื่นจะได้ผลลัพธ์เป็นการใช้ค่าเวลานั้น (เมื่อตัวแปรเป็น 1) หรือตัดค่าเวลานั้นทิ้ง (เมื่อตัวแปรเป็น 0) แต่หากค่าตัวแปร binary นี้คูณอยู่กับ BN จะเป็นการเพิ่มค่าอย่างมาก (เมื่อตัวแปรเป็น 1) หรือไม่เพิ่มค่าเลย (เมื่อตัวแปรเป็น 0) และนำมาใช้ร่วมกับฟังก์ชัน Min() จะได้ผลลัพธ์เป็นการใช้ค่าเวลานั้นหรือตัวค่าเวลานั้นทิ้งได้ตามต้องการ

สำหรับค่าเวลาอื่นๆที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์นั้น ได้แก่ เวลาแล้วเสร็จ (Finish time: FT), เวลาเริ่มอย่างช้าที่สุด (Latest start time: LS), เวลาโฟลตรวม (Total float: TF) โดยที่ค่าเวลาเหล่านี้ยังคงใช้สมการคำนวณแบบเดิม สำหรับกิจกรรม I ใดๆเป็นดังนี้

Forward pass: $$FT_I = ST_I + D_I$$ สมการที่ (3.16)

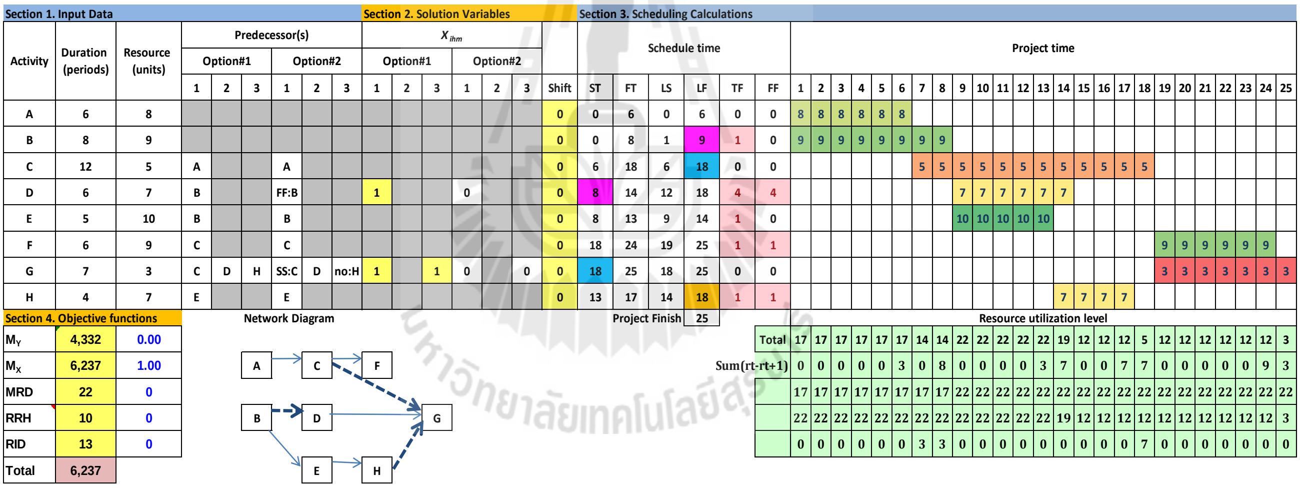
Backward pass: $$LS_I = LF_I - D_I$$ **สมการที่ (3.17)**

Float calculation: $$TF_I = (LS_I - ST_I) \text{ or } (LF_I - FT_I)$$ **สมการที่ (3.18)**

เหตุที่สมการคำนวณค่าเวลาทั้งสามนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากการมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ เนื่องจาก การคำนวณค่าเวลาเหล่านี้ไม่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมข้างเคียงอื่นใด แต่เกี่ยวข้องกับเพียงค่าเวลาของตัวกิจกรรมมันเองเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมภายนอกจึงไม่อาจสร้างผลกระทบได้

3.3 การสร้างแบบจำลองด้วย Spreadsheet

แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel™ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปประเภท Spreadsheet ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยตัวแบบจำลองปัญหาจะถูกบันทึกเป็นไฟล์หนึ่งไฟล์ ที่ประกอบด้วยแผ่นงาน (Sheet) แผ่นเดียวที่ใช้ป้อนบันทึกสูตรของสมการคำนวณต่างๆทั้งหมดของแบบจำลองดังรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา และมีการออกแบบจัดวางตำแหน่งข้อมูลอย่างเป็นระเบียบเพื่อความสะดวกในการป้อนข้อมูลนำเข้า (input) และแสดงข้อมูลผลลัพธ์ (output) ให้เข้าใจได้ง่าย แผ่นคำนวณที่ใช้พื้นที่เป็นตัวแบบจำลองทั้งหมดแสดงในรูปภาพรวมข้างล่าง



รูปที่ 3.5 แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel

ส่วนประกอบของแบบจำลองบน Excel แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลนำเข้า (Section 1. Input Data), ส่วนที่ 2 ตัวแปรคำตอบ (Section 2. Solution Variables), ส่วนที่ 3 การคำนวณแผนงานโครงการ (Section 3. Scheduling Calculations), และส่วนที่ 4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Section 4. Objective Functions) ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ข้อมูลนำเข้า

ส่วนข้อมูลนำเข้าคือพื้นที่สำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งาน เป็นตัวโจทย์ปัญหาแผนงานโครงการก่อสร้างที่ต้องการหาคำตอบ แบบจำลองปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วย

เงื่อนไขความสัมพันธ์มีโครงสร้างหลักเป็นแบบจำลอง RCPSP ดังนั้นจึงต้องการข้อมูลนำเข้าพื้นฐานสำหรับการวางแผนโครงการประเภทเดียวกับ RCPSP ซึ่งต้องได้มาจากการจัดเตรียมของผู้วางแผน ทั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง และกลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านอัตราการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนของโครงการ นอกจากนี้ยังมีข้อมูลนำเข้าอีกกลุ่มที่เพิ่มขึ้นมาเนื่องจากแบบจำลองใหม่นี้กำหนดให้มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมได้ นั่นคือกลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ รายละเอียดข้อมูลนำเข้าในแต่ละกลุ่มมีดังนี้

1. กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง มีข้อมูลที่ต้องนำเข้าได้แก่ รายชื่อกิจกรรม (Activity) และระยะเวลาของกิจกรรม (Duration) ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดทำแผนงานโครงการก่อสร้าง จำนวนกิจกรรมของแต่ละโครงการที่แตกต่างกันไปเป็นตัวกำหนดขนาดของแบบจำลองปัญหา หากมีจำนวนกิจกรรมมากจะทำให้แบบจำลองปัญหามีขนาดใหญ่ ซึ่งรายชื่อกิจกรรมเหล่านี้ได้มาจากการแบ่งแยกย่อยทำโครงสร้างกระจายงานย่อย (WBS) ส่วนระยะเวลาของกิจกรรมเป็นค่าที่ได้จากการประมาณระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินกิจกรรมนั้นให้แล้วเสร็จ กำหนดให้มีหน่วยใดๆเป็น periods ซึ่งระยะเวลาของกิจกรรมจะแปรผันกับเนื้องานของกิจกรรม และแปรผกผันกับอัตราการใช้ทรัพยากรของกิจกรรมนั้น

Section 1. Input Data

Activity	Duration (periods)	Resource (units)	Predecessor(s)					
			Option#1			Option#2		
			1	2	3	1	2	3
A	6	8						
B	8	9						
C	12	5	A			A		
D	6	7	B			FF:B		
E	5	10	B			B		
F	6	9	C			C		
G	7	3	C	D	H	SS:C	D	no:H
H	4	7	E			E		

รูปที่ 3.6 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง

2. กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านอัตราการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนของโครงการ เนื่องจากแบบจำลอง RCPSP ปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร จะคำนึงถึงการจัดสรรใช้ทรัพยากรประเภทหมุนเวียนเป็นหลัก ในการวางแผนจำเป็นต้องจัดเตรียมข้อมูลอัตราการใช้ทรัพยากร (Resource) ของแต่ละกิจกรรม ซึ่งเป็นค่าจากการประมาณด้วยลักษณะประเภทของกิจกรรม ค่าปริมาณเนื้องานและระยะเวลาของกิจกรรม ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาของโครงการก่อสร้างโดยทั่วไปจึงกำหนดให้หน่วยอัตราการใช้นี้เป็นหน่วยใดๆ (units) และเป็นประเภทเดียวกันที่สามารถร่วมกันใช้งานได้

3. กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม เป็นข้อมูลนำเข้ากลุ่มสุดท้ายที่กำหนดจำนวนและลักษณะรูปแบบของความสัมพันธ์ โดยกิจกรรมใดๆกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับกิจกรรมอื่นๆได้หลายกิจกรรม (แต่กำหนดให้ไม่เกินกว่า 3 กิจกรรม) ข้อมูลนำเข้าจะเป็นรายชื่อกิจกรรมก่อนหน้า (Predecessors) ของกิจกรรมนั้นๆ ทั้งนี้รูปแบบความสัมพันธ์พื้นฐานปกติคือแบบ Finish-to-Start (FS) หากไม่ได้ระบุเป็นอื่นจะหมายถึงรูปแบบนี้ และเนื่องจากบางความสัมพันธ์ถูกกำหนดให้มีทางเลือก ดังนั้นข้อมูลจึงถูกแบ่งออกเป็น Option#1 และ Option#2 ซึ่งหมายถึงกิจกรรมใดๆจะมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ได้ไม่เกิน 2 ตัวเลือก โดยที่หนึ่งในตัวเลือกเหล่านั้นกำหนดให้ต้องเป็นแบบปกติ FS ด้วย หากความสัมพันธ์ใดมีค่าเหมือนกันทั้งสองตัวเลือกจะหมายถึงว่าความสัมพันธ์คู่นั้นไม่มีทางเลือก

3.3.2 ตัวแปรคำตอบ

ส่วนตัวแปรคำตอบของแบบจำลองนี้ถูกกำหนดให้ประกอบด้วย 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวแปรระยะเลื่อน (Shifting time) ของแต่ละกิจกรรมใดๆ ดังแสดงด้วยคอลัมน์ Shift ในรูปข้างล่าง มีค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะเป็นค่าคำตอบที่ใช้ปรับเลื่อนกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆ (Activity's start time) ออกจากค่าเวลาเริ่มอย่างเร็วที่สุด (Earliest start time: ES) แต่ต้องอยู่ภายในระยะเวลาโฟลตอิสระ (Free float) ที่กิจกรรมนั้นมีอยู่ในขณะนั้น โดยที่เวลาเริ่มของกิจกรรมยังจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนดด้วย

X_{ihm}						
Option#1			**Option#2**			
1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**	**Shift**
						0
						0
						0
1			**0**			**0**
						0
						0
1		**1**	**0**		**0**	**0**
						0

รูปที่ 3.7 ส่วนตัวแปรคำตอบ

และตัวแปรคำตอบกลุ่มที่สองคือ กลุ่มการเลือกทางเลือกรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (Relationship options) ดังแสดงด้วยคอลัมน์ค่า x_{ihm} ในรูปข้างบน ตัวแปรคำตอบกลุ่มนี้จะกำหนดให้เป็นค่าแบบ Binary ประกอบด้วยตัวเลือก Option#1 และ 2 โดยหากค่าในคอลัมน์ Option#1 นี้เท่ากับ 1 หมายถึงตัวเลือก Option#1 ได้ถูกเลือกใช้ แต่หากมีค่าเท่ากับ 0 จะหมายถึงตัวเลือก Option 2 ได้ถูกเลือกใช้

และค่าในคอลัมน์ Option#2 จะต้องเท่ากับ 1 โดยที่ชุดข้อมูลของทางเลือกรูปแบบของความสัมพันธ์จะประกอบไปด้วยตัวเลือก 2 ตัวเลือก และแต่ละตัวเลือกจะมีความสัมพันธ์ได้ 3 ความสัมพันธ์ (ตามข้อจำกัดที่กิจกรรมใดจะมีความสัมพันธ์ได้ไม่เกิน 3 ความสัมพันธ์)

3.3.3 การคำนวณแผนงานโครงการ

การคำนวณแผนงานโครงการ แบ่งเป็นส่วนการคำนวณค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง 2 ส่วน ได้แก่ 1. ส่วนการคำนวณค่าเวลาแผนงานของกิจกรรมและส่วนแสดงแผนงาน และ 2. ส่วนการคำนวณค่าระดับการจัดสรรทรัพยากรโครงการ มีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนการคำนวณค่าเวลาแผนงานของกิจกรรมและส่วนแสดงแผนงาน แบ่งเป็นส่วนแสดงค่าเวลาที่สำคัญของกิจกรรมใดๆ 6 ค่าได้แก่ Earliest start time (ES), Earliest finish time (EF), Latest start time (LS), Latest finish time (LF), Total float (TF), และ Free float (FF) แต่ทั้งนี้ค่า ES ได้ถูกปรับเลื่อนด้วยระยะเลื่อน (shifting time) ให้กลายเป็นค่า ST (Start time) ซึ่งก็คือเวลาเริ่มของกิจกรรมที่เลื่อนมาจาก ES นั่นเอง ดังสมการที่ (3.1) และค่า EF ได้ถูกปรับเลื่อนเป็น FT ในทำนองเดียวกัน การคำนวณค่าเวลาต่างๆเหล่านี้ของกิจกรรมเป็นพื้นฐานของการทำแผนงานโครงการก่อสร้าง ด้วยการใช้วิธีคำนวณแบบ CPM (Critical Path Method) จากสมการเงื่อนไขความสัมพันธ์เชิงเวลาในสมการที่ (3.4) ถึง (3.18)

นอกจากนี้ยังมีส่วนแสดงแผนงานแบบบาร์ชาร์ตตามค่าเวลาเริ่ม (ST) และเวลาแล้วเสร็จ (FT) ที่คำนวณได้มาแสดงบาร์ประจำตัวของแต่ละกิจกรรม โดยการอ้างอิงกับเส้นเวลาของโครงการ (Project time) พร้อมทั้งแสดงค่าจำนวนอัตราการใช้ทรัพยากรต่อหน่วยเวลาของกิจกรรมนั้นๆ ด้วยอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปข้างล่างนี้

ซึ่งการคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมเหล่านี้จะเป็นผลการคำนวณที่อ้างอิงจากข้อมูลนำเข้าและข้อมูลตัวแปรคำตอบที่กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อก่อนหน้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Section 3. Scheduling Calculations																														
Schedule time						Project time																								
ST	FT	LS	LF	TF	FF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	6	0	6	0	0	8	8	8	8	8	8																			
0	8	1	9	1	0	9	9	9	9	9	9	9	9																	
6	18	6	18	0	0							5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5							
8	14	12	18	4	4									7	7	7	7	7	7											
8	13	9	14	1	0									10	10	10	10	10												
18	24	19	25	1	1																			9	9	9	9	9	9	
18	25	18	25	0	0																			3	3	3	3	3	3	3
13	17	14	18	1	1														7	7	7	7								
	Project Finish		25			Resource utilization level																								
					Total	17	17	17	17	17	17	14	14	22	22	22	22	22	19	12	12	12	5	12	12	12	12	12	12	3
					Sum(rt-rt+1)	0	0	0	0	0	3	0	8	0	0	0	0	3	7	0	0	7	7	0	0	0	0	0	9	3
						17	17	17	17	17	17	17	17	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
						22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	19	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3
						0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 3.1 ส่วนการคำนวณแผนงานโครงการ

2. ส่วนการคำนวณค่าระดับการจัดสรรทรัพยากรโครงการ เป็นการคำนวณระดับการใช้ทรัพยากรโครงการในแต่ละหน่วยเวลาของโครงการที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดแผนงานไว้ ซึ่งค่าต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับระดับการจัดสรรทรัพยากรนี้จะถูกนำไปใช้คำนวณต่อ เพื่อให้ได้เป็นดัชนีความผันผวนต่างๆ เช่น M_X, M_Y, *MRD*, *RRH*, และ *RID* ในที่สุดนั่นเอง

3.3.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้เป็นแบบ Single-objective ดังสมการที่ (3.2) ซึ่งจะใช้ดัชนีโมเมนต์รอบแกนนอน X เป็นหลัก (M_X) เนื่องจากมีความละเอียดในการตรวจวัดและประเมินระดับการจัดสรรทรัพยากรโครงการ ด้วยค่าดัชนีที่เป็นดีกรียกกำลังสอง และมีเป้าหมายในการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรให้เป็นไปในทิศทางราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ยของความต้องการใช้ อย่างไรก็ตามยังมีการคำนวณค่าดัชนีอื่นๆประกอบการพิจารณาแผนงานที่ได้ด้วย ได้แก่ ค่า M_Y, *MRD*, *RRH*, และ *RID* โดยที่กลุ่มค่าดัชนีความผันผวนของทรัพยากรมักมีพื้นฐานการคำนวณอ้างอิงจากค่า r_t หรือค่าผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่อหน่วยเวลาของโครงการ สุดท้ายคือค่าผลรวมดัชนี (Total) ซึ่งในความเป็นจริงก็คือค่าดัชนี M_X นั่นเอง เนื่องจากกำหนดให้ใช้ผลรวมแบบถ่วงน้ำหนัก โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนักของดัชนี M_X ($\boldsymbol{w_1}$) เท่ากับ 1 แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของดัชนีที่เหลือให้เท่ากับ 0 และกำหนดให้การ Optimization ของแบบจำลองปัญหาที่สร้างขึ้นนี้เป็นการ Minimization ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

อย่างไรก็ตามการเตรียมคำนวณค่าผลรวมดัชนี (Total) นี้เพื่อให้สามารถสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Multi-objective ได้เมื่อต้องการ โดยที่กำหนดให้ใช้ผลรวมแบบถ่วงน้ำหนัก แต่ละค่าดัชนีทั้ง 5 ดัชนีที่ใช้

จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่าเฉพาะตัว $\boldsymbol{w_1}$, $\boldsymbol{w_2}$, $\boldsymbol{w_3}$, $\boldsymbol{w_4}$, และ $\boldsymbol{w_5}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำหนดใช้ตามความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย เช่น หากต้องการให้วัตถุประสงค์ย่อยใดมีความสำคัญมากกว่าอันที่เหลือจะต้องกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อยนั้นมีค่ามากๆ หรือในทางกลับกันด้วย เพราะจะทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัตถุประสงค์ย่อยนั้นมีนัยยะสำคัญมากขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อการปรับขนาดสเกลตัวเลขของค่าวัตถุประสงค์ย่อยต่างๆให้สมดุลกัน เช่น ค่า M_X, M_Y จะมีขนาดค่าตัวเลขค่อนข้างมากในหลักพันหรือหมื่น เนื่องจากเป็นดัชนีในดีกรีกำลังสอง ซึ่งมากกว่าค่า *MRD*, *RRH* และ *RID* ที่มีขนาดตัวเลขใกล้เคียงกันในหลักสิบเท่านั้น ดังนั้นการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก $\boldsymbol{w_1}$, $\boldsymbol{w_2}$, $\boldsymbol{w_3}$, $\boldsymbol{w_4}$, และ $\boldsymbol{w_5}$ ในเบื้องต้นเพื่อการปรับขนาดสเกลของตัวเลขเท่านั้นควรเป็น 10^{-3}, 10^{-3}, 1, 1, และ 1 ตามลำดับ โดยยังไม่ได้ปรับการถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญ

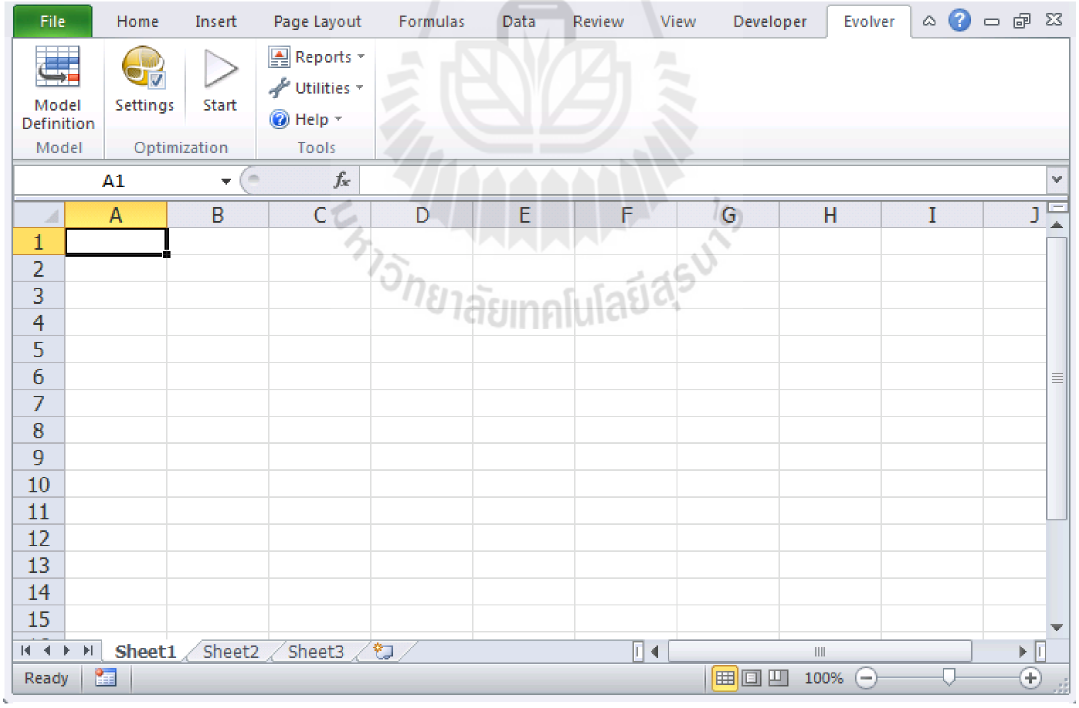
Section 4. Objective functions		
M_X	6,237	1.00
M_Y	4,332	0.00
MRD	22	0
RRH	10	0
RID	13	0
Total	6,237	

รูปที่ 3.2 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

3.4 วิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ

แบบจำลองปัญหาที่พัฒนาขึ้นนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms (GA) โดยโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Evolver™ ของบริษัท Palisade Corp. ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ใน Microsoft Excel ซึ่งหลังจากติดตั้งโปรแกรมแล้วจะปรากฏในเมนูของ Microsoft Excel เพื่อรอการเรียกใช้ต่อไป ดังแสดงในรูปข้างล่าง

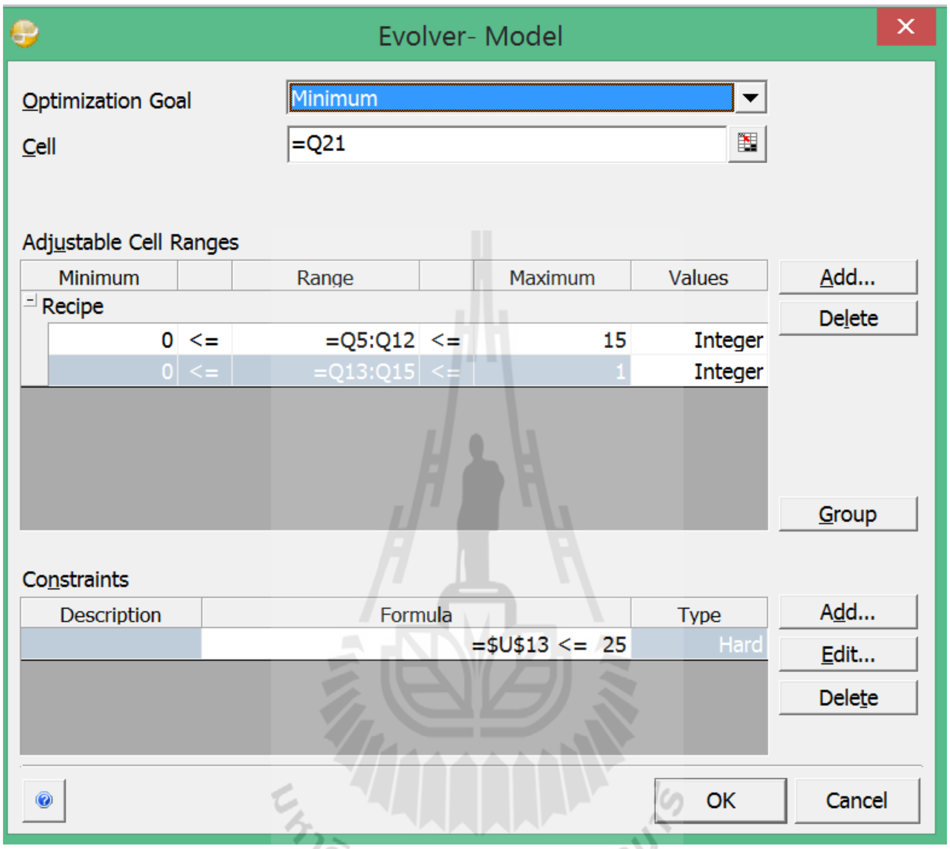
รูปที่ 3.3 หน้าต่างแสดงโปรแกรม Evolver ของ Palisade Corp.



รูปที่ 3.4 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว

ขั้นตอนการใช้งาน Evolver คล้ายคลึงกับโปรแกรม Solver คือเริ่มจากการกำหนดส่วนประกอบหลักของแบบจำลองซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปรคำตอบ และฟังก์ชันข้อจำกัด หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองทั้ง 3 ส่วนนี้แสดงดังในรูปข้างล่าง

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถกำหนดได้ว่าเป็น Optimization แบบการMinimization หรือ Maximization และโดยการกำหนดเซลที่จะใช้คำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์



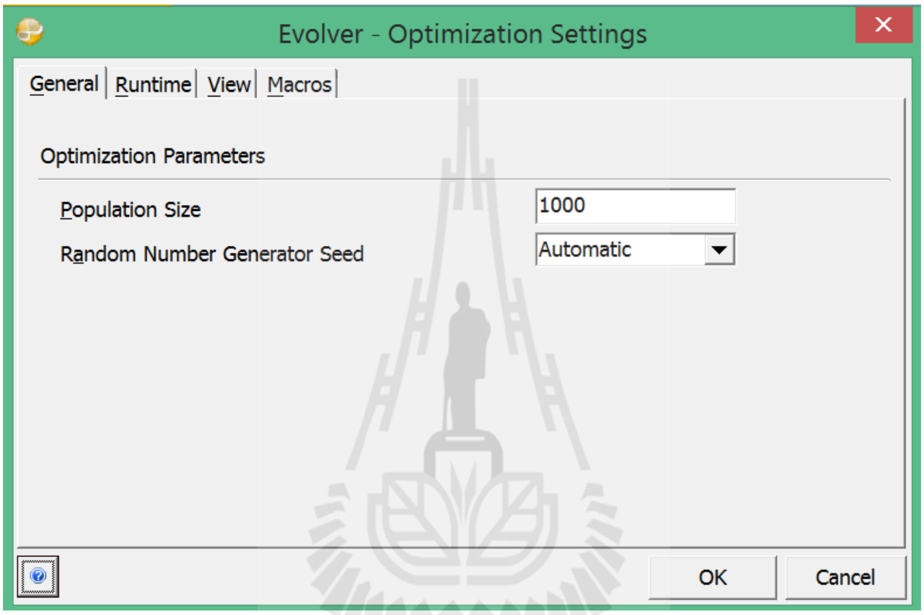
รูปที่ 3.5 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง

ตัวแปรคำตอบกำหนดให้เป็นกลุ่มเซลที่เรียกว่า Adjustable Cell Ranges ซึ่งโปรแกรม Evolver จะบังคับให้กำหนดขอบเขตบนและล่างของค่าตัวแปรคำตอบต่างๆทั้งหมดด้วย นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของค่าตัวแปรเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริงก็ได้

ฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถป้อนข้อมูลแบ่งเป็นชุดๆตามต้องการได้ โดยอ้างอิงไปที่กลุ่มเซลที่มีสูตรฟังก์ชันข้อจำกัดที่ต้องการ จากนั้นกำหนดขอบเขตบนและล่างที่เหมาะสม ทั้งนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นแบบ Soft หรือ Hard constraints ก็ได้

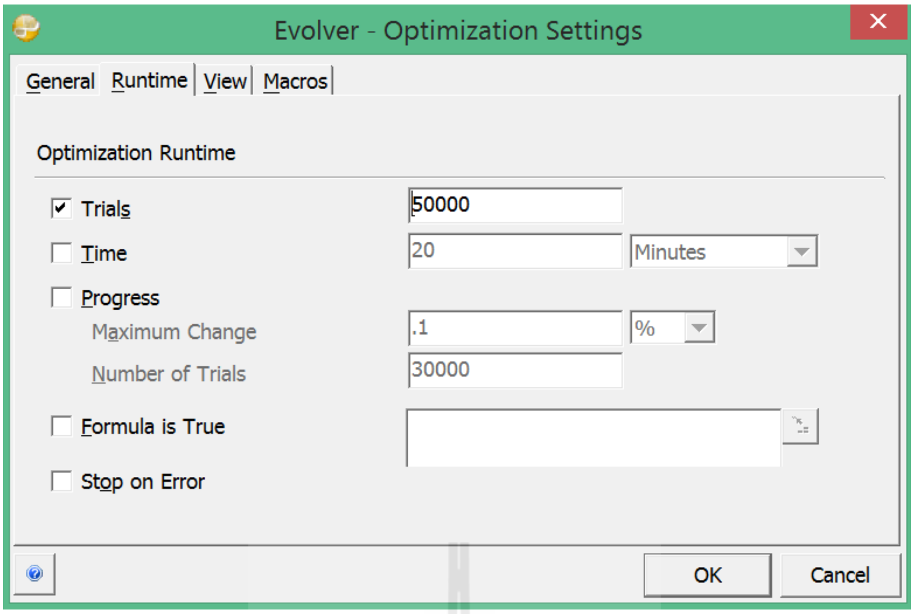
หลังจากที่ได้กำหนดส่วนประกอบหลักของแบบจำลองเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GA ที่จะใช้ในการหาคำตอบ ได้แก่ ค่า Population size, Random seed, Crossover rate, Mutation rate และเงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime)

ค่า Population Size จะเป็นตัวกำหนดความหลากหลายของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ในแต่ละรุ่นประชากร ค่า Random Number Generator Seed เป็นวิธีการหาตัวเลขสุ่มที่ต้องใช้ในการหาคำตอบ ค่า Crossover rate และ Mutation rate เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมปฏิบัติการทางพันธุกรรม ในกระบวนการวิวัฒนาการของ GA รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ (Runtime) ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถบังคับความพยายามในการค้นหาคำตอบให้เป็นไปตามต้องการได้อีกด้วย เงื่อนไขการสิ้นสุดการค้นหาคำตอบ (Runtime) สามารถเลือกใช้ได้หลายลักษณะได้แก่ การกำหนดจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ที่ถูกพิจารณา (Trials) การกำหนดระยะเวลาของการค้นหา หรือการกำหนดเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงของคำตอบที่ดีขึ้นภายในจำนวน Trials ที่กำหนด



รูปที่ 3.6 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size และ Random Number Generator Seed ของ Evolver

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.7 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการหยุดการค้นหาคำตอบ

จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GA ที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองต่อไป ได้ค่าที่เหมาะสมดังนี้ Population Size = 1000; Random Number Generator Seed = Automatic; Crossover rate = 0.5; Mutation rate = 0.1 สำหรับเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ (Runtime) ที่เหมาะสมกำหนดให้ใช้เป็นจำนวน Trials = 50,000 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าทำให้ได้คำตอบที่ดีอย่างน่าพอใจในระยะเวลาที่เหมาะสม

3.5 การทดสอบ

หลังจากที่ได้พัฒนาแบบจำลองปัญหาการวางแผนที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ขึ้นมาใหม่ในการวิจัยนี้ แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาสู่การทดสอบที่ประกอบด้วยรายละเอียด 2 ส่วนคือ ตัวโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดสอบ และประเด็นที่ทดสอบ ดังหัวข้อข้างล่างนี้

3.5.1 โจทย์ปัญหาในการทดสอบ

การวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้โจทย์ปัญหาในการทดสอบผลลัพธ์และประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นใหม่ เนื่องจากแบบจำลองปัญหาการวางแผนจะมีลักษณะผลคำตอบที่ได้ขึ้นกับโจทย์ปัญหาที่ใช้ด้วย ดังนั้นการทดสอบจึงเลือกใช้โจทย์ตัวอย่าง 2 ชุด ซึ่งโจทย์ตัวอย่างทั้งสองชุดนี้จะต่างกันคือ เป็นโจทย์ปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนกิจกรรมทั้งหมด 8 กิจกรรม และปัญหาขนาดใหญ่ที่มีจำนวนกิจกรรมทั้งหมด 23 กิจกรรม ทั้งนี้เพื่อให้เห็นผลลัพธ์ของแบบจำลองที่หลากหลายครอบคลุมในกรณีใดๆและเพื่อให้เกิดความมั่นใจในผลลัพธ์ของแบบจำลอง

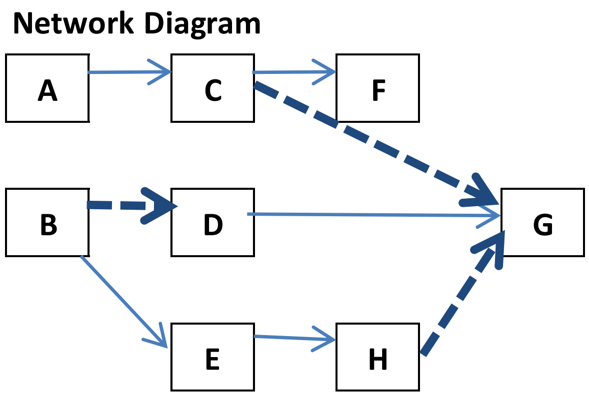
โจทย์ปัญหาจะได้จากการปรับแต่งข้อมูลของโครงการก่อสร้างให้เหมาะสมในการทดสอบ โดยอ้างอิงมาจากโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการวิจัยอื่นที่ผ่านมาคือ (Liu and Wang 2008; Hegazy and Ersahin 2001; El-

Rayes and Jun 2009) ทั้งนี้เพื่อการอ้างอิงเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพที่ชัดเจน ความจำเป็นอีกประการคือ ข้อมูลโครงการก่อสร้างที่สำรวจเก็บได้จากบริษัทก่อสร้างในประเทศ ทั้งที่เป็นบริษัทก่อสร้างสัญชาติไทยและต่างประเทศ มักไม่ครบถ้วนตามที่ต้องการ หรือบริษัทไม่อนุญาตให้ข้อมูลที่ต้องการทั้งหมดแก่คณะวิจัย อย่างไรก็ตามจากการสำรวจพบว่าบริษัทก่อสร้างสัญชาติต่างประเทศจัดเตรียมข้อมูลโครงการสำหรับการวางแผนละเอียดกว่ามาก ซึ่งสามารถนำมาปรับใช้กับแบบจำลองปัญหานี้ได้

1 โจทย์ปัญหาขนาดเล็ก เป็นข้อมูลโครงการก่อสร้างที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา ถูกเลือกใช้ในการวิจัยนี้ โดยต้องปรับปรุงเพิ่มเติมข้อมูลบางส่วนให้เหมาะสมกับความต้องการของแบบจำลองใหม่ กล่าวคือ โครงการก่อสร้างประกอบด้วยกิจกรรมทั้งหมด 8 กิจกรรม เพิ่มเติมกิจกรรมใหม่อีก 2 กิจกรรมจากเดิมที่มี 6 กิจกรรม ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองปัญหามีขนาดที่พอเหมาะ มีกิจกรรมวิกฤต และกิจกรรมที่สามารถปรับเลื่อนได้มากขึ้น และมีความซับซ้อนขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากโจทย์ปัญหาเดิมของ Liu and Wang (2008) มีความเรียบง่ายเกินไป มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ข้อมูลอื่นของกิจกรรมเดิมก็ถูกปรับแต่งให้เหมาะสมกับการทดสอบด้วย กำหนดให้กิจกรรมใดๆอันหนึ่งมีความสัมพันธ์กับ predecessors ได้ไม่เกินกว่า 3 กิจกรรม และแต่ละความสัมพันธ์มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ได้ไม่เกิน 2 ตัวเลือก โดยที่หนึ่งตัวเลือกในนั้นเป็นความสัมพันธ์ปกติแบบ Finish-to-Start นอกจากนี้เพื่อการปรับสมดุลจึงกำหนดให้มีทรัพยากรของโครงการเพียงประเภทเดียวที่สามารถหมุนเวียนใช้ได้ระหว่างกิจกรรมต่างๆ มีหน่วยเป็น units และโครงการยังมีระยะเวลาได้ไม่เกินกว่าระยะเวลาที่ได้จากการใช้ความสัมพันธ์แบบ Finish-to-Start ทั้งหมด นั่นคือ 25 periods แสดงข้อมูลของโครงการโจทย์นี้ด้วยตารางและแผนภาพในรูปข้างล่าง

Activity	**Duration (periods)**	**Resource (units)**	**Predecessor(s)**					
			Option#1			**Option#2**		
			1	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
A	**6**	**8**						
B	**8**	**9**						
C	**12**	**5**	**A**					
D	**6**	**7**	**B**			**FF:B**		
E	**5**	**10**	**B**					
F	**6**	**9**	**C**					
G	**7**	**3**	**C**	**D**	**H**	**SS:C**		**no:H**
H	**4**	**7**	**E**					

รูปที่ 3.8 ตารางข้อมูลโครงการของโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก



รูปที่ 3.9 แผนภาพเน็ตเวิร์คของกิจกรรมของโจทย์โครงการขนาดเล็ก

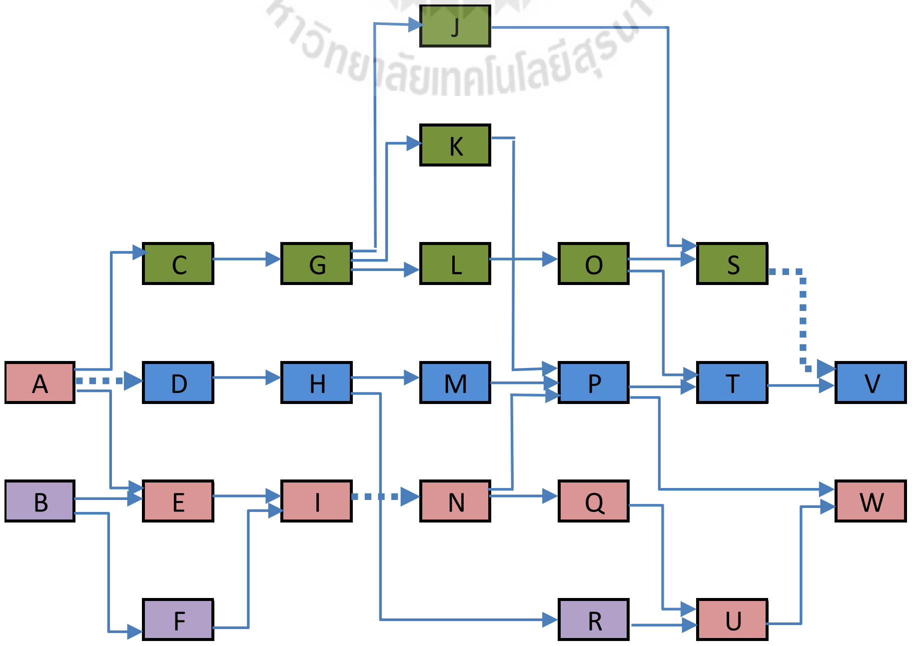
ข้อมูลความสัมพันธ์ของโครงการ มีความสัมพันธ์ทั้งหมด 8 ความสัมพันธ์ ประกอบด้วยความสัมพันธ์ 5 ตัวที่ไม่มีทางเลือกและใช้รูปแบบ Finish-to-Start (แสดงด้วยเส้นลูกศรทึบในแผนภาพ) ส่วนอีก 3 ตัวที่เหลือมีทางเลือก ซึ่งมีทางเลือกที่สองเป็นรูปแบบ Finish-to-Finish (FF), Start-to-Start (SS), และ No Relationship (แสดงด้วยเส้นลูกศรประในแผนภาพ) จึงมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ครบทุกกรณีสำหรับการทดสอบ

2 โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ เป็นข้อมูลโครงการก่อสร้างที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาอีกเช่นกัน ซึ่งต้องปรับปรุงเพิ่มเติมข้อมูลบางส่วนให้เหมาะสมกับความต้องการของแบบจำลองใหม่ ตัวโครงการประกอบด้วยกิจกรรมทั้งหมด 23 กิจกรรม จึงจัดเป็นโครงการที่มีขนาดใหญ่สำหรับการทำแบบจำลอง แผนงานเริ่มต้นที่ใช้รูปแบบความสัมพันธ์ FS ทั้งหมด มีกิจกรรมวิกฤต 7 กิจกรรม จึงมีกิจกรรมที่สามารถปรับเลื่อนได้เป็นจำนวนมาก มีสายทางจำนวนมากและเกี่ยวพันกันอย่างซับซ้อน ระยะเวลาของโครงการ 36 periods ซึ่งโจทย์ปัญหานี้มีขนาดใหญ่กว่าโจทย์ปัญหาเดิมของ El-Rayes and Jun (2009) ที่มีขนาดใหญ่อยู่แล้ว เงื่อนไขของข้อมูลอื่นๆยังคงเหมือนเดิมกับโจทย์ขนาดเล็กก่อนหน้า กล่าวคือ กำหนดให้กิจกรรมใดๆอันหนึ่งมีความสัมพันธ์กับ predecessors ได้ไม่เกินกว่า 3 กิจกรรม และแต่ละความสัมพันธ์มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ได้ไม่เกิน 2 ตัวเลือก โดยที่หนึ่งตัวเลือกในนั้นเป็นความสัมพันธ์ปกติแบบ Finish-to-Start มีการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนของโครงการเพียงประเภทเดียว มีหน่วยเป็น units และโครงการยังมีระยะเวลาได้ไม่เกินกว่าระยะเวลาของแผนงานเริ่มต้นที่ 36 periods แสดงข้อมูลของโครงการโจทย์นี้ด้วยตารางและแผนภาพในรูป

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s)					
			Option#1			Option#2		
			1	2	3	1	2	3
A	7	3						
B	2	4						
C	3	6	A					
D	6	5	A			NO:A		
E	3	2	A	B				
F	6	10	B					
G	4	6	C					
H	5	4	D					
I	7	7	E	F				
J	5	11	G					
K	7	3	G					
L	6	2	G					
M	5	10	H					
N	6	6	I			SS:I		
O	1	12	L					
P	3	8	K	M	N			
Q	4	5	N					
R	7	5	H					
S	5	8	J	O				
T	2	3	O	P				
U	3	3	Q	R				
V	7	6	S	T		FF:S		
W	6	5	P	U				

รูปที่ 3.10 ตารางข้อมูลโครงการของโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.8 แผนภาพเน็ตเวิร์คของกิจกรรมของโจทย์โครงการขนาดใหญ่

ข้อมูลความสัมพันธ์ของโครงการ มีความสัมพันธ์ทั้งหมด 30 ความสัมพันธ์ ประกอบด้วยความสัมพันธ์ 27 ตัวที่ไม่มีทางเลือกและใช้รูปแบบ Finish-to-Start (แสดงด้วยเส้นลูกศรทึบในแผนภาพ) ส่วนอีก 3 ตัวที่เหลือมีทางเลือก ซึ่งมีทางเลือกที่สองเป็นรูปแบบ No Relationship, Start-to-Start (SS), และ Finish-to-Finish (FF) (แสดงด้วยเส้นลูกศรประในแผนภาพ) ทั้งนี้เพื่อให้มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ครบทุกกรณีสำหรับการทดสอบ

3.5.2 ประเด็นทดสอบ

การทดสอบแบบจำลองปัญหาการวางแผนที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ จะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้และประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 ประเด็น ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

1. ประเด็นความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลอง โดยการทดสอบเปรียบเทียบผลลัพธ์แผนงานกับที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวางแผน เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีการใช้รูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายนอกเหนือจากแบบปกติ Finish-to-Start ทำให้การคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมมีความซับซ้อน รวมทั้งการพัฒนาให้แบบจำลองสามารถมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ส่งผลให้สมการคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมมีความซับซ้อนเพิ่มยิ่งขึ้นอีก ความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลองจึงต้องได้รับการทดสอบ ซึ่งการทดสอบที่สะดวกคือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวางแผนที่มีฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมอยู่แล้ว อีกทั้งโปรแกรมยังสามารถคำนวณค่าเวลาในกรณีที่กิจกรรมมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายได้ด้วย โดยอ้างอิงผลการคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมที่ได้จากโปรแกรมให้เป็นค่าที่ถูกต้อง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ค่าเวลาต่างๆที่คำนวณได้จากสมการของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ก็จะสามารถสรุปได้ว่าสมการคำนวณของแบบจำลองให้ค่าผลลัพธ์ที่ถูกต้องหรือไม่ แบบจำลองที่ผ่านการทดสอบว่ามีสมการคำนวณถูกต้องสมบูรณ์แล้วจะเป็นการเตรียมความพร้อมให้สามารถนำไปใช้ทดสอบในประเด็นอื่นๆถัดไปได้

2. ประเด็นการกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ เนื่องจากแบบจำลองปัญหาการวางแผนโดยทั่วไปจะมีขนาดของคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solutions) อยู่จำนวนมากมายมหาศาล การพิจารณาหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) ที่แท้จริงอาจเป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากจะใช้เวลาหาคำตอบนานอย่างมาก และอาจไม่คุ้มค่าแก่การรอคอย วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองที่เลือกใช้เป็นการค้นหาแบบสุ่มที่มีทิศทางด้วย Genetic Algorithms (GA) ซึ่งจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการค้นหาคำตอบที่มีทิศทางมุ่งไปสู่คำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆ ด้วยการกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบของ GA จะหมายถึงระดับความพึงพอใจกับคำตอบที่ได้เมื่อเทียบกับเวลาการหาคำตอบที่ต้องรอคอย ซึ่งอาจกำหนดให้หยุดเมื่อได้คำตอบที่ดีน่าพอใจระดับหนึ่งโดยที่ใช้เวลาค้นหาไม่มากเกินไปนัก เวลาค้นหาที่มากขึ้นอาจช่วยให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่พิจารณาแล้วไม่คุ้มค่า การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับวิธีการหาคำตอบแบบ GA กับแบบจำลองปัญหาการวางแผนเช่นนี้ ซึ่งเงื่อนไข

ที่เหมาะสมอาจจะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของโจทย์ปัญหา การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการทดสอบเปรียบเทียบแผนงานผลลัพธ์ที่ได้จากเงื่อนไขการหยุดหลายๆรูปแบบเพื่อหาเงื่อนไขการหยุดที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะสามารถนำไปกำหนดใช้สำหรับการทดสอบในประเด็นถัดๆไปได้ด้วย เงื่อนไขการหยุดของโปรแกรม Evolver มีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่ จำนวน trials, ระยะเวลาการค้นหา, และความก้าวหน้าของคำตอบ

จำนวน trials คือการกำหนดจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ที่นำมาประเมิน เมื่อโปรแกรมสุ่มคำตอบและนำมาประเมินถึงจำนวนที่กำหนดไว้แล้ว โปรแกรมจะสิ้นสุดการดำเนินการ และให้คำตอบที่ดีที่สุดคำตอบหนึ่งที่หาได้จากจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่นำมาประเมินเหล่านั้น

ระยะเวลาการค้นหา คือการกำหนดระยะเวลาที่ใช้สำหรับการดำเนินการของโปรแกรม ทั้งนี้หากกำหนดระยะเวลามากจะหมายถึงจำนวน trials ที่ถูกนำมาประเมินได้มากนั่นเอง แต่ก็ขึ้นกับความเร็วของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ หากเปรียบเทียบกับเงื่อนไขแบบจำนวน trials จะเห็นว่ามีคล้ายคลึงกันแต่ เงื่อนไขแบบจำนวน trials จะมีความยุติธรรมดีกว่าสำหรับการนำผลจาก runtime ต่างๆมาเปรียบเทียบกัน

ความก้าวหน้าของคำตอบ คือการกำหนดเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงที่ดีขึ้นของคำตอบขั้นต่ำภายในจำนวน trails ที่กำหนด เช่น 0.1% ภายในจำนวน 1,000 Trials หมายถึงว่าหากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่ดีขึ้นกว่าเดิมเกินกว่า 0.1% เมื่อผ่านไปอีก 1,000 trials โปรแกรมจะสิ้นสุดการดำเนินการ รูปแบบเงื่อนไขการหยุดนี้จึงพิจารณาที่ความก้าวหน้าของคำตอบและไม่ขึ้นกับจำนวน trials และระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งก็คือขอบเขตการยอมรับกับคำตอบที่ได้หากมีความก้าวหน้าเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย

3. ประเด็นการเปรียบเทียบระหว่างการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel นี้สามารถใช้ในการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (resource leveling) แบบที่ใช้อยู่โดยทั่วไปได้โดยสามารถกำหนดให้มีหรือไม่มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ได้ ด้วยการกำหนดกลุ่มของตัวแปรคำตอบของแบบจำลองที่ประกอบด้วย 2 กลุ่ม คือ กลุ่มระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรม (Activity’s shifting start time) และกลุ่มตัวเลือกรูปแบบของความสัมพันธ์ (Relationship options) หากยกเลิกตัวแปรคำตอบกลุ่มที่ 2 ก็จะเท่ากับแบบจำลองการวางแผนแบบดั้งเดิมที่ไม่มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ มีเพียงกลุ่มระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรมที่เป็นตัวแปรกำหนดแผนงานคำตอบของแบบจำลองเท่านั้น โดยการยกเลิกทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองไว้ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองนี้ทำงานในสภาวะคล้ายกับแบบจำลองปัญหาการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวางแผนที่มีอยู่ส่วนใหญ่ก็มีฟังก์ชันสำหรับการปรับสมดุลอยู่ด้วย แต่ทั้งนี้วิธีการปรับหรือวิธีการหาคำตอบที่ดีอาจต่างกัน โดยที่โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้วิธีหาคำตอบแบบ heuristic algorithms ที่ทำให้ได้คำตอบเดียวอันเดิมเสมอสำหรับโจทย์ปัญหาหนึ่ง แต่การหาคำตอบของแบบจำลองนี้ใช้ GA ซึ่งเป็นการสุ่มค้นหาจึงทำให้คำตอบที่ดีที่ได้ไม่เหมือนกันทุกครั้ง ทั้งนี้การทดสอบประเด็นนี้จึงเป็นการแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับการนำไปใช้งานแบบพื้นฐานดั้งเดิมว่าดีเพียงใด

4. ประเด็นการเปรียบเทียบระหว่างการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ประเด็นการทดสอบนี้จะเป็นการบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพและคุณประโยชน์ของแบบจำลองใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้อย่างชัดเจน โดยจะเปรียบเทียบกับผลลัพธ์แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปด้วยการใช้ฟังก์ชันสำหรับการปรับสมดุลที่มีอยู่ และจะกำหนดให้โจทย์ปัญหาของโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์เป็นตัวเลือกที่ 2 (ที่ไม่ใช่รูปแบบปกติ Finish-to-Start) ทั้งหมดด้วย และยังสามารถขยายการเปรียบเทียบระหว่างกันเองของแบบจำลองที่มีกับไม่มีทางเลือกได้ด้วย (การทดสอบประเด็นที่ 3) เพื่อให้เห็นผลลัพธ์เปรียบเทียบกันระหว่างการแบบจำลองปัญหาการวางแผนแบบดั้งเดิมกับแบบที่มีทางเลือกความสัมพันธ์ว่าจะทำให้แผนงานที่ได้ต่างกันอย่างไร และมีข้อดีอย่างไรที่ทำให้แบบจำลองสามารถหาทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมได้ ซึ่งแนวคิดของการวิจัยนี้มีสมมติฐานว่าการที่แบบจำลองมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ด้วยจะทำให้ปัญหาการวางแผนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น สามารถจัดแผนงานที่มีการจัดสรรทรัพยากรที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้กว่าแบบดั้งเดิม การทดสอบประเด็นนี้จึงเป็นการพิสูจน์ข้อสมมติฐานหลักของการวิจัยนี้

5. ประเด็นการเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ การประเมินประสิทธิภาพของการจัดสรรทรัพยากรโครงการนั้นมีการสร้างและใช้ค่าดัชนีชี้วัดหลากหลายค่า ได้แก่ M_x, MRD, RRH, และ RID ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าดัชนี M_x เป็นหลักสำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (สำหรับการทดสอบในประเด็นต่างๆก่อนหน้า) อย่างไรก็ตามค่าดัชนีอื่นๆก็มีความน่าสนใจและทำให้ได้รูปทรงของการจัดสรรทรัพยากรที่ดีแต่แตกต่างกันออกไปบ้าง ประเด็นการทดสอบนี้จึงนำค่าดัชนีอื่นๆดังกล่าวมาทดลองใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์แผนงานที่ได้ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบผสม (Multi-objective function) ด้วยการใช้ผลรวมของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ย่อยๆหลายตัวที่มีการถ่วงน้ำหนักไว้แล้ว (weighted sum) ทั้งนี้การถ่วงน้ำหนักจะมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับแต่ละดัชนีเพื่อปรับสัดส่วนสเกลในค่าผลรวมให้ทุกดัชนีมีความสำคัญใกล้เคียงกันทั้งหมด

3.5.3 วิธีการทดสอบ

วิธีทดสอบสำหรับประเด็นที่ 1 นั้นใช้การลองสุ่มค่าตัวแปรคำตอบหลายๆชุดคำตอบที่ต่างๆกัน เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์แผนงานที่ได้กับที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวางแผน โดยในการวิจัยนี้เลือกใช้ Microsoft Project ซึ่งค่าผลลัพธ์แผนงานที่ได้ควรจะเหมือนกันจึงจะแสดงว่าสมการคำนวณของแบบจำลองสามารถให้ค่าที่ถูกต้อง การทดสอบประเด็นที่ 1 จะใช้โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่เท่านั้นเนื่องจากจะสามารถครอบคลุมถึงกรณีโจทย์ปัญหาขนาดเล็กที่ซับซ้อนน้อยกว่าได้

สำหรับประเด็นทดสอบที่ 2-5 นั้นเป็นการสังเกตผลจากการหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization) จากแบบจำลอง ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ เริ่มจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาลงในแผ่นคำนวณของโปรแกรม Microsoft Excel บริเวณพื้นที่เซลที่เป็นส่วนข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง จากนั้นจึงทำการ

กำหนดป้อนค่าให้กับตัวแปรคำตอบ ซึ่งค่านี้จะเป็นคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) โดยการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดจะทำการปรับปรุงจากคำตอบเริ่มต้นนี้ ขั้นตอนต่อไปคือการเรียกโปรแกรม Evolver เพื่อกำหนดกลุ่มเซลต่างๆที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของแบบจำลอง พร้อมทั้งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของ GA รวมทั้งเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ ซึ่งโปรแกรมจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบแต่ละครั้ง (runtime) นานเพียงใดขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขการหยุดนี้ โดยจะการสิ้นสุดการค้นหาเมื่อมีสถานะตรงกับเงื่อนไขการสิ้นสุดที่กำหนดไว้ หลังจากสิ้นสุดกระบวนการ โปรแกรมจะแสดงค่าตัวแปรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหา พร้อมทั้งที่โปรแกรม Excel จะคำนวณค่าเวลาของแผนงาน และค่าดัชนีที่สอดคล้องกับคำตอบที่ได้

อย่างไรก็ตาม การหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วย GA เป็นการค้นหาแบบสุ่ม ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณและอาจไม่เหมือนกันในแต่ละครั้ง (runtime) ดังนั้นการทดสอบแต่ละชุดจึงต้องถูกทดสอบซ้ำหลายๆครั้ง (runtime) ตามที่เหมาะสม ทั้งนี้พิจารณาจากคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งว่าเหมือนเดิมหรือต่างจากครั้งก่อนหน้ามากน้อยเพียงใด เพื่อให้มั่นใจว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีอย่างสม่ำเสมอในทุกครั้ง

การทดสอบประเด็นที่ 2 และ 5 จะใช้โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่เพียงเท่านั้นอีกเช่นกันเนื่องจากจะสามารถครอบคลุมถึงกรณีโจทย์ปัญหาขนาดเล็กที่ซับซ้อนน้อยกว่าได้ ส่วนการทดสอบประเด็นที่ 3 และ 4 จะใช้โจทย์ปัญหาทั้งสองขนาดที่จัดเตรียมไว้ เพื่อให้เห็นถึงผลลัพธ์ของแบบจำลองที่อาจขึ้นกับลักษณะและขนาดของโจทย์ด้วย เพื่อให้ครอบคลุมกรณีของโจทย์ปัญหาใดๆที่จะใช้กับแบบจำลองต่อไป

ตารางข้างล่างนี้สรุปประเด็นและชุดการทดสอบแบบจำลองทั้งหมดที่ออกแบบไว้ โดยจัดเรียงแบ่งตามกลุ่มประเด็นหลักทั้ง 5 ประเด็น

ตารางที่ 3.1 ประเด็นการทดสอบแบบจำลอง

ชุดทดสอบที่	รายละเอียด	จำนวน Runtime
ประเด็นที่ 1 ความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลอง		N/A
1.1	ชุดคำตอบที่ 1 ความสัมพันธ์ทั้งหมดเป็นแบบ Finish-to-Start	N/A
1.2	ชุดคำตอบที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง A-D ใช้ตัวเลือกที่ 2	N/A
1.3	ชุดคำตอบที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง I-N ใช้ตัวเลือกที่ 2	N/A
1.4	ชุดคำตอบที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง S-V ใช้ตัวเลือกที่ 2	N/A
1.5	ชุดคำตอบที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง A-D, I-N, และ S-V ใช้ตัวเลือกที่ 2	N/A
1.6	ชุดคำตอบที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง A-D, I-N, และ S-V ใช้ตัวเลือกที่ 2 พร้อมทั้งมีระยะเลื่อนของ C, G, H, J, M, N, Q, R, และ T	N/A

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประเด็นที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ		180
2.1	จำนวน trials = 25,000	30
2.2 (หรือ 4.2)	จำนวน trials = 50,000	30
2.3	จำนวน trials = 100,000	30
2.4	ความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 10,000 trials	30
2.5	ความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 30,000 trials	30
2.6	ความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 50,000 trials	30
ประเด็นที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่**ไม่มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป		60
3.1	โจทย์ปัญหาขนาด**เล็ก**ที่แบบจำลอง**ไม่มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์	30
3.2	โจทย์ปัญหาขนาด**ใหญ่**ที่แบบจำลอง**ไม่มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์	30
ประเด็นที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่**มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป		60
4.1	โจทย์ปัญหาขนาด**เล็ก**ที่แบบจำลอง**มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์	30
4.2	โจทย์ปัญหาขนาด**ใหญ่**ที่แบบจำลอง**มี**ทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์	30
ประเด็นที่ 5 การเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ		150
5.1 (หรือ 4.2)	Single-objective function = M_x	30
5.2	Single-objective function = MRD	30
5.3	Single-objective function = RRH	30
5.4	Single-objective function = RID	30
5.5	Multi-objective function = (0.005Mx + 2MRD + 2RRH + 1RID)	30

3.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ข้อมูลผลการทดสอบทั้ง 5 ประเด็นแสดงรายละเอียดแยกไว้ในแต่ละหัวข้อย่อยข้างล่าง และบางประเด็นยังต้องแยกผลการทดสอบออกเป็นของโจทย์ปัญหาในการทดสอบที่มีอยู่ 2 โจทย์คือ ขนาดเล็กและ

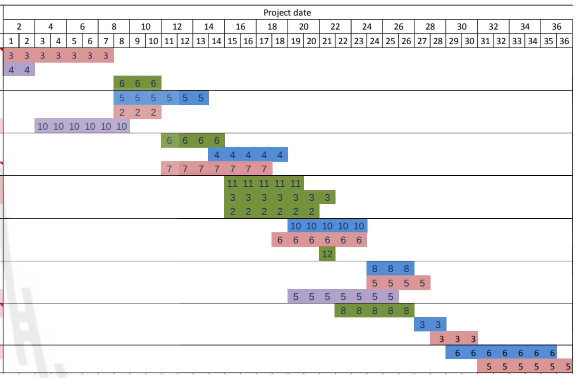
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดใหญ่ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละประเด็นดังต่อไปนี้ เพื่อความสะดวกในการอ่านให้เข้าใจได้ง่ายจึงอธิบายผลการวิเคราะห์เป็นข้อๆ

3.6.1 ประเด็นที่ 1 ความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลอง

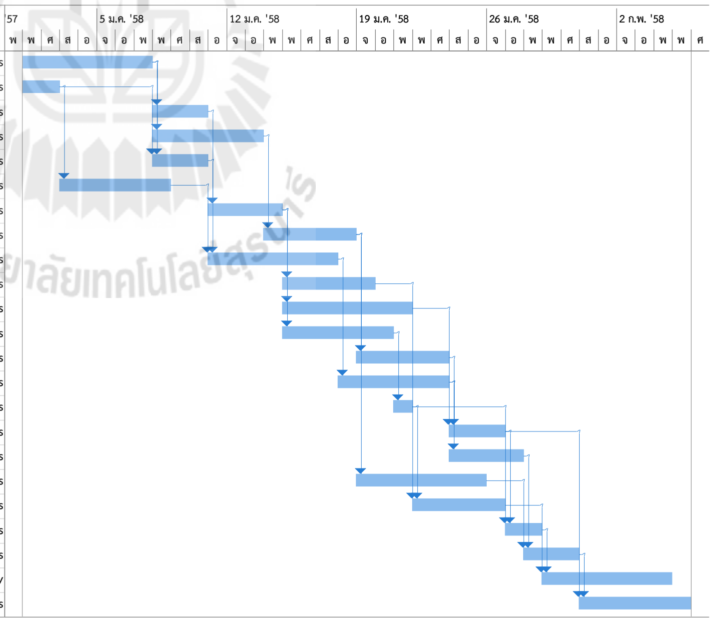
- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 1 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด โดยตัวแปรตัวเลือกที่ 1 มีค่าเป็น 1 และตัวแปรตัวเลือกที่ 2 มีค่าเป็น 0 เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s) Option#1 1	Predecessor(s) Option#1 2	Predecessor(s) Option#1 3	Predecessor(s) Option#2 1	Predecessor(s) Option#2 2	Predecessor(s) Option#2 3	X_{ihm} Option#1 1	X_{ihm} Option#1 2	X_{ihm} Option#1 3	X_{ihm} Option#2 1	X_{ihm} Option#2 2	X_{ihm} Option#2 3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	0	7	0	0
B	2	4													0	0	0	2	2	4	2	0
C	3	6	A												0	7	7	10	10	13	3	0
D	6	5	A			NO:A			1			0			0	7	7	13	8	14	1	0
E	3	2	A	B											0	7	7	10	7	10	0	0
F	6	10	B												0	2	2	8	4	10	2	2
G	4	6	C												0	10	10	14	13	17	3	0
H	5	4	D												0	13	13	18	14	19	1	0
I	7	7	E	F											0	10	10	17	10	17	0	0
J	5	11	G												0	14	14	19	19	24	5	2
K	7	3	G												0	14	14	21	17	24	3	2
L	6	2	G												0	14	14	20	17	23	3	0
M	5	10	H												0	18	18	23	19	24	1	0
N	6	6	I			SS:I			1			0			0	17	17	23	17	23	0	0
O	1	12	L												0	20	20	21	23	24	3	0
P	3	8	K	M	N										0	23	23	26	24	27	1	0
Q	4	5	N												0	23	23	27	23	27	0	0
R	7	5	H												0	18	18	25	20	27	2	2
S	5	8	J	O											0	21	21	26	24	29	3	2
T	2	3	O	P											0	26	26	28	27	29	1	0
U	3	3	Q	R											0	27	27	30	27	30	0	0
V	7	6	S	T		FF:S			1			0			0	28	28	35	29	36	1	1
W	6	5	P	U											0	30	30	36	30	36	0	0



รูปที่ 3.11 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 1

ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ส 3/1/58	อ 4/1/58	2 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	อ 11/1/58	อ 13/1/58	3 days	0 days
4	D	6 days	1	พ 8/1/58	อ 13/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	1 day	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	จ 5/1/58	ส 10/1/58	2 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	พ 14/1/58	ส 17/1/58	3 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 14/1/58	อ 18/1/58	พ 15/1/58	จ 19/1/58	1 day	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	อ 11/1/58	ส 17/1/58	0 days	0 days
10	J	5 days	7	พ 15/1/58	จ 19/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	5 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	3 days	2 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	3 days	0 days
13	M	5 days	8	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	1 day	0 days
14	N	6 days	9	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
15	O	1 day	12	พ 21/1/58	พ 21/1/58	ส 24/1/58	ส 24/1/58	3 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	ส 24/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	1 day	0 days
17	Q	4 days	14	ส 24/1/58	อ 27/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
18	R	7 days	8	จ 19/1/58	อ 25/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	2 days	2 days
19	S	5 days	10,15	พ 22/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	พ 29/1/58	3 days	2 days
20	T	2 days	15,16	อ 27/1/58	พ 28/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	1 day	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	0 days	0 days
22	V	7 days	19,20	พ 29/1/58	พ 4/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	1 day	1 day
23	W	6 days	16,21	ส 31/1/58	พ 5/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days



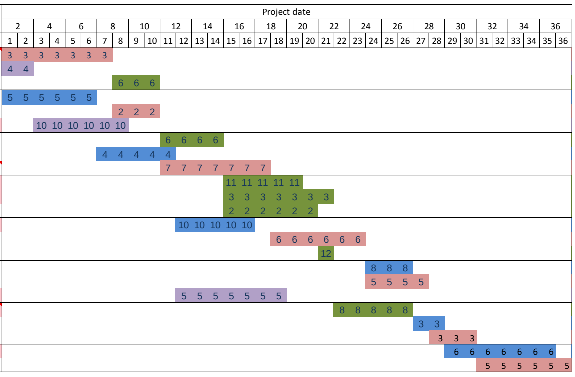
รูปที่ 3.12 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 1

- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม A และ D

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

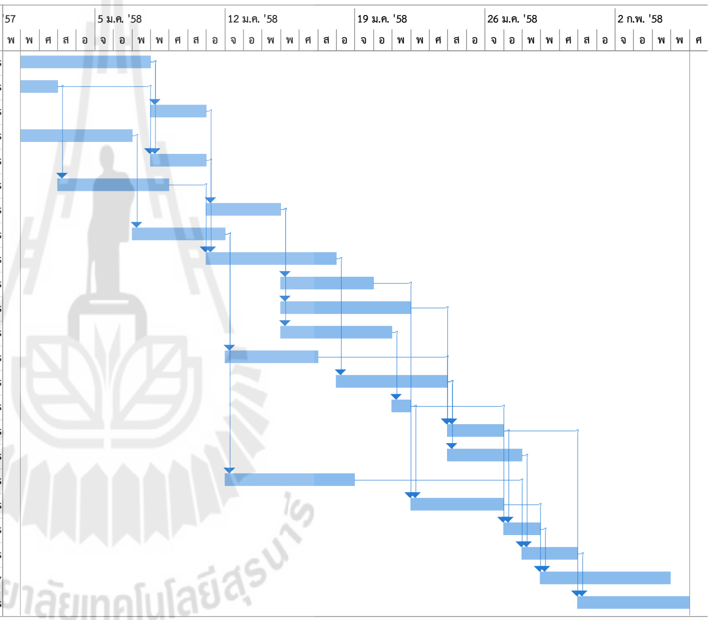
กำหนดให้ใช้ตัวเลือกที่ 2 คือไม่มีความสัมพันธ์กัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s) Option#1			Predecessor(s) Option#2			X_{ihm} Option#1			X_{ihm} Option#2			Schedule time							
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	0	7	0	0
B	2	4													0	0	0	2	2	4	2	0
C	3	6	A												0	7	7	10	10	13	3	0
D	6	5	A			NO:A			0			1			0	7	0	6	8	14	8	0
E	3	2	A	B											0	7	7	10	7	10	0	0
F	6	10	B												0	2	2	8	4	10	2	2
G	4	6	C												0	10	10	14	13	17	3	0
H	5	4	D												0	13	6	11	14	19	8	0
I	7	7	E	F											0	10	10	17	10	17	0	0
J	5	11	G												0	14	14	19	19	24	5	2
K	7	3	G												0	14	14	21	17	24	3	2
L	6	2	G												0	14	14	20	17	23	3	0
M	5	10	H												0	18	11	16	19	24	8	7
N	6	6	I			SS:I			1			0			0	17	17	23	17	23	0	0
O	1	12	L												0	20	20	21	23	24	3	0
P	3	8	K	M	N										0	23	23	26	24	27	1	0
Q	4	5	N												0	23	23	27	23	27	0	0
R	7	5	H												0	18	11	18	20	27	9	9
S	5	8	J	O											0	21	21	26	24	29	3	2
T	2	3	O	P											0	26	26	28	27	29	1	0
U	3	3	Q	R											0	27	27	30	27	30	0	0
V	7	6	S	T		FF:S			1			0			0	28	28	35	29	36	1	1
W	6	5	P	U											0	30	30	36	30	36	0	0



รูปที่ 3.13 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 2

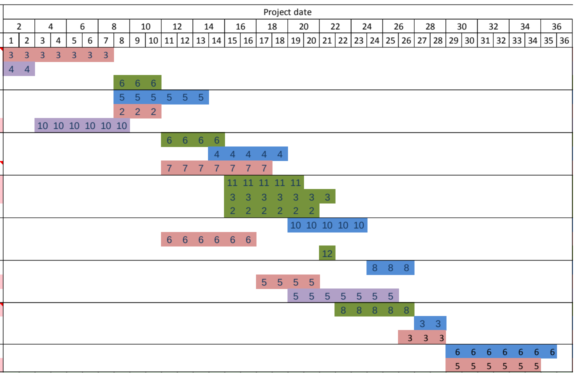
ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ส 3/1/58	อ 4/1/58	2 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	อ 11/1/58	อ 13/1/58	3 days	0 days
4	D	6 days		พ 1/1/58	อ 6/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	8 days	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	จ 5/1/58	ส 10/1/58	2 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	พ 14/1/58	ส 17/1/58	3 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 7/1/58	อ 11/1/58	พ 15/1/58	จ 19/1/58	8 days	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	อ 11/1/58	ส 17/1/58	0 days	0 days
10	J	5 days	7	พ 15/1/58	จ 19/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	5 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	3 days	2 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	3 days	0 days
13	M	5 days	8	จ 12/1/58	ศ 16/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	8 days	7 days
14	N	6 days	9	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
15	O	1 day	12	พ 21/1/58	พ 21/1/58	ส 24/1/58	ส 24/1/58	3 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	ส 24/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	1 day	0 days
17	Q	4 days	14	ส 24/1/58	อ 27/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
18	R	7 days	8	จ 12/1/58	อ 18/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	9 days	9 days
19	S	5 days	10,15	พ 22/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	พ 29/1/58	3 days	2 days
20	T	2 days	15,16	อ 27/1/58	พ 28/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	1 day	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	0 days	0 days
22	V	7 days	19,20	พ 29/1/58	พ 4/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	1 day	1 day
23	W	6 days	16,21	ส 31/1/58	พ 5/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days



รูปที่ 3.14 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 2

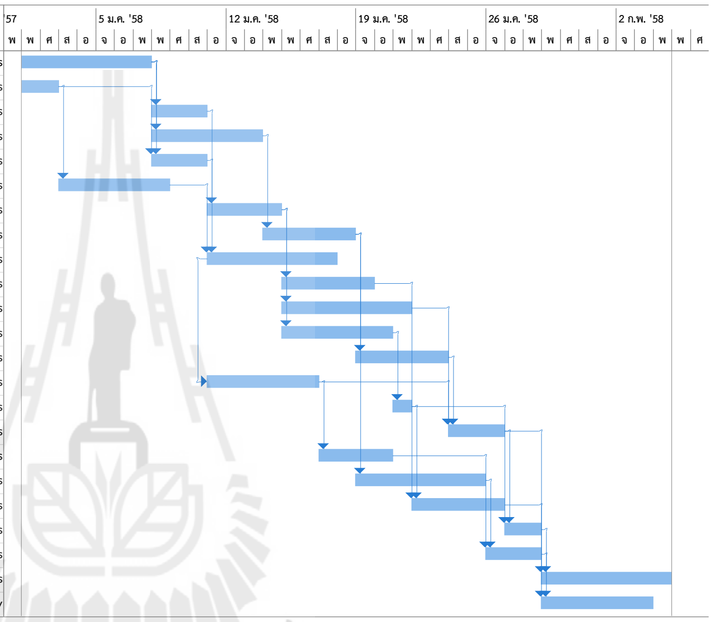
- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม I และ N กำหนดให้ใช้ตัวเลือกที่ 2 คือ รูปแบบ Start-to-Start เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s) Option#1 1	2	3	Option#2 1	2	3	X_{ihm} Option#1 1	2	3	Option#2 1	2	3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	0	7	0	0
B	2	4													0	0	0	2	8	10	8	0
C	3	6	A												0	7	7	10	9	12	2	0
D	6	5	A			NO:A			1			0			0	7	7	13	7	13	0	0
E	3	2	A	B											0	7	7	10	13	16	6	0
F	6	10	B												0	2	2	8	10	16	8	2
G	4	6	C												0	10	10	14	12	16	2	0
H	5	4	D												0	13	13	18	13	18	0	0
I	7	7	E	F											0	10	10	17	16	23	6	0
J	5	11	G												0	14	14	19	18	23	4	2
K	7	3	G												0	14	14	21	16	23	2	2
L	6	2	G												0	14	14	20	16	22	2	0
M	5	10	H												0	18	18	23	18	23	0	0
N	6	6	I			SS:I			0			1			0	17	10	16	16	22	6	0
O	1	12	L												0	20	20	21	22	23	2	0
P	3	8	K	M	N										0	23	23	26	23	26	0	0
Q	4	5	N												0	23	16	20	22	26	6	5
R	7	5	H												0	18	18	25	19	26	1	0
S	5	8	J	O											0	21	21	26	23	28	2	2
T	2	3	O	P											0	26	26	28	26	28	0	0
U	3	3	Q	R											0	27	25	28	26	29	1	0
V	7	6	S	T		FF:S			1			0			0	28	28	35	28	35	0	0
W	6	5	P	U											0	30	28	34	29	35	1	1



รูปที่ 3.15 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 3

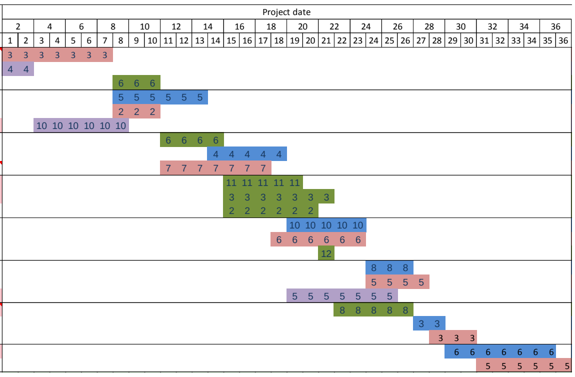
ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ศ 9/1/58	ส 10/1/58	8 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	ส 10/1/58	จ 12/1/58	2 days	0 days
4	D	6 days	1	พ 8/1/58	อ 13/1/58	พ 8/1/58	อ 13/1/58	0 days	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 14/1/58	ศ 16/1/58	6 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	อ 11/1/58	ศ 16/1/58	8 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	อ 13/1/58	ศ 16/1/58	2 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 14/1/58	อ 18/1/58	พ 14/1/58	อ 18/1/58	0 days	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	ส 17/1/58	ศ 23/1/58	6 days	0 days
10	J	5 days	7	พ 15/1/58	จ 19/1/58	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	4 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	ส 17/1/58	ศ 23/1/58	2 days	2 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	ส 17/1/58	พ 22/1/58	2 days	0 days
13	M	5 days	8	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
14	N	6 days	9SS	อ 11/1/58	ศ 16/1/58	ส 17/1/58	พ 22/1/58	6 days	0 days
15	O	1 day	12	พ 21/1/58	พ 21/1/58	ศ 23/1/58	ศ 23/1/58	2 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	ส 24/1/58	จ 26/1/58	ส 24/1/58	จ 26/1/58	0 days	0 days
17	Q	4 days	14	ส 17/1/58	อ 20/1/58	ศ 23/1/58	จ 26/1/58	6 days	5 days
18	R	7 days	8	จ 19/1/58	อ 25/1/58	อ 20/1/58	จ 26/1/58	1 day	0 days
19	S	5 days	10,15	พ 22/1/58	จ 26/1/58	ส 24/1/58	พ 28/1/58	2 days	2 days
20	T	2 days	15,16	อ 27/1/58	พ 28/1/58	อ 27/1/58	พ 28/1/58	0 days	0 days
21	U	3 days	17,18	จ 26/1/58	พ 28/1/58	อ 27/1/58	พ 29/1/58	1 day	0 days
22	V	7 days	19,20	พ 29/1/58	พ 4/2/58	พ 29/1/58	พ 4/2/58	0 days	0 days
23	W	6 days	16,21	พ 29/1/58	อ 3/2/58	ศ 30/1/58	พ 4/2/58	1 day	1 day



รูปที่ 3.16 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 3

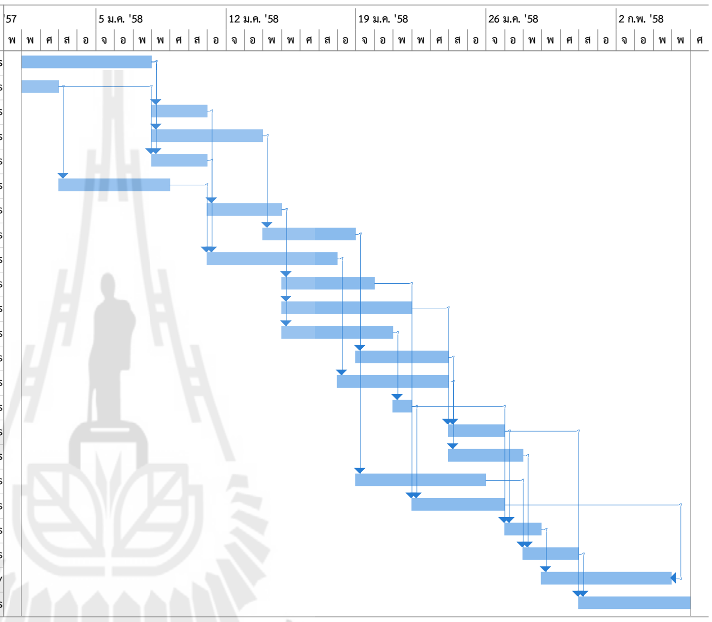
- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม S และ V กำหนดให้ใช้ตัวเลือกที่ 2 คือ รูปแบบ Finish-to-Finish เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s) Option#1 1	Predecessor(s) Option#1 2	Predecessor(s) Option#1 3	Predecessor(s) Option#2 1	Predecessor(s) Option#2 2	Predecessor(s) Option#2 3	X_{ihm} Option#1 1	X_{ihm} Option#1 2	X_{ihm} Option#1 3	X_{ihm} Option#2 1	X_{ihm} Option#2 2	X_{ihm} Option#2 3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	0	7	0	0
B	2	4													0	0	0	2	2	4	2	0
C	3	6	A												0	7	7	10	10	13	3	0
D	6	5	A			NO:A			1			0			0	7	7	13	8	14	1	0
E	3	2	A	B											0	7	7	10	7	10	0	0
F	6	10	B												0	2	2	8	4	10	2	2
G	4	6	C												0	10	10	14	13	17	3	0
H	5	4	D												0	13	13	18	14	19	1	0
I	7	7	E	F											0	10	10	17	10	17	0	0
J	5	11	G												0	14	14	19	26	31	12	2
K	7	3	G												0	14	14	21	17	24	3	2
L	6	2	G												0	14	14	20	20	26	6	0
M	5	10	H												0	18	18	23	19	24	1	0
N	6	6	I			SS:I			1			0			0	17	17	23	17	23	0	0
O	1	12	L												0	20	20	21	26	27	6	0
P	3	8	K	M	N										0	23	23	26	24	27	1	0
Q	4	5	N												0	23	23	27	23	27	0	0
R	7	5	H												0	18	18	25	20	27	2	2
S	5	8	J	O											0	21	21	26	31	36	10	9
T	2	3	O	P											0	26	26	28	27	29	1	0
U	3	3	Q	R											0	27	27	30	27	30	0	0
V	7	6	S	T		FF:S			0			1			0	28	28	35	29	36	1	1
W	6	5	P	U											0	30	30	36	30	36	0	0



รูปที่ 3.17 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 4

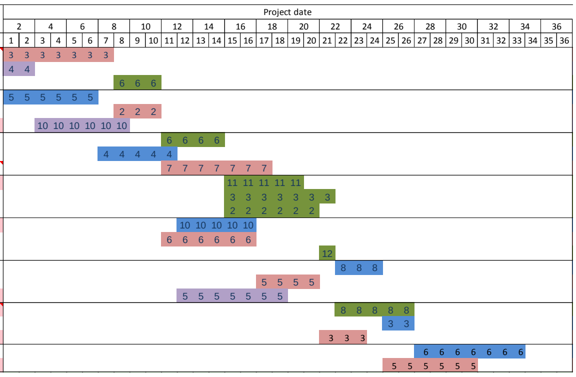
ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ส 3/1/58	อ 4/1/58	2 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	อ 11/1/58	อ 13/1/58	3 days	0 days
4	D	6 days	1	พ 8/1/58	อ 13/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	1 day	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	จ 5/1/58	ส 10/1/58	2 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	พ 14/1/58	ส 17/1/58	3 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 14/1/58	อ 18/1/58	พ 15/1/58	จ 19/1/58	1 day	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	อ 11/1/58	ส 17/1/58	0 days	0 days
10	J	5 days	7	พ 15/1/58	จ 19/1/58	อ 27/1/58	ส 31/1/58	12 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	3 days	2 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	พ 21/1/58	จ 26/1/58	6 days	0 days
13	M	5 days	8	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	1 day	0 days
14	N	6 days	9	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
15	O	1 day	12	พ 21/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	อ 27/1/58	6 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	ส 24/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	1 day	0 days
17	Q	4 days	14	ส 24/1/58	อ 27/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
18	R	7 days	8	จ 19/1/58	อ 25/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	2 days	2 days
19	S	5 days	10,15	พ 22/1/58	จ 26/1/58	อ 1/2/58	พ 5/2/58	10 days	9 days
20	T	2 days	15,16	อ 27/1/58	พ 28/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	1 day	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	0 days	0 days
22	V	7 days	19FF,20	พ 29/1/58	พ 4/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	1 day	1 day
23	W	6 days	16,21	ส 31/1/58	พ 5/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days



รูปที่ 3.18 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 4

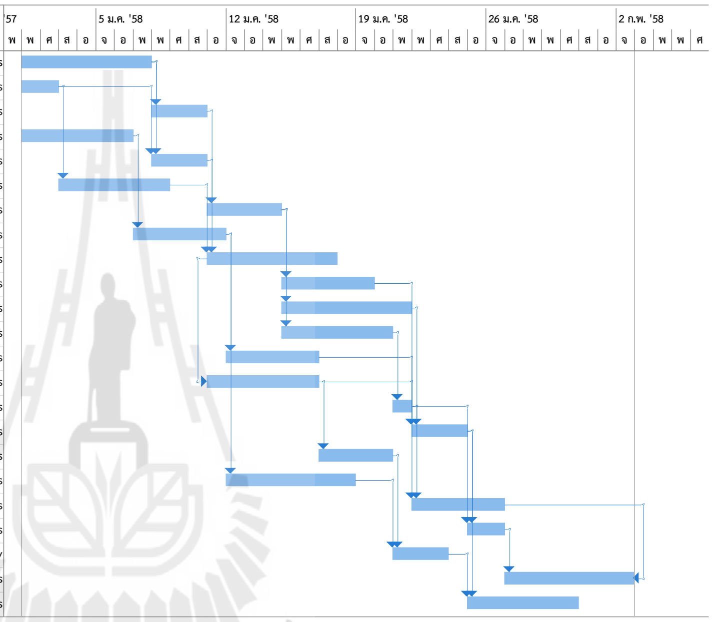
- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม A-D, I-N, และ S-V ทั้งสามคู่ความสัมพันธ์นี้กำหนดให้ใช้ตัวเลือกที่ 2 คือไม่มีความสัมพันธ์กัน, รูปแบบ Start-to-Start, และรูปแบบ Finish-to-Finish ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s) Option#1 1	2	3	Option#2 1	2	3	X_{ihm} Option#1 1	2	3	Option#2 1	2	3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	0	7	0	0
B	2	4													0	0	0	2	6	8	6	0
C	3	6	A												0	7	7	10	7	10	0	0
D	6	5	A			NO:A			0			1			0	7	0	6	5	11	5	0
E	3	2	A	B											0	7	7	10	11	14	4	0
F	6	10	B												0	2	2	8	8	14	6	2
G	4	6	C												0	10	10	14	10	14	0	0
H	5	4	D												0	13	6	11	11	16	5	0
I	7	7	E	F											0	10	10	17	14	21	4	0
J	5	11	G												0	14	14	19	23	28	9	2
K	7	3	G												0	14	14	21	14	21	0	0
L	6	2	G												0	14	14	20	17	23	3	0
M	5	10	H												0	18	11	16	16	21	5	5
N	6	6	I			SS:I			0			1			0	17	10	16	14	20	4	0
O	1	12	L												0	20	20	21	23	24	3	0
P	3	8	K	M	N										0	23	21	24	21	24	0	0
Q	4	5	N												0	23	16	20	20	24	4	0
R	7	5	H												0	18	11	18	17	24	6	2
S	5	8	J	O											0	21	21	26	28	33	7	7
T	2	3	O	P											0	26	24	26	24	26	0	0
U	3	3	Q	R											0	27	20	23	24	27	4	1
V	7	6	S	T		FF:S			0			1			0	28	26	33	26	33	0	0
W	6	5	P	U											0	30	24	30	27	33	3	3



รูปที่ 3.19 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 5

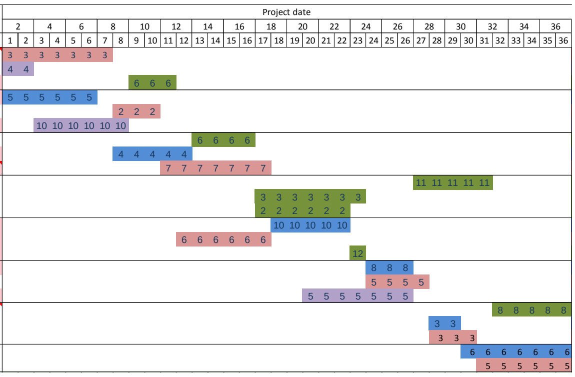
ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	พ 7/1/58	พ 8/1/58	6 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
4	D	6 days		พ 1/1/58	อ 6/1/58	อ 6/1/58	อ 11/1/58	5 days	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	จ 12/1/58	พ 14/1/58	4 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	6 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	อ 11/1/58	พ 14/1/58	0 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 7/1/58	อ 11/1/58	จ 12/1/58	ศ 16/1/58	5 days	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	พ 15/1/58	พ 21/1/58	4 days	0 days
10	J	5 days	7	พ 15/1/58	จ 19/1/58	ส 24/1/58	พ 28/1/58	9 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	พ 15/1/58	พ 21/1/58	0 days	0 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	3 days	0 days
13	M	5 days	8	จ 12/1/58	ศ 16/1/58	ส 17/1/58	พ 21/1/58	5 days	5 days
14	N	6 days	9SS	อ 11/1/58	ศ 16/1/58	พ 15/1/58	อ 20/1/58	4 days	0 days
15	O	1 day	12	พ 21/1/58	พ 21/1/58	ส 24/1/58	ส 24/1/58	3 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	พ 22/1/58	ส 24/1/58	พ 22/1/58	ส 24/1/58	0 days	0 days
17	Q	4 days	14	ส 17/1/58	อ 20/1/58	พ 21/1/58	ส 24/1/58	4 days	0 days
18	R	7 days	8	จ 12/1/58	อ 18/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	6 days	2 days
19	S	5 days	10,15	พ 22/1/58	จ 26/1/58	พ 29/1/58	จ 2/2/58	7 days	7 days
20	T	2 days	15,16	อ 25/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	จ 26/1/58	0 days	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 21/1/58	ศ 23/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	4 days	1 day
22	V	7 days	19FF,20	อ 27/1/58	จ 2/2/58	อ 27/1/58	จ 2/2/58	0 days	0 days
23	W	6 days	16,21	อ 25/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	จ 2/2/58	3 days	3 days



รูปที่ 3.20 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 5

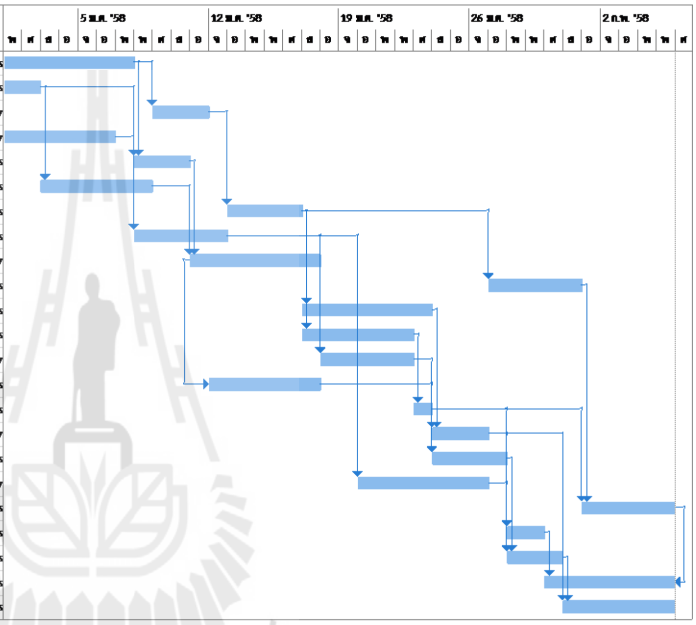
- ผลการคำนวณค่าเวลาของแผนงานของโจทย์ขนาดใหญ่กับชุดคำตอบที่ 2 ซึ่งกำหนดให้ความสัมพันธ์เป็นแบบ Finish-to-Start ทั้งหมด ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม A-D, I-N, และ S-V ทั้งสามคู่ความสัมพันธ์นี้กำหนดให้ใช้ตัวเลือกที่ 2 คือไม่มีความสัมพันธ์กัน, รูปแบบ Start-to-Start, และรูปแบบ Finish-to-Finish ตามลำดับ นอกจากนี้ยังกำหนดให้บางกิจกรรมมีระยะเลื่อนของเวลาเริ่ม ได้แก่ กิจกรรม C, G, H, J, M, N, Q, R, และ T มีระยะเลื่อนเท่ากับ 1, 1, 1, 10, 5, 1, 6, 7, และ 1 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาที่ได้จากแบบจำลองและโปรแกรมสำเร็จรูปพบว่าเหมือนกันทุกประการ แสดงในรูปข้างล่าง

Activity	Duration (periods)	Resource (Units)	Predecessor(s)						X_{ihm}						Schedule time							
			Option#1			Option#2			Option#1			Option#2										
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Shift	ES	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A	7	3													0	0	0	7	3	10	3	0
B	2	4													0	0	0	2	9	11	9	0
C	3	6	A												1	7	8	11	10	13	2	1
D	6	5	A			NO:A			0			1			0	7	0	6	8	14	8	1
E	3	2	A	B											0	7	7	10	14	17	7	0
F	6	10	B												0	2	2	8	11	17	9	2
G	4	6	C												1	10	12	16	13	17	1	0
H	5	4	D												1	13	7	12	14	19	7	5
I	7	7	E	F											0	10	10	17	17	24	7	1
J	5	11	G												10	14	26	31	26	31	0	0
K	7	3	G												0	14	16	23	17	24	1	0
L	6	2	G												0	14	16	22	20	26	4	0
M	5	10	H												5	18	17	22	19	24	2	1
N	6	6	I			SS:I			0			1			1	17	11	17	17	23	6	6
O	1	12	L												0	20	22	23	26	27	4	4
P	3	8	K	M	N										0	23	23	26	24	27	1	1
Q	4	5	N												6	23	23	27	23	27	0	0
R	7	5	H												7	18	19	26	20	27	1	1
S	5	8	J	O											0	21	31	36	31	36	0	0
T	2	3	O	P											1	26	27	29	27	29	0	0
U	3	3	Q	R											0	27	27	30	27	30	0	0
V	7	6	S	T		FF:S			0			1			0	28	29	36	29	36	0	0
W	6	5	P	U											0	30	30	36	30	36	0	0



รูปที่ 3.21 แผนงานที่ได้จากแบบจำลองกับชุดคำตอบที่ 6

ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	อ 4/1/58	ส 10/1/58	3 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ส 10/1/58	อ 11/1/58	9 days	0 days
3	C	3 days	1	ศ 9/1/58	อ 11/1/58	อ 11/1/58	อ 13/1/58	2 days	1 day
4	D	6 days		พ 1/1/58	อ 6/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	8 days	1 day
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 15/1/58	ส 17/1/58	7 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	จ 12/1/58	ส 17/1/58	9 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 13/1/58	ศ 16/1/58	พ 14/1/58	ส 17/1/58	1 day	0 days
8	H	5 days	4	พ 8/1/58	จ 12/1/58	พ 15/1/58	จ 19/1/58	7 days	5 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	7 days	1 day
10	J	5 days	7	อ 27/1/58	ส 31/1/58	อ 27/1/58	ส 31/1/58	0 days	0 days
11	K	7 days	7	ส 17/1/58	ศ 23/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	1 day	0 days
12	L	6 days	7	ส 17/1/58	พ 22/1/58	พ 21/1/58	จ 26/1/58	4 days	0 days
13	M	5 days	8	อ 18/1/58	พ 22/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	2 days	1 day
14	N	6 days	9SS	จ 12/1/58	ส 17/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	6 days	6 days
15	O	1 day	12	ศ 23/1/58	ศ 23/1/58	อ 27/1/58	อ 27/1/58	4 days	4 days
16	P	3 days	11,13,14	ส 24/1/58	จ 26/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	1 day	1 day
17	Q	4 days	14	ส 24/1/58	อ 27/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
18	R	7 days	8	อ 20/1/58	จ 26/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	1 day	1 day
19	S	5 days	10,15	อ 1/2/58	พ 5/2/58	อ 1/2/58	พ 5/2/58	0 days	0 days
20	T	2 days	15,16	พ 28/1/58	พ 29/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	0 days	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	0 days	0 days
22	V	7 days	19FF,20	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days
23	W	6 days	16,21	ส 31/1/58	พ 5/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days



รูปที่ 3.22 แผนงานที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปกับชุดคำตอบที่ 6

จากการทดสอบเปรียบเทียบอ้างอิงผลการคำนวณจากสมการของแบบจำลองกับโปรแกรมสำเร็จรูปด้วยชุดคำตอบต่างๆทั้ง 6 ชุดที่เน้นการคำนวณกับรูปแบบความสัมพันธ์แบบต่างๆ และการมีระยะเลื่อน ทำให้เห็นได้ว่าสมการคำนวณแผนงานสำหรับแบบจำลองที่มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์สามารถให้ผลลัพธ์แผนงานที่ถูกต้องอย่างสม่ำเสมอในทุกกรณี ค่าเวลาต่างๆของกิจกรรม ได้แก่ ES, ST, EF, FT, LS, LF, TF, และ FF มีค่าที่ถูกต้องตรงกันเสมอ ทั้งนี้การป้อนค่าระยะเลื่อน (shifting time) ของเวลาเริ่มของกิจกรรมลงในโปรแกรมสำเร็จรูปต้องทำโดยการกำหนดข้อจำกัดด้านเวลา (time constraint) ของกิจกรรมเป็นแบบ Start-No-Earlier-Than กับวันเริ่มที่อ้างอิงที่สอดคล้องกับระยะเลื่อนนั้นๆ ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะพร้อมสำหรับการนำไปทดสอบในประเด็นถัดๆไป

3.6.2 ประเด็นที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ

- การทดสอบในประเด็นที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลคำตอบที่ได้จากกำหนดเงื่อนไขของการหยุดค้นหาต่างๆกัน โดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือแบบกำหนดด้วยจำนวน trials และกำหนดด้วยความก้าวหน้าภายในจำนวน trials ซึ่งในแต่ละลักษณะดังกล่าวจะมีชุดทดสอบอย่างละ 3 ชุด เรียงจากจำนวน trials น้อยไปหามาก

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.1 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยจำนวน trials = 25,000 ซึ่งถือว่าน้อยที่สุด จึงควรให้คำตอบที่แย่กว่าอีก 2 ชุดถัดไป ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ในตารางจะแสดงค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์สุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 5 นาที

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 10 ให้ค่า M_X = 11248

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11389 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_B มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือ ใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ค่าตัวแปร X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง X_{DA1} เกือบทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Start ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

ตารางที่ 3.2 ผลคำตอบของการทดสอบชุดที่ 2.1

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
2.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	1	0	1	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	N/A
S_D	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_E	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	7	1	0	0	4	0	1	0	0	1	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	3	0	2	3	1	0	0	2	0	3	0	0	1	0	3	0	2	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	1	2	N/A
S_H	4	2	0	1	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	2	1	2	0	0	1	0	0	0	3	0	0	2	0	0	1	N/A
S_I	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	5	0	0	0	1	0	0	6	5	0	0	5	0	0	1	0	0	N/A
S_J	10	9	1	9	0	9	2	10	9	12	9	12	12	10	11	9	12	9	12	11	10	9	10	8	10	11	12	11	11	10	N/A
S_K	2	0	1	1	0	0	2	0	0	1	0	2	2	0	1	0	2	0	2	0	1	0	1	0	0	0	2	0	1	1	N/A
S_L	1	2	1	0	0	0	3	3	0	2	0	4	4	3	3	0	4	1	2	0	3	2	1	1	3	0	4	2	4	0	N/A
S_M	0	6	0	7	0	0	0	0	0	1	8	0	2	0	0	7	0	0	0	6	1	1	0	2	0	0	0	0	7	0	N/A
S_N	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0	1	0	0	0	0	1	5	0	4	5	0	N/A
S_O	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	1	1	1	2	3	0	0	1	0	0	1	1	2	0	2	N/A
S_P	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	N/A
S_Q	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	0	1	0	1	0	0	N/A
S_R	1	4	9	4	9	8	9	0	0	6	1	5	7	0	5	5	5	7	0	6	0	0	9	3	0	6	5	8	0	1	N/A
S_S	1	0	3	1	3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	N/A
S_T	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	N/A
S_U	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0	3	0	1	0	0	1	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
S_W	0	3	0	3	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.03
X_{NI1}	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.27
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11542	11354	11616	11344	11750	11396	11576	11322	11342	11248	11386	11252	11292	11306	11312	11346	11252	11350	11416	11250	11430	11486	11498	11382	11306	11446	11252	11296	11268	11654	11389
M_Y	12353	12114	11377	11923	11495	12265	11347	11948	12088	12143	11877	12139	12099	12132	12181	12067	12139	12127	12103	12059	12109	12426	12216	12012	12132	11609	12139	12087	12013	12504	12041
MRD	25	25	27	25	27	25	27	25	24	23	24	25	25	25	25	25	25	25	25	22	25	25	24	25	25	28	25	23	22	25	24.9
RRH	28	35	26	37	36	25	28	27	23	27	40	29	33	26	24	44	29	21	36	28	20	20	38	40	26	28	29	21	31	42	29.9
RID	73	76	54	102	79	92	70	70	85	76	115	100	124	79	100	112	100	100	105	62	61	63	79	74	79	80	100	92	109	110	87.4

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.2 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยจำนวน trials = 50,000 ซึ่งเป็นจำนวนที่อยู่ตรงกลางของชุดทดสอบทั้งสาม จึงควรให้คำตอบที่ดีกว่าชุดแรกแต่แย่กว่าอีกชุดถัดไป ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ในตารางจะแสดงค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์สุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 10 นาที

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 23 ให้ค่า M_X = 11208

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11368 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_B และ S_V มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ค่าตัวแปร X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง X_{DA1} เกือบทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Start ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- แนวโน้มของค่าคำตอบของชุดทดสอบที่ 2.2 นี้ใกล้เคียงกับชุดที่ 2.1 มาก และมีค่าเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.3 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.2

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
2.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_D	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_E	0	0	0	1	1	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	N/A
S_G	0	0	0	1	1	2	0	2	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	3	0	0	3	0	1	1	0	0	1	N/A
S_H	2	2	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	7	1	0	2	0	0	1	0	7	6	0	1	7	N/A
S_I	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	6	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	3	0	0	N/A
S_J	12	11	11	10	10	10	12	10	12	1	10	10	12	10	11	12	12	12	11	11	8	12	12	9	0	11	11	12	12	11	N/A
S_K	1	0	1	1	0	1	1	1	2	1	0	0	1	0	1	2	1	1	2	1	0	2	2	0	3	2	1	1	2	2	N/A
S_L	0	1	4	0	3	1	2	0	5	2	3	1	5	0	1	0	2	3	4	3	1	5	0	0	2	0	2	2	4	0	N/A
S_M	0	1	0	0	0	4	1	0	1	0	0	0	0	7	0	1	1	0	7	2	3	1	0	0	8	1	0	0	1	0	N/A
S_N	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	7	0	0	0	0	7	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	N/A
S_O	5	0	0	1	0	2	0	2	0	0	0	2	0	2	0	4	0	0	0	1	0	0	2	1	4	4	0	3	1	2	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_Q	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	6	0	6	0	0	0	N/A
S_R	1	6	6	0	0	6	6	1	0	9	0	6	1	5	4	0	6	2	3	7	4	0	9	1	8	0	2	9	6	2	N/A
S_S	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	0	N/A
S_T	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	N/A
S_U	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.07
X_{NI1}	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.17
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11442	11308	11400	11306	11306	11232	11248	11654	11404	11588	11346	11342	11238	11328	11346	11348	11248	11422	11350	11304	11294	11332	11208	11638	11514	11466	11442	11222	11292	11464	11368
M_Y	12165	12185	12199	12061	12132	12058	12143	12504	12201	11389	12082	11953	12020	12010	11876	12093	12143	12194	11958	12141	11952	12165	12151	12540	11375	12171	12194	12146	12119	12296	12087
MRD	23	23	25	23	25	22	23	25	25	27	25	25	22	25	23	25	23	24	25	25	25	25	22	25	24	25	23	23	25	24	24.1
RRH	26	25	28	23	26	29	27	42	33	23	22	27	22	43	20	30	27	43	40	28	24	34	23	37	29	38	34	23	37	37	30.0
RID	96	90	102	85	79	109	76	110	91	54	76	105	81	112	97	104	76	97	120	100	54	91	73	98	75	96	93	84	124	90	91.3

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.3 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยจำนวน trials = 100,000 ซึ่งเป็นจำนวนที่มากที่สุดของชุดทดสอบทั้งสาม จึงควรให้คำตอบที่ดีกว่าสองชุดแรก ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 20 นาที

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 8 ให้ค่า M_X = 11188

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11364 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_D และ S_V มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดย

เฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ค่าตัวแปร X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง X_{DA1} เกือบทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Start ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- แนวโน้มของค่าคำตอบของชุดทดสอบที่ 2.3 นี้ใกล้เคียงกับชุดที่ 2.1 และ 2.2 มาก และมีค่าเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.3

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
2.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
S_B	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_C	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	2	2	0	0	0	0	1	1	0	N/A
S_D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_E	0	1	7	0	0	1	0	0	6	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	N/A
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_G	3	1	0	0	2	0	2	1	2	2	1	3	0	0	1	2	0	0	2	2	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	N/A
S_H	0	0	0	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	N/A
S_I	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	4	2	6	N/A
S_J	9	9	11	12	9	12	9	10	9	0	11	9	11	11	10	9	12	11	9	9	8	0	8	9	11	12	12	11	11	12	N/A
S_K	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	2	N/A
S_L	0	0	1	0	0	5	1	0	2	0	0	0	1	1	0	0	5	0	0	0	1	0	1	2	0	5	2	1	5	0	N/A
S_M	0	0	0	0	0	0	7	5	0	0	5	0	0	0	8	0	0	0	0	5	8	0	8	6	7	0	1	0	0	1	N/A
S_N	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	N/A
S_O	0	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	0	0	5	0	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	4	N/A
S_P	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
S_Q	0	0	0	7	0	0	0	6	0	0	6	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	1	0	4	1	0	2	0	0	N/A
S_R	1	0	0	2	5	0	0	7	0	9	8	2	8	9	6	5	0	8	5	7	5	9	1	3	8	0	6	9	8	0	N/A
S_S	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	N/A
S_T	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	N/A
S_U	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	3	0	0	1	0	1	4	0	6	4	0	0	0	0	1	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
X_{DA1}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07
X_{NI1}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0.2
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11640	11374	11452	11356	11312	11262	11424	11188	11492	11690	11228	11630	11302	11258	11266	11312	11238	11418	11312	11304	11342	11720	11430	11314	11276	11238	11248	11248	11302	11348	11364
M_Y	12423	12041	12157	12186	12028	11935	11629	12144	12307	11513	11997	12458	12275	12188	11877	12028	11964	12377	12028	12071	11783	11500	11923	12003	12236	11964	12143	12230	12209	12093	12057
MRD	25	24	25	23	24	22	24	22	25	27	22	24	23	23	25	24	22	23	24	23	25	27	24	25	22	22	23	23	23	25	23.8
RRH	30	32	39	28	25	30	32	17	31	30	28	31	20	23	25	25	23	29	25	35	24	29	30	37	21	23	27	22	24	30	27.5
RID	89	87	104	83	100	90	68	46	97	55	109	95	64	88	81	100	82	104	100	104	75	57	61	76	57	82	76	83	99	104	83.9

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.4 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 10,000 trials ซึ่งเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดของชุดทดสอบทั้งสาม จึงควรให้คำตอบที่แย่กว่าอีกสองชุดถัดไป ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ในตารางจะแสดงค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์สุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 10 นาที แต่มีความแปรผันมาก บางครั้งก็มากบางครั้งก็น้อย
- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 15 ให้ค่า M_X = 11188
- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11454 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ไม่มีค่าตัวแปรใดเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร
- ค่าตัวแปร X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง X_{DA1} เกือบทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Start ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า
- แนวโน้มของค่าคำตอบของชุดทดสอบที่ 2.4 นี้ใกล้เคียงกับชุดที่ 2.1-2.3 มาก และมีค่าเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.4

Test no. 2.4	Solution of Runtime no.																														Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_B	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_C	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	N/A
S_D	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	0	1	1	1	3	0	0	0	0	1	1	1	2	1	0	0	0	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	N/A
S_H	0	0	3	0	7	0	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	8	2	0	0	N/A
S_I	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	6	N/A
S_J	11	10	3	9	10	9	12	10	11	12	10	0	9	10	10	11	1	9	10	9	0	12	6	9	12	11	2	12	9	11	N/A
S_K	0	0	2	0	2	0	1	1	0	2	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	3	2	1	0	2	1	3	2	1	0	N/A
S_L	4	3	2	1	0	0	2	2	4	5	2	2	2	3	0	4	1	0	0	1	2	4	3	0	5	1	0	5	1	3	N/A
S_M	6	1	1	1	1	7	1	0	6	0	6	0	8	0	6	1	0	6	2	0	7	0	0	8	1	0	0	0	1	0	N/A
S_N	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0	1	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	1	0	2	1	2	2	0	0	1	0	1	1	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_Q	4	0	5	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	N/A
S_R	6	0	6	0	0	0	6	5	0	5	7	9	0	5	8	0	9	1	7	1	0	5	4	7	0	9	1	5	0	0	N/A
S_S	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	3	3	0	0	2	0	0	0	0	0	5	0	1	0	N/A
S_T	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	N/A
S_U	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	N/A
S_V	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_W	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.07
X_{NI1}	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0.4
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_X	11244	11428	11772	11696	11508	11392	11248	11384	11314	11268	11270	11580	11428	11410	11188	11374	11616	11544	11400	11672	11750	11252	11696	11362	11404	11248	11876	11268	11722	11320	11454
M_Y	11999	12055	11650	12154	12133	12185	12143	12114	12192	12151	12100	11437	12106	11989	12124	12228	11377	11436	11947	12582	11398	12139	11537	12130	12201	12266	11616	12151	12380	11983	11997
MRD	25	25	26	25	25	24	23	24	25	25	25	27	24	25	22	25	27	24	24	25	27	25	27	25	25	23	30	25	25	22	25.0
RRH	20	23	27	31	38	27	27	32	28	29	31	22	30	28	18	31	26	30	30	33	28	29	27	37	33	14	29	29	38	29	28.5
RID	68	64	52	53	84	111	76	92	82	100	68	58	55	125	46	78	54	91	80	79	92	100	79	109	91	59	53	100	83	82	78.8

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.5 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 30,000 trials ซึ่งเป็นจำนวนที่อยู่ตรงกลางของชุดทดสอบทั้งสาม จึงควรให้คำตอบที่ดีกว่าชุดที่ผ่านมาแต่แย่กว่าอีกชุดถัดไป ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 30 นาที แต่มีความแปรผันมาก บางครั้งก็มากบางครั้งก็น้อย

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 5 ให้ค่า M_X = 11208

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11379 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามากและ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_D ค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ค่าตัวแปร X_{VS1} และ X_{DA1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Startตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- แนวโน้มของค่าคำตอบของชุดทดสอบที่ 2.5 นี้ยังคงใกล้เคียงกับชุดที่ 2.1-2.4 มาก และมีค่าเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.5

Test no. 2.5	Solution of Runtime no. 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Average
S_A	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	N/A
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_C	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	N/A
S_D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_E	6	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	N/A
S_F	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	3	1	0	1	N/A
S_H	0	1	6	0	0	0	0	8	0	0	0	2	7	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_I	0	0	0	0	0	0	4	0	4	0	0	0	0	6	1	0	5	6	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	4	N/A
S_J	12	0	9	12	11	2	11	12	11	2	11	9	12	12	9	9	12	12	10	10	11	11	11	10	9	11	8	0	11	10	N/A
S_K	2	0	1	2	1	0	1	3	0	2	0	2	0	2	0	1	1	2	0	0	3	0	1	2	2	0	0	1	0	0	N/A
S_L	5	3	0	5	4	1	0	0	0	3	3	2	4	5	0	2	5	5	0	0	3	1	3	3	2	4	0	1	4	4	N/A
S_M	0	6	2	1	7	4	0	0	0	0	0	5	1	1	0	7	0	1	0	5	8	2	1	8	7	0	7	0	0	0	N/A
S_N	1	0	0	0	5	0	1	0	1	0	6	0	0	0	4	2	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	2	0	0	0	1	4	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_P	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_Q	0	0	0	0	0	7	1	0	1	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	7	0	0	0	0	3	1	0	0	1	0	N/A
S_R	0	8	0	0	0	9	9	1	9	9	6	0	0	0	8	0	0	0	8	7	1	7	6	4	2	0	5	9	0	0	N/A
S_S	0	3	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	N/A
S_T	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	N/A
S_U	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	3	2	0	1	4	0	0	1	0	2	0	0	5	3	0	3	0	0	1	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_W	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{NI1}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0.17
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11378	11790	11532	11404	11208	11670	11262	11420	11274	11576	11308	11554	11436	11332	11410	11382	11238	11332	11352	11236	11238	11300	11304	11286	11378	11250	11304	11612	11280	11312	11379
M_Y	12096	11565	12114	12201	12037	11453	12275	12222	12254	11347	11896	11846	12197	12165	12202	11654	11985	12165	12398	12090	11978	12165	12161	11864	11835	12027	11990	11434	12048	12106	11992
MRD	25	32	25	25	22	29	23	25	23	27	23	25	25	25	25	24	22	25	23	22	22	23	25	25	24	22	25	27	22	23	24.4
RRH	33	29	32	33	25	32	15	38	19	28	24	25	38	34	22	22	24	34	20	26	29	28	31	25	11	18	28	25	18	21	26.2
RID	114	76	62	91	59	79	60	67	75	70	97	79	87	91	95	42	82	91	58	109	97	90	100	81	33	74	81	58	71	76	78.2

- ผลของการทดสอบชุดที่ 2.6 เมื่อกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบด้วยความก้าวหน้าของคำตอบขั้นต่ำ 0.1% ภายใน 50,000 trials ซึ่งเป็นจำนวนที่มากที่สุดของชุดทดสอบทั้งสาม จึงควรให้คำตอบที่ดีกว่าอีกสองชุดที่ผ่านมา ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime

- ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ Intel CORE i5 2.5 GHz. ระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบแต่ละ runtime ประมาณ 60 นาที แต่มีความแปรผันมาก บางครั้งก็มากบางครั้งก็น้อย

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 5 ให้ค่า M_x = 11220

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_x เฉลี่ย = 11338 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก S_R และ S_M ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_A, S_B, S_V ค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ค่าตัวแปร X_{VS1} และ X_{DA1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง และ X_{NI1} บ่อยครั้ง แสดงว่ารูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Finish-to-Finish และ Start-to-Startตามลำดับ ทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- แนวโน้มของค่าคำตอบของชุดทดสอบที่ 2.6 นี้ก็ยังคงใกล้เคียงกับชุดที่ 2.1-2.5 มาก และมีค่าเฉลี่ยต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3.7 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 2.6

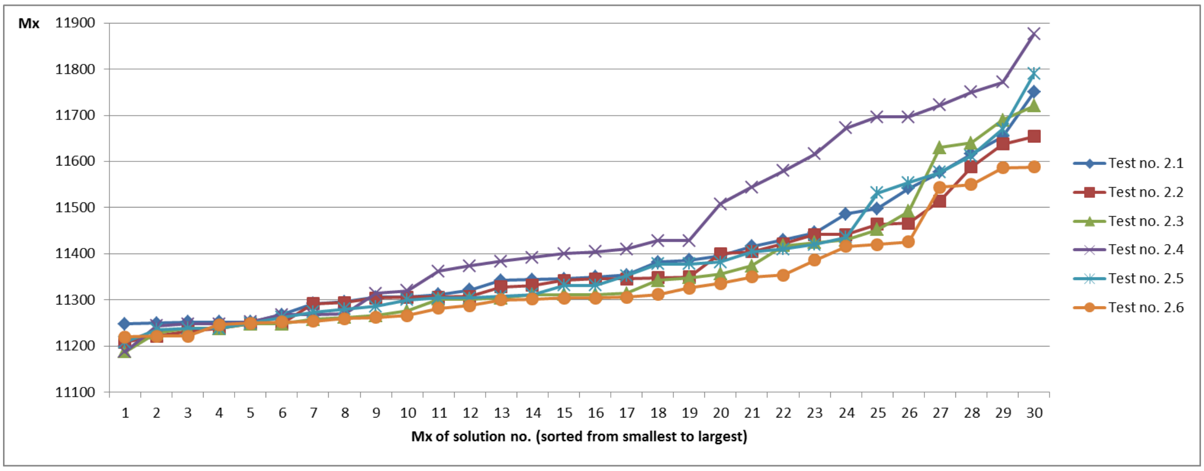
Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
2.6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	N/A
S_D	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	4	N/A
S_E	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	0	0	0	0	3	1	0	2	3	0	2	1	1	0	3	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	1	N/A
S_H	0	0	2	0	7	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8	1	0	1	N/A
S_I	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	5	0	0	0	0	N/A
S_J	12	11	12	11	12	9	10	11	9	9	12	9	11	10	12	9	0	10	11	11	11	10	11	11	11	11	12	12	8	9	N/A
S_K	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0	2	0	2	2	2	0	0	3	0	1	2	0	0	0	0	2	3	0	0	0	N/A
S_L	2	2	4	4	1	2	3	0	1	2	2	0	0	2	5	2	1	3	4	3	0	3	4	1	0	0	0	5	1	1	N/A
S_M	3	7	0	0	0	6	0	7	8	5	0	0	0	8	1	1	0	7	7	2	8	5	0	2	7	0	0	6	8	0	N/A
S_N	0	5	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	1	0	4	0	0	2	1	0	3	0	2	1	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	4	2	4	0	0	1	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_Q	0	1	0	1	3	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0	1	4	N/A
S_R	8	0	5	0	0	4	5	0	5	6	0	5	1	4	0	0	9	0	0	7	1	6	1	7	0	0	1	0	1	1	N/A
S_S	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	N/A
S_T	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	N/A
S_U	0	1	0	0	1	0	0	0	4	2	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	2	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3	1	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{NI1}	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0.37
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_X	11288	11220	11252	11250	11426	11354	11350	11246	11306	11260	11416	11312	11544	11304	11336	11586	11588	11282	11254	11304	11222	11222	11266	11300	11262	11302	11420	11326	11386	11550	11338
M_Y	12103	12063	12139	12027	12302	12114	12007	12089	11951	12051	12115	12028	12261	11847	12171	12327	11413	11796	12137	12141	12119	11967	12056	12165	12089	12025	12222	12129	11831	12100	12060
MRD	23	22	25	22	23	25	25	24	25	23	25	24	25	25	25	25	27	22	25	25	22	22	22	23	25	23	25	25	24	25	24.0
RRH	27	23	29	18	31	35	22	22	37	27	40	25	32	33	35	42	19	23	22	28	27	33	18	28	22	26	38	34	36	26	28.6
RID	110	53	100	74	75	76	105	59	89	110	106	100	104	99	91	88	49	92	59	100	62	109	71	90	61	88	67	126	70	56	84.6

- ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 6 ชุดในตารางข้างล่างพบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน คือมักเลือกที่จะใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 คือแบบที่เป็น No-relationship, Start-to-Start, และ Finish-to-Finish ทั้ง 6 ชุดมีค่าเฉลี่ยของดัชนีที่ใช้ประเมินต่างกันเล็กน้อย โดยไม่อาจกล่าวได้ว่าชุดการทดสอบใดให้ผลคำตอบที่ดีเด่นชัดกว่าชุดอื่นๆ

ตารางที่ 3.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 6 ชุด (ชุดที่ 2.1 - 2.6)

	Average Results of Test no.					
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
S_A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0
S_B	0	0	N/A	N/A	N/A	0
S_C	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_D	N/A	N/A	0	N/A	0	N/A
S_E	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_F	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_G	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_H	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_I	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_J	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_K	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_M	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_N	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_O	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_P	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_Q	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_R	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_T	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_U	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S_V	N/A	0	0	N/A	N/A	0
S_W	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
X_{DA1}	0	0.1	0.1	0.1	0	0
X_{NI1}	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0
M_x	**11389**	**11368**	**11364**	**11454**	**11379**	**11338**
M_Y	**12041**	**12087**	**12057**	**11997**	**11992**	**12060**
MRD	24.9	24.1	23.8	25.0	24.4	24.0
RRH	29.9	30.0	27.5	28.5	26.2	28.6
RID	87.4	91.3	83.9	78.8	78.2	84.6

- หากนำค่าดัชนี M_X ของคำตอบที่ได้จากชุดทดสอบต่างๆมาจัดเรียงค่าจากน้อยไปมาก แล้วนำมาวาดกราฟ จะได้ดังรูปกราฟข้างล่าง พบว่าผลคำตอบจากชุดทดสอบที่ 2.4 ให้ค่าดัชนีที่สูง (แย่) กว่าชุดอื่นๆ และชุดทดสอบที่ 2.6 จะใช้ค่าดัชนีที่ต่ำ (ดี) กว่าชุดอื่นๆ เล็กน้อย



รูปที่ 3.23 แสดงจุดค่า M_x ของคำตอบต่างๆที่ได้จากการทดสอบทั้ง 6 ชุด

- ผลการทดสอบ ANOVA Single Factor กับค่าดัชนี M_x ของคำตอบที่ได้จากชุดทดสอบทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับ α=0.05 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าผลของชุดทดสอบที่ 2.4 มีความแตกต่างจากกลุ่มอย่างเห็นได้ชัด จึงทำการตัดผลของชุดทดสอบที่ 2.4 ออกจากกลุ่มแล้วทำการวิเคราะห์ ANOVA ของผลของชุดทดสอบที่เหลือทั้ง 6 ชุดอีกครั้ง

SUMMARY	All 6 Test sets					
Test no.	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*		
2.1	30	341670	11389.0	17198.0		
2.2	30	341032	11367.7	13876.9		
2.3	30	340924	11364.1	20168.0		
2.4	30	343634	11454.5	36892.3		
2.5	30	341358	11378.6	20299.4		
2.6	30	340134	11337.8	11576.4		
ANOVA	Anova: Single Factor					
Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
Between Groups	233650.8	5	46730.17	2.336296	0.043955	2.266062
Within Groups	3480317	174	20001.82			
Total	3713968	179				
Interpreting ANOVA Test Result: Reject Null Hypothesis because P-value < 0.05 (Means are different)						

รูปที่ 3.24 ผลการทดสอบด้วย ANOVA Single Factor กับผลของชุดทดสอบทั้ง 6 ชุด

- ผลการทดสอบ ANOVA Single Factor กับค่าดัชนี M_x ของคำตอบที่ได้จากชุดทดสอบทั้ง 5 ชุดที่ไม่รวมชุดที่ 2.4 สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของคำตอบที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับ α=0.05 ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบจึงควรทำให้ได้ผลคำตอบดีเหมือนกันในเงื่อนไขทั้ง 5 แบบ

SUMMARY	*Excluding Test no. 2.4						
Test no.	*Count*	*Sum*	*Average*	*Variance*			
2.1	30	341670	11389	17198			
2.2	30	341032	11367.73	13876.89			
2.3	30	340924	11364.13	20167.98			
2.5	30	341358	11378.6	20299.35			
2.6	30	340134	11337.8	11576.37			
ANOVA	Anova: Single Factor						
Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*	
Between Groups	44367.84	4	11091.96	0.667237	0.615734	2.434065	
Within Groups	2410439	145	16623.72				
Total	2454807	149					
Interpreting ANOVA Test Result: Accept Null Hypothesis because P-value > 0.05 (Means are the same)							

รูปที่ 3.25 ผลการทดสอบด้วย ANOVA Single Factor เมื่อตัดชุดทดสอบที่ 2.4

- เงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบที่เลือกใช้สำหรับการทดสอบในประเด็นอื่นๆถัดไป จึงกำหนดให้เป็นแบบจำนวน trials = 50,000 ที่ทดสอบแล้วว่าได้ผลดีเทียบเท่ากับแบบอื่น (ที่ไม่ใช่เงื่อนไขของชุดทดสอบที่ 2.4) แต่มีข้อดีที่ใช้ระยะเวลาสั้นเพียงประมาณ 10 นาที และอาจกล่าวได้ว่าการค้นหาคำตอบที่นานเกินไปก็ไม่ได้ช่วยให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ
- คำตอบที่ได้จากเงื่อนไขการหยุดด้วยจำนวน trials = 50,000 นี้จึงเหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ ที่น่าจะเพียงพอที่ทำให้การ optimization เกิด convergence ได้ และจึงควรมากเพียงพอสำหรับโจทย์ปัญหาขนาดเล็กด้วย

3.6.3 ประเด็นที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป

- ผลการทดสอบชุดที่ 3.1 เป็นผลคำตอบในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดเล็กที่กำหนดให้แบบจำลองไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ (ใช้รูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start ทั้งหมด) ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ดังแสดงในตารางข้างล่างเป็นค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) มีค่า = 1 คงที่ตลอด รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์ก่อนสุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ส่วนคอลัมน์สุดท้ายแสดงค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project ซึ่งให้ค่าคำตอบที่คงที่คำตอบเดียว

- แผนงานเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรเป็นการจัดแผนงานแบบ As-Soon-As-Possible ตามความสัมพันธ์ปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด มีค่า M_X = 6237, *MRD* = 22, *RRH* = 10, และ *RID* = 13 (โดยโจทย์ขนาดเล็กนี้ในสภาวะอุดมคติที่ระดับการใช้ทรัพยากรสมดุลราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ย 15.0 units จะมีค่า M_X = 5625, *MRD* = 15, *RRH* = 0, และ *RID* = 0)

- ผลคำตอบจากแบบจำลองเหมือนเดิมหลายครั้ง มีคำตอบไม่หลากหลาย โดยเฉพาะทุกคำตอบให้ค่าดัชนี M_X เท่ากัน = 5971 และค่าดัชนี *MRD* เท่ากัน = 22 ดังนั้นแผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ให้ค่า M_X = 5971 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(5971-5625)/(6237-5625)] = 43.5%

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 5971 มีค่าตัวแปร S_i แต่ละตัวที่ซ้ำเดิมทุกครั้งหรือเกือบทุกครั้งไป โดยที่ S_D มักจะมีค่ามาก ส่วนอีกหลายตัวได้แก่ S_A, S_B, S_C, S_E, และ S_G มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง ดังนั้นจึงหมายถึงว่าแผนงานเริ่มต้นไม่มีความยืดหยุ่นในการปรับสมดุล

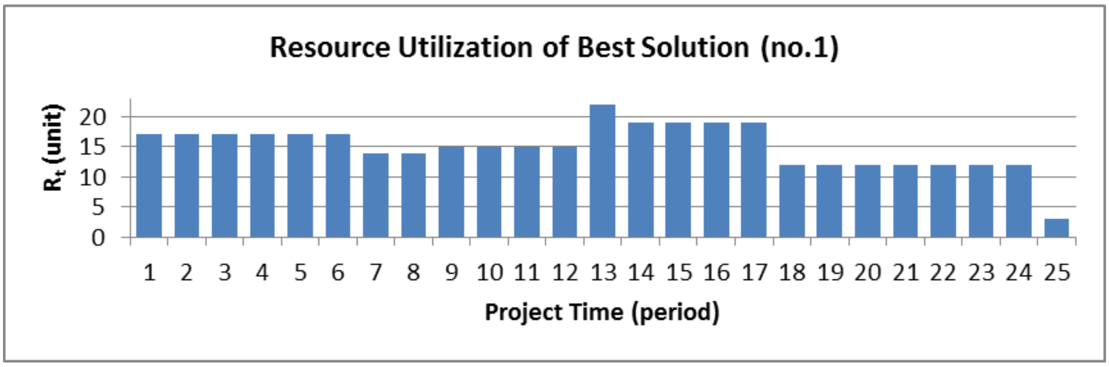
- ผลคำตอบจากโปรแกรมสำเร็จรูปมีคำตอบเดียวให้ค่าดัชนี M_X = 6057 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(6057-5625)/(6237-5625)] = 29.4%

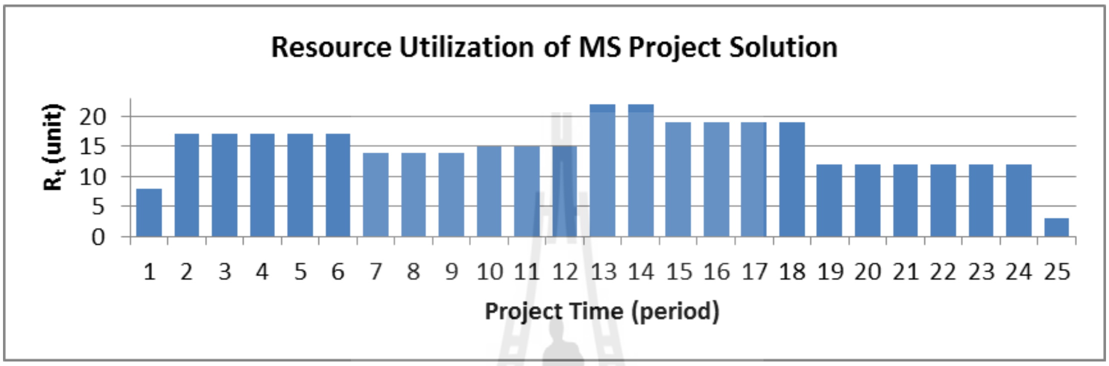
- คำตอบที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป โดยให้คำตอบที่มีระยะเลื่อนของกิจกรรม D มากกว่า

- เมื่อนำระดับการจัดสรรทรัพยากรของแผนงานผลลัพธ์ของโจทย์ขนาดเล็กที่ดีที่สุดที่จากแบบจำลองและของโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project มาแสดงด้วยแผนภาพแท่งเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปกราฟข้างล่าง

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 3.1

Test no.	Solution of Runtime no.																														Avera	MS Project
3.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	ge	Solution
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
S_C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_D	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	N/A	3
S_E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_F	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0
S_G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_H	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	N/A	0
X_{DB1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X_{GC1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X_{GH1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M_x	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	5971	6057
M_Y	4500	4500	4582	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4528	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4528	4500	4528	4500	4500	4500	4528	4528	4500	4528	4500	4500	4508.3	4650
MRD	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
RRH	3	3	19	3	3	3	3	3	3	3	3	10	3	3	3	3	3	3	10	3	10	3	3	3	10	10	3	10	3	3	4.93	3
RID	14	14	30	14	14	14	14	14	14	14	14	21	14	14	14	14	14	14	21	14	21	14	14	14	21	21	14	21	14	14	15.9	15





รูปที่ 3.26 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดเล็กจากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป

- ผลการทดสอบชุดที่ 3.2 เป็นผลคำตอบในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ที่กำหนดให้แบบจำลองไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ (ใช้รูปแบบความสัมพันธ์ Finish-to-Start ทั้งหมด) ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ดังแสดงในตารางข้างล่างเป็นค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) มีค่า = 1 คงที่ตลอด รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์ก่อนสุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ส่วนคอลัมน์สุดท้ายแสดงค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project ซึ่งให้ค่าคำตอบที่คงที่คำตอบเดียว

- แผนงานเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรเป็นการจัดแผนงานแบบ As-Soon-As-Possible ตามความสัมพันธ์ปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด มีค่า M_X = 13642, *MRD* = 37, *RRH* = 27, และ *RID* = 64 (โดยโจทย์ขนาดใหญ่นี้ในสภาวะอุดมคติที่ระดับการใช้ทรัพยากรสมดุลราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ย 17.4 units จะมีค่า M_X = 10955, *MRD* = 17.4, *RRH* = 0, และ *RID* = 0)

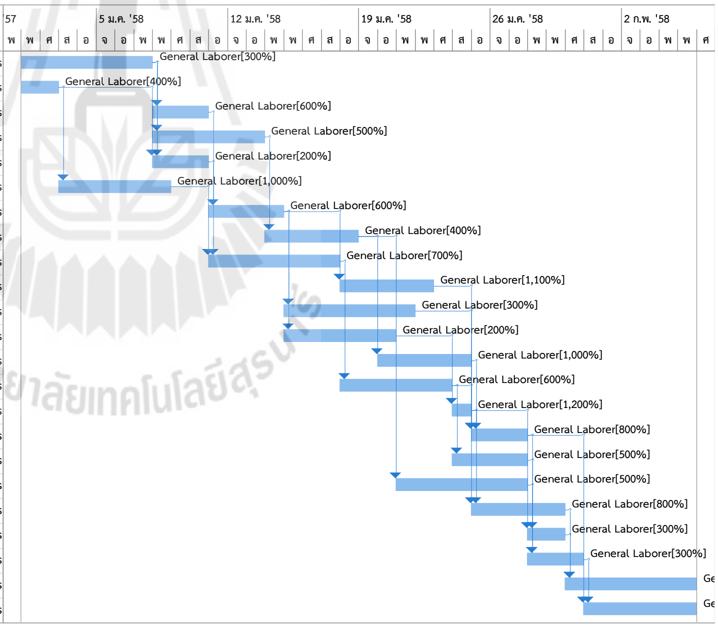
- ผลคำตอบจากแบบจำลองเหมือนเดิมในบางครั้ง และส่วนใหญ่ใกล้เคียงกันมาก แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 5 ให้ค่า M_X = 12520 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(12520-10955)/(13642-10955)] = 41.8%
- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 12548 มีค่าตัวแปร S_i แต่ละตัวที่ซ้ำเดิมทุกครั้งหรือเกือบทุกครั้งไป มี S_i หลายตัวที่มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง เช่น S_A, S_B, S_C, S_E, และ S_G โดยที่ S_L มักจะมีค่ามาก และ S_K มีค่ามากรองลงมา ดังนั้นจึงหมายถึงว่าแผนงานเริ่มต้นไม่มีความยืดหยุ่นในการปรับสมดุล
- ผลคำตอบจากโปรแกรมสำเร็จรูปมีคำตอบเดียวให้ค่าดัชนี M_X = 12964 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(12964-10955)/(13642-10955)] = 25.2%
- คำตอบที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป โดยให้คำตอบที่มีระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ แตกต่างกัน
- เมื่อนำระดับการจัดสรรทรัพยากรของแผนงานผลลัพธ์ของโจทย์ขนาดใหญ่ที่ดีที่สุดที่จากแบบจำลองและของโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project มาแสดงด้วยแผนภาพแท่งเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปกราฟข้างล่าง

ตารางที่ 3.10 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 3.2

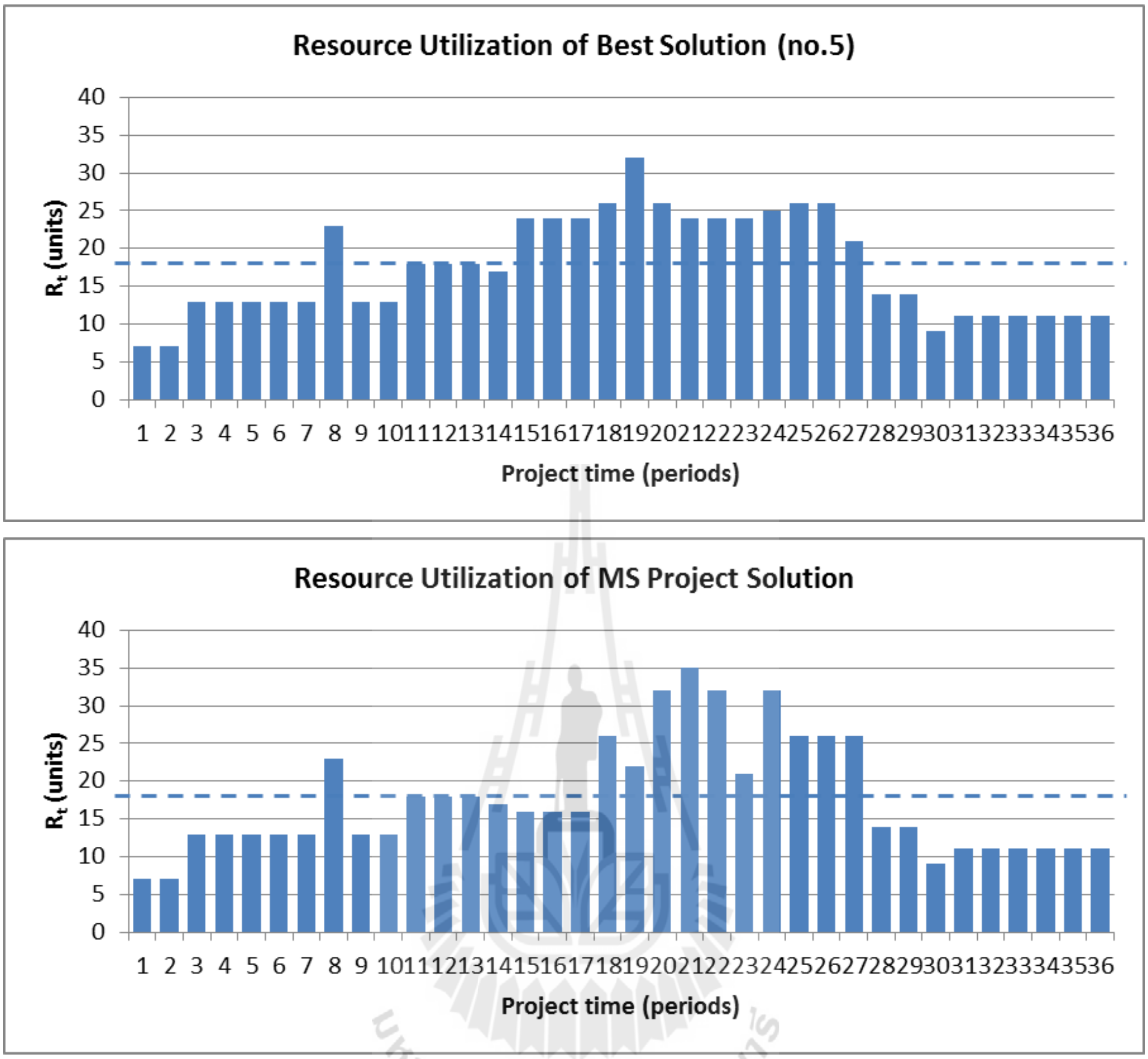
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Test no. 3.2	Solution of Runtime no.																														Average	MS Project Solution
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_D	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A	0
S_E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A	0
S_I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_J	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
S_K	0	1	0	0	3	1	0	0	3	1	0	0	0	0	2	0	0	3	0	0	3	0	3	1	0	2	2	3	0	0	N/A	0
S_L	3	0	3	3	0	0	3	3	0	0	3	3	3	2	0	3	3	0	3	2	0	3	2	1	3	0	0	1	3	3	N/A	0
S_M	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	N/A	1
S_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_O	0	2	0	0	3	2	0	0	3	3	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	3	0	1	1	0	3	3	2	0	0	N/A	3
S_P	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	N/A	0
S_Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_R	1	1	1	2	1	1	2	2	2	0	0	1	0	1	2	0	0	1	2	1	1	1	2	1	0	0	1	1	1	1	N/A	2
S_S	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	N/A	0
S_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{DA1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X_{NI1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X_{VS1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M_x	12532	12574	12532	12532	12520	12596	12532	12532	12520	12572	12554	12532	12554	12548	12532	12554	12554	12604	12532	12572	12520	12532	12536	12582	12604	12554	12532	12528	12532	12532	12548	12964
M_Y	11790	11763	11790	11775	11767	11848	11775	11775	11802	11825	11840	11790	11840	11778	11781	11840	11840	11781	11775	11766	11767	11740	11826	11775	11810	11846	11796	11779	11740	11790	11794	11954
MRD	32	33	32	32	32	33	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	36	32	33	32	32	32	33	32	32	32	32	32	32	32.3	35
RRH	20	26	20	22	15	19	22	22	18	13	10	20	10	23	21	10	10	20	22	27	15	17	20	26	20	10	20	15	17	20	18.3	29
RID	53	62	53	58	50	32	58	58	55	27	18	53	18	61	59	18	18	54	58	61	50	53	53	61	53	24	59	49	53	53	47.7	79

ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	ส 3/1/58	อ 4/1/58	2 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
4	D	6 days	1	พ 8/1/58	อ 13/1/58	พ 8/1/58	อ 13/1/58	0 days	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	จ 5/1/58	ส 10/1/58	2 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	อ 11/1/58	พ 14/1/58	0 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 14/1/58	อ 18/1/58	พ 14/1/58	อ 18/1/58	0 days	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	อ 11/1/58	ส 17/1/58	0 days	0 days
10	J	5 days	7	อ 18/1/58	พ 22/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	2 days	2 days
11	K	7 days	7	พ 15/1/58	พ 21/1/58	อ 18/1/58	ส 24/1/58	3 days	3 days
12	L	6 days	7	พ 15/1/58	อ 20/1/58	พ 15/1/58	อ 20/1/58	0 days	0 days
13	M	5 days	8	อ 20/1/58	ส 24/1/58	อ 20/1/58	ส 24/1/58	0 days	0 days
14	N	6 days	9	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	อ 18/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
15	O	1 day	12	ส 24/1/58	ส 24/1/58	ส 24/1/58	ส 24/1/58	0 days	0 days
16	P	3 days	11,13,14	อ 25/1/58	อ 27/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
17	Q	4 days	14	ส 24/1/58	อ 27/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
18	R	7 days	8	พ 21/1/58	อ 27/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
19	S	5 days	10,15	อ 25/1/58	พ 29/1/58	อ 25/1/58	พ 29/1/58	0 days	0 days
20	T	2 days	15,16	พ 28/1/58	พ 29/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	0 days	0 days
21	U	3 days	17,18	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	0 days	0 days
22	V	7 days	19,20	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days
23	W	6 days	16,21	ส 31/1/58	พ 5/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days



รูปที่ 3.27 แผนงานผลลัพธ์จากการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.28 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดใหญ่จากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป

3.6.4 ประเด็นที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป

- ผลการทดสอบชุดที่ 4.1 เป็นผลคำตอบในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดเล็กที่กำหนดให้แบบจำลองมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ดังแสดงในตารางข้างล่างเป็นค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์ก่อนสุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ส่วนคอลัมน์สุดท้ายแสดงค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project ซึ่งให้ค่าคำตอบที่คงที่คำตอบเดียว

- แผนงานเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรเป็นการจัดแผนงานแบบ As-Soon-As-Possible ตามความสัมพันธ์ปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด มีค่า M_X = 6237, *MRD* = 22, *RRH* = 10, และ *RID* = 13 (โดยโจทย์ขนาดเล็กนี้ในสภาวะอุดมคติที่ระดับการใช้ทรัพยากรสมดุลราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ย 15.0 units จะมีค่า M_X = 5625, *MRD* = 15, *RRH* = 0, และ *RID* = 0)

- ผลคำตอบจากแบบจำลองเหมือนเดิมหลายครั้ง มีคำตอบไม่หลากหลาย มีคำตอบให้ค่าดัชนี M_X เช่น = 5767 และ 5845 ดังนั้นแผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ให้ค่า M_X = 5767 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(5767-5625)/(6237-5625)] = 76.8%

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 5816 มีค่าตัวแปร S_i บางตัวที่ซ้ำเดิมทุกครั้งหรือเกือบทุกครั้งไป โดยที่ S_D มักจะมีค่ามาก ส่วนอีกหลายตัวได้แก่ S_A, S_B, S_C, และ S_G มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

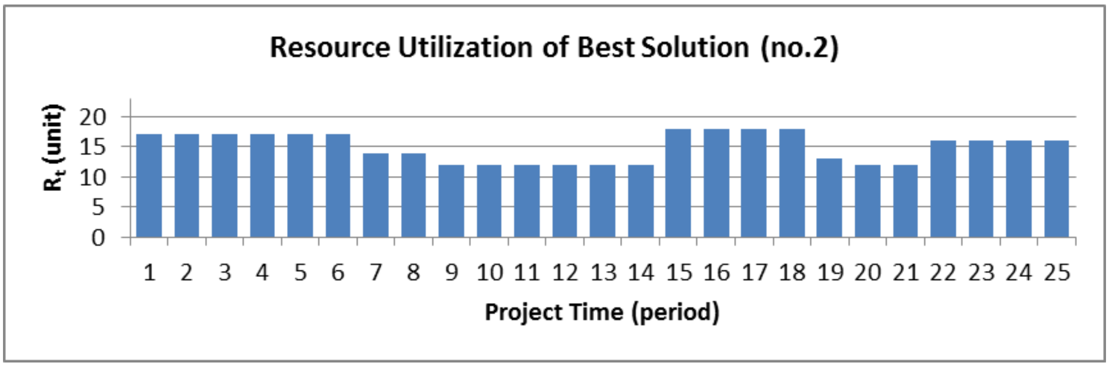
- ผลคำตอบจากโปรแกรมสำเร็จรูปมีคำตอบเดียวให้ค่าดัชนี M_X = 6223 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้นเพียง 1–[(6223-5625)/(6237-5625)] = 2.3%

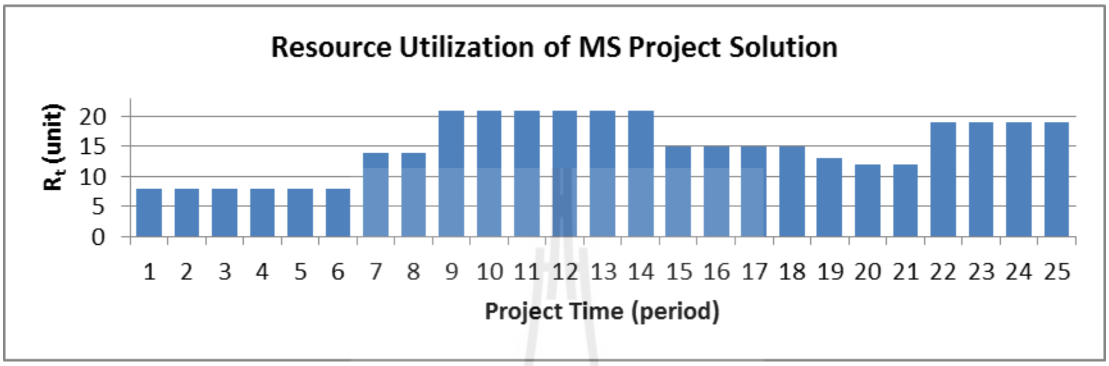
- คำตอบที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป โดยให้คำตอบที่มีระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆที่ไม่คล้ายคลึงกัน

- เมื่อนำระดับการจัดสรรทรัพยากรของแผนงานผลลัพธ์ของโจทย์ขนาดเล็กที่ดีที่สุดที่จากแบบจำลองและของโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project มาแสดงด้วยแผนภาพแท่งเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปกราฟข้างล่าง

ตารางที่ 3.11 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 4.1

Test no.	Solution of Runtime no.																														Avera	MS Project
4.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	ge	Solution
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
S_C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_D	10	6	10	10	10	6	10	0	6	6	10	10	10	4	10	10	10	0	6	10	0	6	10	6	10	4	10	0	10	4	N/A	0
S_E	0	6	0	0	0	6	0	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	6	6	0	6	0	0	0	6	0	0	N/A	0
S_F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	N/A	1
S_G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
S_H	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	5	2	3	2	3	2	2	2	2	2	8	2	8	3	3	2	4	4	N/A	2
X_{DB1}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0.23	0
X_{GC1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{GH1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_X	5845	5767	5845	5845	5845	5767	5845	5767	5767	5767	5845	5845	5845	5845	5845	5845	5845	5767	5767	5845	5767	5767	5845	5767	5845	5845	5845	5767	5845	5845	5816.4	6223
M_Y	4638	4826	4638	4610	4610	4826	4610	4826	4826	4826	4638	4638	4694	4610	4638	4610	4638	4826	4826	4610	4826	4826	4724	4826	4724	4638	4638	4826	4666	4666	4710.8	5342
MRD	22	18	22	22	22	18	22	18	18	18	22	22	22	22	22	22	22	18	18	22	18	18	22	18	22	22	22	18	22	22	20.5	21
RRH	19	9	19	12	12	9	12	9	9	9	19	19	12	12	19	12	19	9	9	12	9	9	10	9	10	19	19	9	19	19	13.1	7
RID	44	47	44	30	30	47	30	47	47	47	44	44	58	30	44	30	44	47	47	30	47	47	70	47	70	44	44	47	51	51	45	36





รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดเล็กจากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป

- การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่ 3.1 และ 4.1 แสดงในตารางข้างล่าง ในกรณีโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก ระหว่างแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับที่ไม่มี และเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป แสดงในตารางข้างล่าง พบว่าแบบจำลองที่มีทางเลือกให้คำตอบที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีทางเลือกอย่างมากทั้งรายคำตอบและโดยเฉลี่ย และแบบจำลองก็ยังให้คำตอบที่ดีกว่าการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทั้งรายคำตอบและโดยเฉลี่ยด้วย

ตารางที่ 3.12 การเปรียบเทียบแสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่ 3.1 และ 4.1 และจากโปรแกรมสำเร็จรูป

	All Finish-to-Start relationships without options							Relationships with options						
	5 Best Solutions					Average	MS Project	5 Best Solutions					Average	MS Project
M_x	5971	5971	5971	5971	5971	5971	6057	5767	5767	5767	5767	5767	5816	6223
MRD	22	22	22	22	22	22.0	22	18	18	18	18	18	20.5	21
RRH	3	3	3	3	3	4.9	3	9	9	9	9	9	13.1	7
RID	14	14	14	14	14	15.9	15	47	47	47	47	47	45.0	36

- ผลการทดสอบชุดที่ 4.2 เป็นผลคำตอบในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ที่กำหนดให้แบบจำลองมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ ทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime ดังแสดงในตารางข้างล่างเป็นค่าของตัวแปรคำตอบซึ่งแสดงถึงแผนงานที่ได้จาก runtime แต่ละครั้ง ประกอบด้วยระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ (S_i) และการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 1 (X_{ih1}) รวมทั้งค่าดัชนีสำหรับการประเมินแผนงานต่างๆ นอกจากนี้ในคอลัมน์

ก่อนสุดท้ายยังแสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรและดัชนีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ส่วนคอลัมน์สุดท้ายแสดงค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project ซึ่งให้ค่าคำตอบที่คงที่คำตอบเดียว

- แผนงานเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรเป็นการจัดแผนงานแบบ As-Soon-As-Possible ตามความสัมพันธ์ปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด มีค่า M_X = 13642, MRD = 37, RRH = 27, และ RID = 64 (โดยโจทย์ขนาดใหญ่นี้ในสภาวะอุดมคติที่ระดับการใช้ทรัพยากรสมดุลราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ย 17.4 units จะมีค่า M_X = 10955, MRD = 17.4, RRH = 0, และ RID = 0)

- แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 23 ให้ค่า M_X = 11208 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(11208-10955)/(13642-10955)] = 90.8%

- ผลคำตอบที่ได้มีค่า M_X เฉลี่ย = 11368 มีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_B และ S_V มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงมักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ทั้งสามตัวแปร

- ผลคำตอบจากโปรแกรมสำเร็จรูปมีคำตอบเดียวให้ค่าดัชนี M_X = 11618 หรือลดลงจากแผนงานเริ่มต้น 1–[(11618-10955)/(13642-10955)] = 75.3%

- คำตอบที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่ดีกว่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป โดยให้คำตอบที่มีระยะเลื่อนของกิจกรรมต่างๆ แตกต่างกัน

- เมื่อนำระดับการจัดสรรทรัพยากรของแผนงานผลลัพธ์ของโจทย์ขนาดใหญ่ที่ดีที่สุดที่จากแบบจำลองและของโปรแกรมสำเร็จรูป MS Project มาแสดงด้วยแผนภาพแท่งเปรียบเทียบกันจะได้ดังรูปกราฟข้างล่าง

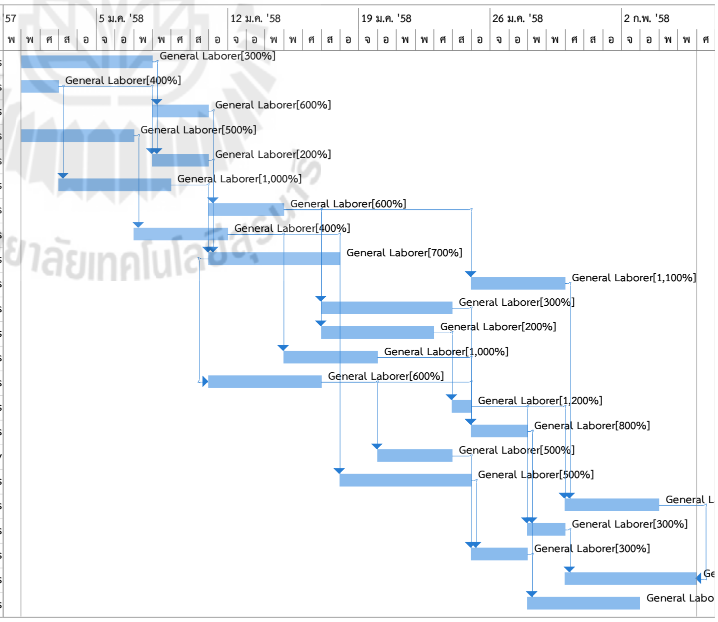
ตารางที่ 3.13 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 4.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

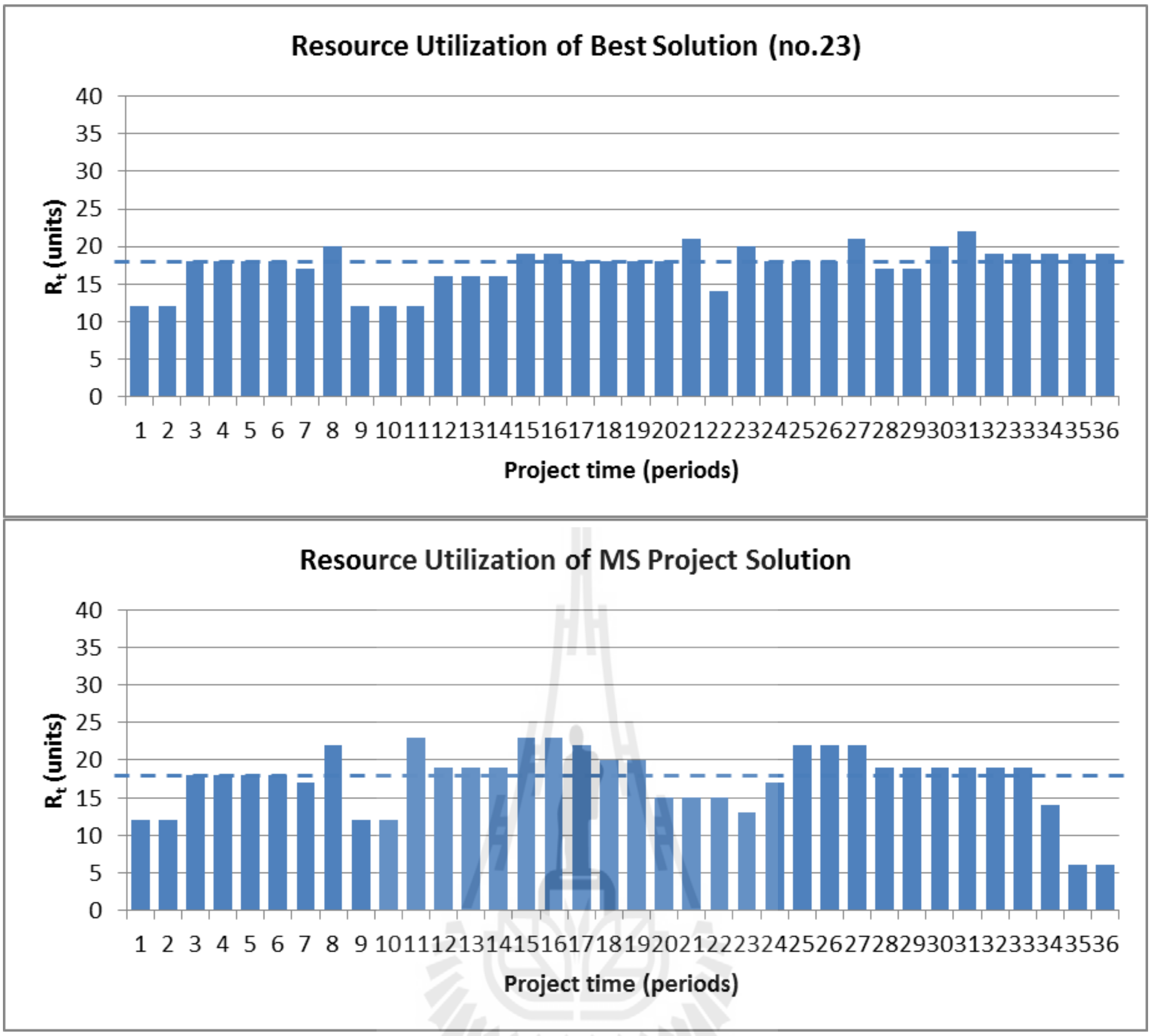
Test no. 4.2	Solution of Runtime no.																														Average	MS Project Solution
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
S_A	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0
S_D	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	0
S_E	0	0	0	1	1	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	N/A	0
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	N/A	0
S_G	0	0	0	1	1	2	0	2	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	3	0	0	3	0	1	1	0	0	1	N/A	0
S_H	2	2	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	7	1	0	2	0	0	1	0	7	6	0	1	7	N/A	0
S_I	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	6	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	3	0	0	N/A	0
S_J	12	11	11	10	10	10	12	10	12	1	10	10	12	10	11	12	12	12	11	11	8	12	12	9	0	11	11	12	12	11	N/A	10
S_K	1	0	1	1	0	1	1	1	2	1	0	0	1	0	1	2	1	1	2	1	0	2	2	0	3	2	1	1	2	2	N/A	2
S_L	0	1	4	0	3	1	2	0	5	2	3	1	5	0	1	0	2	3	4	3	1	5	0	0	2	0	2	2	4	0	N/A	2
S_M	0	1	0	0	0	4	1	0	1	0	0	0	0	7	0	1	1	0	7	2	3	1	0	0	8	1	0	0	1	0	N/A	3
S_N	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	7	0	0	0	0	7	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	N/A	0
S_O	5	0	0	1	0	2	0	2	0	0	0	2	0	2	0	4	0	0	0	1	0	0	2	1	4	4	0	3	1	2	N/A	1
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A	1
S_Q	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	6	0	6	0	0	0	N/A	3
S_R	1	6	6	0	0	6	6	1	0	9	0	6	1	5	4	0	6	2	3	7	4	0	9	1	8	0	2	9	6	2	N/A	6
S_S	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	0	N/A	0
S_T	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	N/A	0
S_U	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	N/A	0
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A	0
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.07	0
X_{NI1}	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.17	0
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11442	11308	11400	11306	11306	11232	11248	11654	11404	11588	11346	11342	11238	11328	11346	11348	11248	11422	11350	11304	11294	11332	11208	11638	11514	11466	11442	11222	11292	11464	11368	11618
M_Y	12165	12185	12199	12061	12132	12058	12143	12504	12201	11389	12082	11953	12020	12010	11876	12093	12143	12194	11958	12141	11952	12165	12151	12540	11375	12171	12194	12146	12119	12296	12087	11451
MRD	23	23	25	23	25	22	23	25	25	27	25	25	22	25	23	25	23	24	25	25	25	25	22	25	24	25	23	23	25	24	24.1	23
RRH	26	25	28	23	26	29	27	42	33	23	22	27	22	43	20	30	27	43	40	28	24	34	23	37	29	38	34	23	37	37	30	24
RID	96	90	102	85	79	109	76	110	91	54	76	105	81	112	97	104	76	97	120	100	54	91	73	98	75	96	93	84	124	90	91.3	72

- รูปข้างล่างแสดงแผนงานผลลัพธ์ของการปรับสมดุลระดับการจัดสรรทรัพยากรของโจทย์ขนาดใหญ่ที่ได้จากโปรแกรม MS Project

ID	Task Name	Duration	Predecessors	Start	Finish	Late Start	Late Finish	Total Slack	Free Slack
1	A	7 days		พ 1/1/58	พ 7/1/58	พ 1/1/58	พ 7/1/58	0 days	0 days
2	B	2 days		พ 1/1/58	ศ 2/1/58	พ 7/1/58	พ 8/1/58	6 days	0 days
3	C	3 days	1	พ 8/1/58	ส 10/1/58	พ 8/1/58	ส 10/1/58	0 days	0 days
4	D	6 days		พ 1/1/58	อ 6/1/58	อ 4/1/58	ศ 9/1/58	3 days	0 days
5	E	3 days	1,2	พ 8/1/58	ส 10/1/58	จ 12/1/58	พ 14/1/58	4 days	0 days
6	F	6 days	2	ส 3/1/58	พ 8/1/58	ศ 9/1/58	พ 14/1/58	6 days	2 days
7	G	4 days	3	อ 11/1/58	พ 14/1/58	อ 11/1/58	พ 14/1/58	0 days	0 days
8	H	5 days	4	พ 7/1/58	อ 11/1/58	ส 10/1/58	พ 14/1/58	3 days	0 days
9	I	7 days	5,6	อ 11/1/58	ส 17/1/58	พ 15/1/58	พ 21/1/58	4 days	0 days
10	J	5 days	7	อ 25/1/58	พ 29/1/58	อ 27/1/58	ส 31/1/58	2 days	0 days
11	K	7 days	7	ส 17/1/58	ศ 23/1/58	ส 17/1/58	ศ 23/1/58	0 days	0 days
12	L	6 days	7	ส 17/1/58	พ 22/1/58	อ 20/1/58	อ 25/1/58	3 days	0 days
13	M	5 days	8	พ 15/1/58	จ 19/1/58	จ 19/1/58	ศ 23/1/58	4 days	4 days
14	N	6 days	9SS	อ 11/1/58	ศ 16/1/58	พ 15/1/58	อ 20/1/58	4 days	0 days
15	O	1 day	12	ส 24/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	อ 27/1/58	3 days	3 days
16	P	3 days	11,13,14	อ 25/1/58	อ 27/1/58	อ 25/1/58	อ 27/1/58	0 days	0 days
17	Q	4 days	14	อ 20/1/58	ศ 23/1/58	ส 24/1/58	อ 27/1/58	4 days	1 day
18	R	7 days	8	อ 18/1/58	ส 24/1/58	พ 21/1/58	อ 27/1/58	3 days	0 days
19	S	5 days	10,15	ศ 30/1/58	อ 3/2/58	อ 1/2/58	พ 5/2/58	2 days	2 days
20	T	2 days	15,16	พ 28/1/58	พ 29/1/58	พ 28/1/58	พ 29/1/58	0 days	0 days
21	U	3 days	17,18	อ 25/1/58	อ 27/1/58	พ 28/1/58	ศ 30/1/58	3 days	0 days
22	V	7 days	19FF,20	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	ศ 30/1/58	พ 5/2/58	0 days	0 days
23	W	6 days	16,21	พ 28/1/58	จ 2/2/58	ส 31/1/58	พ 5/2/58	3 days	3 days



รูปที่ 3.30 แผนงานผลลัพธ์จากการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.31 การเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งของระดับการใช้ทรัพยากรของโจทย์ขนาดใหญ่จากการปรับสมดุลด้วยแบบจำลองที่มีทางเลือกและโปรแกรมสำเร็จรูป

- การเปรียบเทียบผลการทดสอบจากชุดทดสอบที่ 3.2 และ 4.2 ในกรณีโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ ระหว่างแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับที่ไม่มี และเปรียบเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูป แสดงในตารางข้างล่าง พบว่าแบบจำลองที่มีทางเลือกให้คำตอบที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีทางเลือกอย่างมากทั้งรายคำตอบและโดยเฉลี่ย และแบบจำลองก็ยังให้คำตอบที่ดีกว่าการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทั้งรายคำตอบและโดยเฉลี่ยด้วย นอกจากนี้การใช้ทางเลือกความสัมพันธ์ยังช่วยให้โปรแกรมสำเร็จรูปสร้างคำตอบที่ดีกว่ากรณีที่เป็นความสัมพันธ์แบบปกติ Finish-to-Start อีกด้วย ซึ่งข้อสรุปคล้ายคลึงกับข้อสรุปในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก

ตารางที่ 3.14 การเปรียบเทียบแสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดและค่าเฉลี่ยจากชุดทดสอบที่ 3.2 และ 4.2 และจากโปรแกรมสำเร็จรูป

	All Finish-to-Start relationships without options							Relationships with options						
	5 Best Solutions					Average	MS Project	5 Best Solutions					Average	MS Project
M_x	12520	12520	12520	12528	12532	12548	12964	11208	11222	11232	11238	11248	11368	11618
MRD	32	32	32	32	32	32.3	35	22	23	22	22	23	24.1	23
RRH	15	18	15	15	20	18.3	29	23	23	29	22	27	30.0	24
RID	50	55	50	49	53	47.7	79	73	84	109	81	76	91.3	72

3.6.5 ประเด็นที่ 5 การเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ

- ผลการทดสอบชุดที่ 5.1 เมื่อกำหนด Single-objective function เป็นค่าดัชนี M_X ซึ่งควรได้คำตอบที่มีค่าดัชนี M_X ที่ดีที่สุดกว่าชุดทดสอบอื่นๆ และทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime แสดงดังตารางข้างล่าง

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_B และ S_V ค่าเป็น 0 ทุกครั้ง

- นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง และ X_{DA1} และ X_{NI1} มีค่าเป็น 0 บ่อยครั้ง ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มาก ซึ่งหมายถึงว่ามักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Start-to-Start และ Finish-to-Finish ซึ่งทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่า M_X ที่แตกต่างกันเกือบทั้งหมด แผนงานที่ดีที่สุดคือคำตอบที่ 23 ให้ค่า M_X = 11208 โดยมีค่าเฉลี่ย = 11368

- แนวโน้มของค่าดัชนีอื่นๆที่ไม่ได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่ *RRH* และ *RID* มีค่าค่อนข้างแย่และมีช่วงค่าที่แตกต่างกันมาก ส่วนดัชนี *MRD* กลับมีค่าที่ค่อนข้างดีซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของดัชนี M_X

ตารางที่ 3.15 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.1

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
5.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_C	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_D	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_E	0	0	0	1	1	0	0	0	7	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	N/A
S_G	0	0	0	1	1	2	0	2	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	1	0	3	0	0	3	0	1	1	0	0	1	N/A
S_H	2	2	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	7	1	0	2	0	0	1	0	7	6	0	1	7	N/A
S_I	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	5	0	5	0	0	6	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	3	0	0	N/A
S_J	12	11	11	10	10	10	12	10	12	1	10	10	12	10	11	12	12	12	11	11	8	12	12	9	0	11	11	12	12	11	N/A
S_K	1	0	1	1	0	1	1	1	2	1	0	0	1	0	1	2	1	1	2	1	0	2	2	0	3	2	1	1	2	2	N/A
S_L	0	1	4	0	3	1	2	0	5	2	3	1	5	0	1	0	2	3	4	3	1	5	0	0	2	0	2	2	4	0	N/A
S_M	0	1	0	0	0	4	1	0	1	0	0	0	0	7	0	1	1	0	7	2	3	1	0	0	8	1	0	0	1	0	N/A
S_N	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	7	0	0	0	0	7	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	N/A
S_O	5	0	0	1	0	2	0	2	0	0	0	2	0	2	0	4	0	0	0	1	0	0	2	1	4	4	0	3	1	2	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_Q	6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	6	0	6	0	0	0	N/A
S_R	1	6	6	0	0	6	6	1	0	9	0	6	1	5	4	0	6	2	3	7	4	0	9	1	8	0	2	9	6	2	N/A
S_S	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	0	N/A
S_T	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	N/A
S_U	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_W	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0.07
X_{NI1}	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0.17
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	11442	11308	11400	11306	11306	11232	11248	11654	11404	11588	11346	11342	11238	11328	11346	11348	11248	11422	11350	11304	11294	11332	11208	11638	11514	11466	11442	11222	11292	11464	11368
M_Y	12165	12185	12199	12061	12132	12058	12143	12504	12201	11389	12082	11953	12020	12010	11876	12093	12143	12194	11958	12141	11952	12165	12151	12540	11375	12171	12194	12146	12119	12296	12087
MRD	23	23	25	23	25	22	23	25	25	27	25	25	22	25	23	25	23	24	25	25	25	25	22	25	24	25	23	23	25	24	24.1
RRH	26	25	28	23	26	29	27	42	33	23	22	27	22	43	20	30	27	43	40	28	24	34	23	37	29	38	34	23	37	37	30
RID	96	90	102	85	79	109	76	110	91	54	76	105	81	112	97	104	76	97	120	100	54	91	73	98	75	96	93	84	124	90	91.3

- ผลการทดสอบชุดที่ 5.2 เมื่อกำหนด Single-objective function เป็นค่าดัชนี *MRD* ซึ่งควรได้คำตอบที่มีค่าดัชนี *MRD* ที่ดีที่สุดกว่าชุดทดสอบอื่นๆ และทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime แสดงดังตารางข้างล่าง

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_J มักจะมีค่ามาก และ S_R ก็มีค่ามากรองลงมา ส่วน S_A และ S_T ค่าเป็น 0 ทุกครั้ง

- นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{DA1}, X_{NI1} และ X_{VS1} มีค่าเป็น 0 บ่อยครั้ง ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายถึงว่ามักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Start-to-Start และ Finish-to-Finish ซึ่งทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า ค่าตัวแปรคำตอบที่ได้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับชุดทดสอบที่ 5.1

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่า *MRD* ที่แตกต่างกันบ้าง มีแผนงานที่ให้ค่า *MRD* ที่ดีที่สุดเท่ากันอยู่หลายคำตอบ เช่น คำตอบที่ 7 ให้ค่า *MRD* = 23 โดยมีค่าเฉลี่ย = 23.9 ข้อสังเกตคือคำตอบที่ดีสุดของชุดทดสอบนี้กลับมีค่า *MRD* ที่แย่กว่าของชุดทดสอบที่ 5.1 ที่มีค่า *MRD* ดีที่สุด = 22 หมายความว่าค่าดัชนี M_X เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ละเอียดกว่า *MRD* แม้จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน

- แนวโน้มของค่าดัชนีอื่นๆที่ไม่ได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่ *RRH* และ *RID* มีค่าค่อนข้างแย่และมีช่วงค่าที่แตกต่างกันมาก และส่วนดัชนี M_X ก็มีค่าที่แย่กว่าของชุดทดสอบที่ 5.1 ทั้ง

ที่คำตอบให้ค่า *MRD* ดีใกล้เคียงกัน การใช้ค่าดัชนี M_X เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงดีกว่า *MRD*

ตารางที่ 3.16 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.2

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
5.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_B	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	N/A
S_C	3	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	0	2	0	0	1	0	N/A
S_D	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	4	0	0	1	2	6	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_E	0	0	0	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	3	0	N/A
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	N/A
S_G	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	N/A
S_H	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
S_I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	3	1	N/A
S_J	9	7	0	9	9	9	12	11	0	12	8	10	11	10	8	10	11	12	12	2	7	12	9	10	12	0	11	12	11	8	N/A
S_K	0	0	3	1	3	3	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0	N/A
S_L	0	0	5	1	0	0	2	4	0	1	0	0	1	0	0	0	3	1	1	0	0	2	1	0	2	3	0	2	0	0	N/A
S_M	0	0	7	0	3	0	0	4	0	0	0	0	0	5	5	0	7	0	0	0	0	2	0	0	0	8	7	0	0	7	N/A
S_N	0	0	7	0	0	2	6	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	1	0	2	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	4	0	1	1	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	N/A
S_Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7	1	0	1	0	N/A
S_R	5	5	0	2	6	6	3	0	7	8	4	0	5	8	0	2	0	5	5	9	5	0	5	0	5	0	0	3	0	0	N/A
S_S	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	N/A
S_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_U	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	N/A
X_{DA1}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
X_{NI1}	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0.37
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
M_x	11576	11552	11658	11710	11724	11904	11464	11620	12378	11460	11782	11630	11522	11482	12042	11756	11918	11460	11410	11882	11676	11754	11548	11526	11364	11902	11624	11406	11522	11876	11671
M_Y	12064	11888	11458	12357	11803	11719	11800	11892	11264	11902	11716	12049	12012	12045	11452	12067	11377	11932	11797	11201	11874	11944	11927	11977	11926	11556	11636	11793	12109	11206	11791
MRD	24	24	25	24	24	25	23	25	27	23	24	23	23	23	25	24	24	23	23	25	24	23	24	23	23	26	24	23	23	24	23.9
RRH	31	21	32	30	28	47	34	34	27	41	26	30	32	29	43	31	42	40	36	28	21	41	33	35	41	43	37	35	32	27	33.6
RID	110	88	98	76	81	78	112	113	45	120	76	91	101	94	78	88	83	114	120	49	84	106	94	106	120	87	118	112	86	77	93.5

- ผลการทดสอบชุดที่ 5.3 เมื่อกำหนด Single-objective function เป็นค่าดัชนี *RRH* ซึ่งควรได้คำตอบที่มีค่าดัชนี *RRH* ที่ดีที่สุดกว่าชุดทดสอบอื่นๆ และทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime แสดงดังตารางข้างล่าง

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_B มักจะมีค่ามาก และ S_D ก็มีค่ามากรองลงมา มีตัวแปรหลายตัวที่มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง เช่น S_G และ S_I ซึ่งค่าตัวแปรคำตอบที่ได้มีแนวโน้มแตกต่างจากกับชุดทดสอบที่ 5.1 และ 5.2

- นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{DA1}, และ X_{NI1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง ส่วน X_{VS1} มีค่าเป็น 0 บ่อยครั้งมาก ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงว่ามักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Start-to-Start และ Finish-to-Finish ซึ่งทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่า *RRH* ที่ใกล้เคียงกันไม่หลากหลาย และมีค่า *RRH* ที่ดีที่สุดเท่ากันเท่ากับ 0 อยู่หลายคำตอบ เช่น คำตอบที่ 1 ให้ค่า *RRH* = 0 โดยมีค่าเฉลี่ย = 0.3 ข้อสังเกต

คือคำตอบที่ดีสุดของชุดทดสอบนี้มีค่า *RRH* ที่ดีขึ้นมากกว่าของชุดทดสอบที่ 5.1 และ 5.2 ที่มีค่า *RRH* โดยเฉลี่ยประมาณ 32 หมายความว่า ค่าดัชนี M_X และ *RRH* จะมีแนวโน้มไปทางตรงกันข้ามกัน

- แนวโน้มของค่าดัชนีอื่นๆที่ไม่ได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่ M_X และ *MRD* มีค่าที่แย่ลงมาก แต่ดัชนี *RID* กลับมีค่าดีขึ้นมาก ดังนั้นดัชนี M_X และ *MRD* จึงเป็นดัชนีที่มีค่าสอดคล้องไปในทางเดียวกันและตรงกันข้ามกับดัชนี *RRH* และ *RID*

ตารางที่ 3.17 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.3

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
5.3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	1	1	2	1	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	N/A
S_B	3	3	4	4	4	4	2	6	2	5	0	0	0	0	0	3	0	7	2	2	0	7	3	0	0	4	3	2	6	2	N/A
S_C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
S_D	1	2	0	0	3	0	1	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	6	2	3	2	1	2	0	2	0	5	1	0	1	N/A
S_E	1	0	0	0	1	2	0	0	0	3	3	1	1	1	1	1	0	3	0	0	4	0	0	1	3	1	0	0	0	0	N/A
S_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	3	3	3	0	2	0	0	0	6	0	0	4	5	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_H	0	2	0	6	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	0	1	N/A
S_I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_J	1	1	1	0	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	2	1	1	1	1	0	1	0	1	N/A
S_K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	4	0	N/A
S_M	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_N	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_Q	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_R	0	0	4	1	0	0	1	4	2	0	0	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	3	2	4	0	1	0	1	N/A
S_S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{NI1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{VS1}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
M_x	15740	15310	14388	14354	15914	15266	15162	14732	14620	16070	15966	14454	15704	15704	15354	15784	14316	15936	15096	14930	15502	14676	15190	15012	15326	14412	14784	15162	14480	15162	15150
M_Y	10331	10890	10723	11611	11044	10459	10192	11147	10430	10877	11457	12132	10377	10377	10466	10401	10624	12599	10292	10460	11296	11556	10960	10411	11116	10729	11276	10192	11071	10192	10856
MRD	44	44	34	39	44	44	44	34	39	44	44	44	44	44	44	44	38	44	43	44	44	34	44	44	44	34	43	44	42	44	42
RRH	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0.3
RID	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0.73

- ผลการทดสอบชุดที่ 5.4 เมื่อกำหนด Single-objective function เป็นค่าดัชนี *RID* ซึ่งควรได้คำตอบที่มีค่าดัชนี *RID* ที่ดีที่สุดกว่าชุดทดสอบอื่นๆ และทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime แสดงดังตารางข้างล่าง

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป โดยที่ S_B มักจะมีค่ามาก และ S_D ก็มีค่ามากรองลงมา มีตัวแปรหลายตัวที่มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง เช่น S_G และ S_I ซึ่งค่าตัวแปรคำตอบที่ได้มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับชุดทดสอบที่ 5.3

- นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{DA1}, และ X_{NI1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง ส่วน X_{VS1} มีค่าเป็น 0 บ่อยครั้งมาก เป็นลักษณะแนวโน้มคล้ายคลึงกับชุดทดสอบที่ 5.3 ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 หรือ

ใกล้เคียง 0 และน้อยกว่า 0.5 มากซึ่งหมายถึงว่ามักมีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Start-to-Start และ Finish-to-Finish ซึ่งทำให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่า *RID* ที่ใกล้เคียงกันไม่หลากหลาย และมีค่า *RID* ที่ดีที่สุดเท่ากันเท่ากับ 0 อยู่หลายคำตอบ เช่น คำตอบที่ 2 ให้ค่า *RID* = 0 โดยมีค่าเฉลี่ย = 0.23 ข้อสังเกตคือคำตอบที่ดีสุดของชุดทดสอบนี้มีค่า *RID* ที่ดีขึ้นมากกว่าของชุดทดสอบที่ 5.1 และ 5.2 ที่มีค่า *RID* โดยเฉลี่ยประมาณ 92 หมายความว่า ค่าดัชนี M_X และ *RID* จะมีแนวโน้มไปทางตรงกันข้ามกัน

- แนวโน้มของค่าดัชนีอื่นๆที่ไม่ได้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้แก่ M_X และ *MRD* มีค่าที่แย่มาก แต่ดัชนี *RRH* มีค่าดีมาก ดังนั้นดัชนี *RRH* และ *RID* จึงเป็นดัชนีที่มีค่าสอดคล้องไปในทางเดียวกันและตรงกันข้ามกับดัชนี M_X และ *MRD*

- นอกจากนี้ข้อสังเกตคือคำตอบของชุดทดสอบนี้ยังให้ค่าดัชนี *RRH* ที่ดีกว่าของชุดทดสอบที่ 5.3 ซึ่งหมายความว่าค่าดัชนี *RID* เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ละเอียดกว่า *RRH* แม้จะมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน การใช้ค่าดัชนี *RID* เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์จึงดีกว่า *RRH*

ตารางที่ 3.18 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
5.4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	N/A
S_B	1	6	2	3	0	5	3	6	3	2	3	2	1	3	1	4	2	2	5	2	3	3	2	5	6	6	6	2	6	0	N/A
S_C	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	N/A
S_D	1	0	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	3	2	3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	2	1	0	2	N/A
S_E	0	0	0	1	0	2	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	N/A
S_F	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	N/A
S_G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_H	1	0	2	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3	2	0	0	N/A
S_I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_J	1	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	0	0	1	1	N/A
S_K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	N/A
S_M	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	6	0	0	2	1	0	0	N/A
S_N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
S_Q	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2	N/A
S_R	1	4	0	0	1	2	2	3	0	0	2	0	2	0	0	4	0	1	2	2	0	2	1	0	0	0	2	2	4	2	N/A
S_S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_U	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	N/A
S_W	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{NI1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0.07
M_x	14982	14732	15326	15740	14316	15706	15350	15012	14946	15112	15350	15084	14730	15814	15530	14138	15112	15162	15306	14834	15740	15350	15162	13956	14646	14646	15018	14626	14732	14058	15007
M_Y	10204	11147	10257	10331	10624	10731	10301	11699	10890	10227	10301	10172	11374	10476	10314	10812	10227	10192	11212	10142	10331	10301	10192	11715	10893	10893	12193	10425	11147	10574	10677
MRD	44	34	44	44	38	44	44	44	43	44	44	44	44	44	44	34	44	44	44	44	44	44	44	44	34	34	44	39	34	38	41.7
RRH	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.23
RID	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.23

- ผลการทดสอบชุดที่ 5.5 เมื่อกำหนด Multi-objective function เป็นค่าผลรวมแบบถ่วงน้ำหนัก = (0.005Mx + 2MRD + 2RRH + 1RID) ซึ่งควรได้คำตอบที่มีค่าดัชนีต่างๆทั้ง 4 ดีพร้อมๆกันแต่บางดัชนีอาจจะแย่กว่าชุดทดสอบอื่นๆ และทำการหาคำตอบซ้ำจำนวน 30 runtime แสดงดังตารางข้างล่าง

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่าตัวแปร S_i แตกต่างกันไป และคำตอบค่อนข้างหลากหลาย โดยที่ S_R มักจะมีค่ามาก และ S_B ก็มีค่ามากรองลงมา ตัวแปร S_T เพียงตัวเดียวที่มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง นอกนั้นค่อนข้างแตกต่างกันไปหลากหลาย ค่าตัวแปรคำตอบที่ได้มีแนวโน้มไม่คล้ายคลึงกับชุดทดสอบอื่นๆที่ผ่านมา

- นอกจากนี้ค่าตัวแปร X_{DA1}, X_{NI1} และ X_{VS1} มีค่าเป็น 0 ทุกครั้ง ค่าตัวแปร X_{ih1} โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0 ทั้งหมด ซึ่งหมายถึงว่ามีการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ตัวเลือกที่ 2 ที่เป็น No-relationship, Start-to-Start และ Finish-to-Finish โดยตลอดซึ่งทำให้เกิดความยืดหยุ่นในการปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าแผนงานที่ดีกว่า

- ผลคำตอบที่ได้ทั้งหมดมีค่า weighted sum ที่ต่ำมาก และมีคำตอบที่หลากหลายไม่ซ้ำกัน มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง โดยแผนงานที่ดีที่สุดเป็นของคำตอบที่ 4 มีค่า weighted sum = 128 และมีค่าเฉลี่ย = 139 ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าดัชนีเป็นรายตัวที่มา

ประกอบกันพบว่าเป็นคำตอบที่ให้ค่าดัชนีที่ดีทุกดัชนีพร้อมกันแม้ไม่ใช่ค่าดัชนีรายตัวที่ดีที่สุดเมื่อใช้ single-objective function เหมือนกับชุดทดสอบอื่นๆที่ผ่านมา

- เมื่อพิจารณาค่าดัชนีเป็นรายตัว แนวโน้มของค่าดัชนี M_X และ *MRD* ค่อนข้างแย่ แม้ไม่แย่มากที่สุด แต่ค่าค่อนข้างห่างจากคำตอบที่ดีที่สุดของชุดทดสอบที่ 5.1 และ 5.2 เมื่อให้ ดัชนี M_X หรือ *MRD* เป็น single-objective function แต่ดัชนี *RRH* และ *RID* ค่อนข้างดี ใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดของชุดทดสอบที่ 5.3 และ 5.4 เมื่อให้ดัชนี *RRH* หรือ *RID* เป็น single-objective function ดังนั้นจึงแสดงว่าไม่สามารถได้คำตอบที่มีค่าดัชนีทั้ง 4 นี้ดีที่สุดพร้อมกัน แต่หากการเน้นไปที่ค่า M_X และ *MRD* จะต้องแลกกับค่า *RRH* และ *RID* และในทางกลับกัน

ตารางที่ 3.19 แสดงผลการทดสอบชุดที่ 5.5

Test no.	Solution of Runtime no.																														Aver
5.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	age
S_A	0	0	1	2	0	0	2	0	1	0	1	0	2	0	3	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	N/A
S_B	1	4	0	4	3	2	4	1	3	2	4	2	3	3	6	5	2	4	0	1	2	1	2	0	0	5	4	2	2	4	N/A
S_C	0	3	2	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	2	2	2	3	0	2	3	0	2	2	0	N/A
S_D	0	0	2	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0	8	0	0	2	1	1	0	0	2	2	1	0	1	1	0	N/A
S_E	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	3	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	N/A
S_F	2	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	2	0	3	1	0	0	0	0	0	N/A
S_G	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	N/A
S_H	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	N/A
S_I	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	N/A
S_J	2	1	1	1	1	1	1	1	1	7	8	1	2	7	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	N/A
S_K	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	N/A
S_L	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	N/A
S_M	0	7	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	0	3	2	0	0	1	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_N	3	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	4	0	0	0	0	N/A
S_O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_Q	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	5	0	1	1	0	0	1	1	1	N/A
S_R	3	0	4	6	0	5	0	5	6	1	0	5	0	0	0	0	6	0	4	4	5	0	0	4	5	7	8	4	4	3	N/A
S_S	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A
S_T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_U	0	1	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	N/A
S_V	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	N/A
S_W	0	2	2	0	0	2	2	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	2	2	1	0	2	2	0	0	0	2	2	0	N/A
X_{DA1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{NI1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{VS1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x	13810	13030	14046	13488	12316	12880	13066	13098	13618	13464	12454	13384	12738	13648	13982	14350	13304	12824	12984	13112	13032	12466	12672	12984	12978	13030	13528	13112	13112	14138	13222
M_Y	10631	11677	11949	11316	11291	10720	11656	10596	10718	11120	12404	10474	11527	10911	11729	12073	10498	11918	11426	10850	10882	11458	11185	11426	11026	12141	11019	10858	10858	10672	11234
MRD	34	31	34	29	28	29	31	29	29	28	33	29	29	33	34	35	29	29	29	29	29	27	31	29	29	29	29	29	29	34	30.2
RRH	5	1	0	1	5	6	2	9	2	3	7	3	3	3	0	4	3	5	5	6	3	7	2	5	7	3	3	2	2	0	3.57
RID	9	1	0	1	6	7	2	10	3	5	9	4	9	5	0	4	4	5	10	8	5	15	8	10	11	3	5	4	4	0	5.57
Weighted Sum	156	130	138	128	134	141	133	151	133	134	151	135	137	145	138	154	135	137	143	144	134	145	137	143	148	132	137	132	132	139	139

- ผลการเปรียบเทียบค่าดัชนีต่างๆของคำตอบที่ดีที่สุด 5 คำตอบของชุดทดสอบที่ 5.1 - 5.5 แสดงในตารางข้างล่าง และผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดัชนีต่างๆแสดงในตารางข้างล่างถัดไป พบว่าหากเมื่อกำหนดให้ใช้ค่าดัชนีใดเป็น Single-objective function ในการ optimization เพื่อหาคำตอบจะทำให้ได้คำตอบที่มีค่าดัชนีนั้นดีเด่นกว่าดัชนีอื่นๆที่เหลือ แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ดัชนีที่เหลืออื่นๆมีค่าด้อยลง

- คำตอบที่ได้ไม่สามารถทำให้ได้ค่าดัชนีทั้ง 4 ดีพร้อมกันทั้งหมด แต่หากค่าดัชนีใดดีเด่นจะให้ค่าดัชนีอื่นด้อยลงไป ทั้งนี้ M_X กับ *MRD* มีแนวโน้มขยับไปในทิศทางเดียวกัน ที่ตรงกันข้ามกับแนวโน้นทิศทางของ *RRH* กับ *RID* ที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

- กรณีการใช้ weighted-sum multi-objective function จะทำให้ได้คำตอบที่มีค่าทุกๆดัชนีดีระดับปานกลางพร้อมกันได้

- สำหรับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่นี้สามารถจัดให้ได้แผนงานที่ดีที่สุดมีค่าดัชนีที่ดีที่สุดรายตัวเมื่อกำหนดให้ดัชนีนั้นเป็น Single-objective function คือ M_X = 11208, *MRD* = 22, *RRH* = 0, และ *RID* = 0 แต่เป็นคำตอบคนละคำตอบกันไม่เกิดขึ้นพร้อมกัน

- เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีที่ดีที่สุด (best values) กับค่าดัชนีของแผนงานเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรเป็นการจัดแผนงานแบบ As-Soon-As-Possible ตามความสัมพันธ์ปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด (Initial schedule) มีค่า M_X = 13642, *MRD* = 37, *RRH* = 27, และ *RID* = 64 โดยโจทย์ขนาดใหญ่นี้ในสภาวะอุดมคติที่ระดับการใช้ทรัพยากรสมดุลราบเรียบเท่ากับค่าเฉลี่ย 17.4 units (Ideal schedule) จะมีค่า M_X = 10955, *MRD* = 17.4, *RRH* = 0, และ *RID* = 0 พบว่าแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้สามารถให้แผนงานคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นอย่างมาก โดยมีค่า M_X ลดลง 90.6%, *MRD* ลดลง76.5%, *RRH* ลดลง 100%, และ *RID* ลดลง 100%

ตารางที่ 3.20 แสดงค่าดัชนีต่างๆของ 5 คำตอบที่ดีที่สุดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5

	M_x					*MRD*					*RRH*					*RID*					(0.005M_x + 2*MRD* + 2*RRH* + 1*RID*)				
M_x	11208	11222	11232	11238	11248	11364	11406	11410	11460	11460	14354	14388	14412	14454	14480	13956	14138	14626	14646	14646	13488	13030	13112	13112	13030
MRD	22	23	22	22	23	23	23	23	23	23	39	34	34	44	42	44	34	39	34	34	29	31	29	29	29
RRH	23	23	29	22	27	41	35	36	41	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3
RID	73	84	109	81	76	120	112	120	120	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	4	3
Weighted Sum	219	232	267	225	232	305	285	295	305	297	150	140	140	160	156	158	139	151	141	141	128	130	132	132	132

ตารางที่ 3.21 แสดงค่าเฉลี่ยของดัชนีต่างๆของคำตอบทั้งหมดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5

	Single-objective function				**Weighted sum multi-obj. func.**	Initial schedule	Ideal schedule	% Reduction
Average values	M_x	*MRD*	*RRH*	*RID*				
M_x	11368	11671	15150	15007	13222	13642	10955	84.6%
MRD	24.1	23.9	42.0	41.7	30.2	37	17.4	66.7%
RRH	30.0	33.6	0.3	0.2	3.6	27	0	99.1%
RID	91.3	93.5	0.7	0.2	5.6	64	0	99.6%
Weighted Sum	256.4	266.9	161.1	159.2	139.2	260.2	89.6	70.9%

ตารางที่ 3.22 แสดงค่าที่ดีที่สุดของดัชนีต่างๆของคำตอบทั้งหมดจากชุดทดสอบที่ 5.1-5.5

Best values	Single-objective function M_x	MRD	RRH	RID	Weighted sum multi-obj. func.	Initial schedule	Ideal schedule	% Reduction
M_x	11208	11364	14316	13956	12316	13642	10955	90.6%
MRD	22.0	23.0	34.0	34.0	27.0	37	17.4	76.5%
RRH	20.0	21.0	0.0	0.0	0.0	27	0	100.0%
RID	54.0	45.0	0.0	0.0	0.0	64	0	100.0%
Weighted Sum	194.0	189.8	139.6	137.8	115.6	260.2	89.6	84.8%

3.7 สรุปผลการพัฒนา

แบบจำลองของปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่มีทรัพยากรจำกัด หรือ Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) ที่เป็นอยู่ดั้งเดิมนั้นจะปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (ประเภทหมุนเวียน) (Resource leveling) ด้วยการปรับเลื่อนเวลาเริ่มกิจกรรมต่างๆภายในระยะเวลาโฟลต (Float) ที่ตนเองมีอยู่ โดยมีสมมติฐานการใช้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆทั้งหมดเป็นแบบปกติ Finish-to-Start ซึ่งแนวคิดของการวิจัยนี้ต้องการพัฒนาให้แบบจำลองสามารถมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมในบางความสัมพันธ์ตามความเหมาะสมเป็นรูปแบบอื่นๆได้ ได้แก่ No-relationship, Start-to-Start, Finish-to-Finish และมีหรือไม่มี lag-time และ lead-time ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์จะมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการปรับเลื่อนกิจกรรมในระหว่างการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร ทำให้มีความยืดหยุ่นในการจัดแผนงานเพิ่มมากขึ้นซึ่งนั้นจะส่งผลให้สามารถปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ ทั้งนี้การกำหนดให้มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์สามารถทำได้กับความสัมพันธ์บางอันที่อยู่ในระดับที่ปรารถนา (preferred relationships) เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ถูกกำหนดขึ้นตามนโยบายของผู้วางแผนเอง แต่ความสัมพันธ์บางอันที่อยู่ในระดับจำเป็นต้อง (mandatory relationships) เป็นความสัมพันธ์ตามกายภาพของกิจกรรมทั้งสองซึ่งไม่อาจปรับเปลี่ยนรูปแบบได้จึงไม่สามารถกำหนดให้มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ได้ ในทางปฏิบัติผู้วางแผนมักใช้การปรับเปลี่ยนรูปแบบความสัมพันธ์บางอันเพื่อประโยชน์ในการปรับแก้แผนงานอยู่แล้ว ดังนั้นแบบจำลอง RCPSP แนวคิดใหม่จึงถูกนำมาพัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้

สมการของแบบจำลองปัญหาการวางแผนด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ได้ถูกพิจารณาและสร้างขึ้นใหม่โดยการอ้างอิงกับสมการการคำนวณค่าเวลาต่างของแผนงานด้วยวิธีดั้งเดิม Critical Path Method (CPM) ในกรณีต่างๆ ค่าเวลาบางค่าไม่ได้รับผลกระทบและยังคงมีสมการเหมือนเดิม ได้แก่ Earliest Finish (EF), Latest Start (LS), และ Total Float (TF) แต่ค่าเวลาบางค่ามีการเปลี่ยนแปลงสมการไปจากเดิม ได้แก่ Earliest Start (ES), Latest Finish (LF), และ Free Float (FF) เนื่องจากรูปแบบความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อค่าเวลาเหล่านี้โดยตรง ตัวแปรคำตอบ (solution variables) ของแบบจำลองจะประกอบด้วย 2 กลุ่ม คือตัวแปรค่าระยะเลื่อน (shifting time) ของเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆ เพื่อใช้ในการปรับเลื่อนกิจกรรมให้ได้ระดับการจัดสรรทรัพยากรที่สมดุล และตัวแปรค่าการเลือกทางเลือกรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (Relationship options) ซึ่งกำหนดให้บางความสัมพันธ์มีทางเลือกและความสัมพันธ์ที่เหลือที่ไม่มีทางเลือกให้เป็นแบบปกติ Finish-to-Start ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการประเมินแผนงานคำตอบ

เลือกใช้เป็นค่าดัชนีโมเมนต์รอบแกนนอนที่แทนระยะเวลาของโครงการ (M_X) เนื่องจากเป็นดัชนีที่มีดีกรีกำลังสองและมีความละเอียดอ่อนไหวกับแผนงานคำตอบที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และเป็นดัชนีที่มุ่งหมายให้ระดับการจัดสรรทรัพยากรสมดุลแบบราบเรียบภายในตัวโครงการเองโครงการเดียวซึ่งจะทำให้ต้องจัดเตรียมทรัพยากรโครงการเป็นจำนวนน้อยที่สุด ทั้งนี้แผนงานคำตอบที่เป็นไปได้จะถูกจำกัดให้อยู่ภายในขอบเขตระยะเวลาโครงการที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้นการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรจะสามารถกระทำได้ภายในระยะเวลาโฟลตจำกัดเท่าที่มีอยู่เท่านั้น

แบบจำลองปัญหาการวางแผนด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ ได้ถูกนำมาโปรแกรมลงในโปรแกรมกระดานคำนวณ Microsoft Excel เพื่อให้สมการและฟังก์ชันต่างๆที่สร้างขึ้นในแบบจำลองสามารถถูกคำนวณหาผลลัพธ์ได้ โดยตัวแบบจำลองที่สมบูรณ์จะเป็นไฟล์หนึ่งไฟล์ของโปรแกรม Excel ที่ใช้ Worksheet เพียง 1 อัน ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มเซลที่ทำหน้าที่ต่างๆ ได้แก่ ส่วนป้อนข้อมูลนำเข้า ส่วนเก็บค่าตัวแปรคำตอบ ส่วนการคำนวณค่าเวลาของแผนงานและแสดงบาร์ชาร์ต และส่วนการคำนวณดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แบบจำลองที่โปรแกรมไว้สมบูรณ์แล้วจะใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithm (GA) ด้วยโปรแกรม Add-In สำหรับ Excel ที่เรียกว่า Evolver แบบจำลองนี้จึงพร้อมนำไปทดสอบประสิทธิภาพต่อไป

การทดสอบแบบจำลองมีเป้าหมายเพื่อทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์แผนงานที่ได้ โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้ทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ และประสิทธิภาพในการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในการพัฒนาแบบจำลองนี้ขึ้นมา ซึ่งโจทย์ปัญหาที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบมี 2 โจทย์ คือโจทย์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ที่จะเป็นตัวแทนของโครงการก่อสร้างทั่วไป ทั้งนี้ผลการทดสอบน่าจะขึ้นอยู่กับตัวโจทย์อยู่ด้วยส่วนหนึ่งการทดสอบด้วยโจทย์ 2 โจทย์จึงเป็นการยืนยันถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบในกรณีทั่วไป การวิจัยนี้ได้ตั้งประเด็นการทดสอบไว้ 5 ประเด็นเพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการนำแบบจำลองไปใช้งาน ได้แก่ ความถูกต้องของสมการคำนวณแผนงาน การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบของการ optimization การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์กับโปรแกรมสำเร็จรูป และการเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ

ผลการทดสอบแบบจำลองพบว่าสมการคำนวณค่าเวลาต่างๆของแผนงานมีความถูกต้องโดยอ้างอิงกับผลคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป ค่าเวลาทั้ง 6 ค่า ได้แก่ ES, EF, LS, LF, TF, และ FF และเมื่อกำหนดความสัมพันธ์หลากหลายรูปแบบผสมกัน ส่วนเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบที่เหมาะสมคือเมื่อให้จำนวน trials ไม่น้อยเกินไปหรือประมาณ 50,000 trials ซึ่งเพียงพอต่อการค้นหาคำตอบที่ดีที่น่าพอใจโดยไม่มีความก้าวหน้าของคำตอบมากขึ้นนักหลังจากนี้ แต่หากจำนวน trials มากเกินไปก็ไม่ช่วยให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นแต่ต้องเสียเวลาในการหาคำตอบมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบยังพบว่าแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์สามารถให้ผลลัพธ์แผนงานที่ดีกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป และดีกว่าแบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ แบบจำลองที่ไม่มีทางเลือกยังให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งข้อสรุปนี้สอดคล้องกันทั้ง

โจทย์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยโจทย์ขนาดใหญ่จะมีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้อยู่มากกว่ามากทำให้คำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้มีความหลากหลายกว่าของโจทย์ขนาดเล็ก แต่หากพิจารณาค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์พบว่าดัชนี M_X และ *MRD* จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแต่ M_X มีความละเอียดอ่อนไหวกว่า *MRD* ในขณะที่ค่าดัชนีทั้งสองจะมีแนวโน้มสวนทางกับ *RRH* และ *RID* ดังนั้นจึงไม่อาจสร้างแผนงานที่มีค่าดัชนีทุกดัชนีดีที่สุดพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม M_X และ *MRD* จะทำให้ระดับการจัดสรรทรัพยากรมีรูปทรงที่แบนราบเรียบ แต่ *RRH* และ *RID* จะทำให้ได้รูปทรงระฆังคว่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร (Resource-constrained project scheduling problem model: RCPSP model) ที่สามารถพิจารณารูปแบบที่เหมาะสมของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมได้ พร้อมทั้งพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับหาคำตอบที่ดีที่สุด (Solving algorithms) เนื่องจากหน้าที่สำคัญของการบริหารโครงการก่อสร้างเป็นการวางแผนจัดสรรการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนของโครงการให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด แต่งานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากได้มุ่งพัฒนาแบบจำลองปัญหาในลักษณะการบูรณาการทรัพยากรต่างๆของโครงการ หรือพัฒนาที่ดัชนีสำหรับประเมินแผนงานผลลัพธ์ โดยละเลยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่หลากหลายและส่งผลกระทบโดยตรงต่อความยืดหยุ่นในการจัดแผนงาน ส่งผลต่อจำนวนของแผนงานที่เป็นไปได้

การวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผนงานที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ (Resource-constrained Construction Scheduling Model with Precedence Relationships) โดยแบบจำลองใหม่นี้อยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองปัญหาการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) ด้วยการกำหนดให้มีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นส่วนหนึ่งของตัวแปรคำตอบ ที่นอกเหนือจากระยะเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรม พบว่าทำให้สมการสำหรับคำนวณค่าเวลาของแผนจะเปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในสมการที่ (3.4) – (3.18) ดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เลือกใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแผนงานคำตอบคือโมเมนต์รอบแกนนอนซึ่งแทนระยะเวลาโครงการดังแสดงในสมการที่ (3.2) และมีข้อจำกัดที่ใช้กำหนดขอบเขตของแผนงานคำตอบที่เป็นไปได้ด้วยการกำหนดค่าระยะเวลาของโครงการดังสมการที่ (3.3) จากนั้นแบบจำลองนี้ได้ถูกโปรแกรมลงบนโปรแกรมสำนักงานพื้นฐานประเภทกระดานคำนวณหรือ Microsoft Excel ที่มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลและการคำนวณที่ซับซ้อนได้ตามสมการต่างๆของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (optimization) ของแบบจำลองปัญหานี้ ใช้โปรแกรมเพิ่มเสริมใน (Add-in) ใน Excel ที่เรียกว่า Evolver ซึ่งใช้ Genetic Algorithm (GA) ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

แบบจำลองใหม่ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วได้ถูกนำมาทดสอบในประเด็นต่างๆแบ่งเป็น 5 ประเด็นกับโจทย์ตัวอย่างโครงการก่อสร้าง 2 โจทย์มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เพื่อประเมินความถูกต้องของแผนงานผลลัพธ์และประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้ข้อสรุปแยกเป็นประเด็นดังนี้

ประเด็นที่ 1 ความถูกต้องของสมการคำนวณของแบบจำลอง พบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรม ได้แก่ ES, ST, EF, FT, LS, LF, TF, และ FF ได้ถูกต้องตรงกับโปรแกรมสำเร็จรูปเสมอทุกครั้งและทุกกรณีไม่ว่าแผนงานจะใช้ความสัมพันธ์รูปแบบใดในการทดสอบ ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถนำไปใช้คำนวณค่าเวลาของแผนงานก่อสร้างในกรณีที่มีความสัมพันธ์หลากหลาย

รูปแบบได้แก่ Finish-to-Start, Start-to-Start, Finish-to-Finish, No-relationship หรือมี lag time หรือ lead time ได้อย่างถูกต้อง

ประเด็นที่ 2 การกำหนดเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบ ของ GA-based optimization พบว่าการใช้เงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบเป็นจำนวน trials = 50,000 สามารถให้ผลคำตอบที่ดีและสม่ำเสมอ และยังใช้เวลาเหมาะสม โดยที่จำนวน trials ที่มากกว่านี้ก็ไม่ได้ช่วยให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ อีกทั้งวิธีการกำหนดเงื่อนไขการหยุดด้วยความก้าวหน้าขั้นต่ำของคำตอบจะใช้เวลานานมากและไม่แน่นอนแต่กลับได้คำตอบที่ดีเทียบเท่ากับวิธีอื่นหรือแย่กว่า ดังนั้นการทดสอบที่ใช้ผลจาก GA-based optimization ในประเด็นถัดๆไปจึงเลือกใช้วิธีกำหนดเงื่อนไขการหยุดด้วยจำนวน trials = 50,000

ประเด็นที่ 3 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองในกรณีกำหนดให้ไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์และใช้รูปแบบปกติ Finish-to-Start ทั้งหมด พบว่าผลการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยแบบจำลองได้แผนงานคำตอบที่ดีขึ้นกว่าแผนงานเริ่มต้น โดยมีค่า M_X ลดลง 43.5% และ 41.8% สำหรับทั้งกรณีโจทย์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าแผนงานคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ให้ค่า M_X ลดลงเพียง 29.5% และ 25.2% ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการปรับสมดุลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นที่ใช้ GA-based optimization ดีกว่าของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ Heuristic rule อย่างไรก็ตามแผนงานคำตอบที่ได้จากแบบจำลองก็ดีขึ้นจากแผนงานเริ่มต้นไม่มากนักหรือแสดงว่ามีหนทางการปรับเลื่อนกิจกรรมและปรับปรุงแผนงานได้ไม่มากนัก เนื่องจากติดเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆ และยังพบว่าคำตอบที่ได้ทั้ง 2 กรณีไม่หลากหลายแต่ได้คำตอบเดิมซ้ำหลายครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ไม่มากมายนัก

ประเด็นที่ 4 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองในกรณีกำหนดให้มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์โดยในบางความสัมพันธ์จะมีทางเลือกระหว่างรูปแบบปกติ Finish-to-Start กับรูปแบบอื่นๆได้แก่ Start-to-Start, Finish-to-Finish, และ No-relationship พบว่าผลการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรด้วยแบบจำลองได้แผนงานคำตอบที่ดีขึ้นกว่าแผนงานเริ่มต้น โดยมีค่า M_X ลดลงถึง 76.8% และ 90.8% สำหรับทั้งกรณีโจทย์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าแผนงานคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ให้ค่า M_X ลดลง 2.3% และ 75.3% ตามลำดับ แสดงว่าวิธีการปรับสมดุลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นที่ใช้ GA-based optimization ดีกว่ากว่าของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ Heuristic rule ร้อยละที่ลดลงของค่าคำตอบที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับกรณีโจทย์ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ค่อนข้างแตกต่างกันมากแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาคำตอบนี้ขึ้นกับตัวโจทย์และอาจให้ผลดีไม่สม่ำเสมอในแต่ละโจทย์ อย่างไรก็ตามแผนงานคำตอบที่ได้จากแบบจำลองก็ดีขึ้นจากแผนงานเริ่มต้นอย่างมาก (เกินว่า 50%) หรือแสดงว่ามีหนทางการปรับเลื่อนกิจกรรมและปรับปรุงแผนงานได้มาก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆที่ช่วยให้การปรับเลื่อนกิจกรรมได้ดีขึ้น และยังพบว่าคำตอบที่ได้ของกรณีโจทย์ขนาดเล็กไม่หลากหลายซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ไม่มากมายนัก เนื่องจากมีจำนวนกิจกรรมไม่มาก แต่ในกรณีโจทย์ขนาดใหญ่จะพบว่าคำตอบที่ได้มีความหลากหลายมาก เนื่องจากมีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้มากมายมหาศาล

นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่มีและไม่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์จะพบว่าแบบจำลองที่มีทางเลือกให้คำตอบที่ดีกว่ากรณีที่ไม่มีทางเลือกอย่างมากทั้งในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดใหญ่แสดงว่าการมีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ช่วยให้เกิดแผนงานคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมากขึ้นและดีขึ้น มีความยืดหยุ่นในการปรับเลื่อนกิจกรรมเพื่อให้ได้ระดับสมดุล และแบบจำลองก็ยังให้คำตอบที่ดีกว่าการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทั้งในกรณีของโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แสดงว่าวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการค้นหาแบบสุ่ม GA-based optimization ดีกว่าการใช้ Heuristic rules

ประเด็นที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ได้แก่ M_X, *MRD*, *RRH*, และ *RID* พบว่าการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการ Minimization ค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดี่ยวเป็นรายตัว (Single-objective function) จะมีแนวโน้มทำให้ได้คำตอบที่มีค่าดัชนีนั้นดีที่สุดกว่าการใช้ผลรวมถ่วงน้ำหนักของหลายดัชนีเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Weighted-sum multi-objective function) ที่จะให้คำตอบที่มีค่าดัชนีดีพอประมาณแบบถัวกันระหว่างดัชนีทั้งหมด โดยค่าดัชนีต่างๆมีลักษณะที่ trade-off กันอยู่จึงไม่สามารถได้คำตอบที่มีค่าดัชนีดีที่สุดพร้อมกันทุกดัชนี ค่าดัชนี M_X และ *MRD* มีแนวโน้มการแปรผันตามกันโดยที่ M_X มีความอ่อนไหวมากกว่า แต่แปรผกผันกับค่าดัชนี *RRH* และ *RID* ที่แปรผันตามกันโดยที่ *RID* มีความอ่อนไหวมากกว่า แผนงานคำตอบที่ดีที่สุดได้จากแบบจำลองที่มีทางเลือกรูปแบบความสัมพันธ์มีค่าดัชนีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดีขึ้นมากเมื่อเทียบกับแผนงานเริ่มต้น โดยค่าดัชนีต่างๆลดลงมากที่สุดดังนี้: ค่า M_X ลดลง 90.6%, *MRD* ลดลง76.5%, *RRH* ลดลง 100%, และ *RID* ลดลง 100%

ผลลัพธ์ของการวิจัยนี้จึงทำให้ได้วิธีใหม่ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการวางแผนโครงการก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยการมีทางเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม เพื่อให้การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการได้ดียิ่งขึ้นและทำให้ได้แผนงานคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อนำไปใช้ควบคุมและดำเนินการโครงการให้ประสบความสำเร็จต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 ข้อจำกัด

โปรแกรมต้นแบบ (prototype) ของแบบจำลองปัญหาการวางแผนที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรมกระดานคำนวณ (Spreadsheet) ที่มีใช้กันอยู่แพร่หลาย ที่สามารถป้อนและบันทึกข้อมูลนำเข้า ทำการคำนวณตามชุดคำสั่งต่างๆ แสดงข้อมูลผลลัพธ์เป็นทั้งตารางตัวเลขและกราฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการนำเข้าโจทย์ปัญหาใดๆจำเป็นต้องสร้างฟังก์ชันตามสมการคำนวณแผนงานของแบบจำลองลงในเซลคำนวณให้ถูกต้อง และเป็นขั้นตอนที่ต้องทำด้วยความเข้าใจอย่างถูกต้องและยังไม่ฟังก์ชันอัตโนมัติสำหรับการคำนวณแผนงาน ซึ่งอาจยังไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้โดยทั่วไปแต่ต้องได้รับคำแนะนำประกอบการใช้จากผู้วิจัยผู้พัฒนาโปรแกรมด้วย นอกจากนี้โปรแกรมต้นแบบได้ถูกกำจัดขนาดของปัญหาไว้บางด้านเพื่อความเหมาะสมและความกะทัดรัด ได้แก่ จำนวนตัวเลือกของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมถูกกำหนดไว้เพียง 2 ตัวเลือก จำนวนความสัมพันธ์ที่กิจกรรมหนึ่งจะมีกับกิจกรรมอื่นๆได้ไม่เกิน 3 ความสัมพันธ์ และจำนวนประเภททรัพยากรหมุนเวียนของโครงการที่พิจารณาใน

การปรับสมดุลถูกกำหนดไว้ 1 ประเภท ซึ่งในทางปฏิบัติก็เพียงพอสำหรับปัญหาของโครงการก่อสร้างทั่วไปแต่ก็ยังสามารถเพิ่มเติมได้ตามที่ต้องการ โดยที่ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงหลักการที่สำคัญแต่อย่างใด

โปรแกรมต้นแบบใช้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Genetic Algorithm based optimization ซึ่งจะเป็นการค้นหาแบบสุ่มภายในเซ็ตของคำตอบที่เป็นไปได้ ทำให้แผนงานคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้ง (runtime) อาจไม่เหมือนกัน และใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการหยุดค้นหาคำตอบที่กำหนดให้ ดังการทดสอบในประเด็นที่ 2 เงื่อนไขการหยุดที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานั้นๆจะช่วยให้คำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งสม่ำเสมอได้และใช้ระยะเวลาไม่นานเกินไป อย่างไรก็ตามการวางแผนโครงการเป็นภารกิจที่ทำเป็นครั้งคราวไม่ได้ทำอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา การให้ระยะเวลาอย่างเพียงพอสำหรับการค้นหาแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดจึงเป็นสิ่งที่คุ้มค่า

คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลองอาจขึ้นอยู่กับตัวโจทย์ปัญหาอย่างมาก ซึ่งเป็นธรรมชาติของปัญหาการวางแผนโครงการอยู่แล้วไม่ว่าจะใช้วิธีการวางแผนวิธีใด ข้อสรุปทั่วไปที่ได้จากการทดสอบอาจจะไม่เป็นจริงสำหรับบางโจทย์ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ ทิศทางและความสัมพันธ์ของค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง ควรเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล

4.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปคือ แบบจำลองปัญหาการวางแผนงานที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่ได้เป็นแบบจำลองที่สมบูรณ์แบบที่สุด โดยการวางแผนทุกวิธีก็ยังคงต้องมีสมมติฐานเป็นพื้นฐานในการพิจารณากับปัญหา ดังนั้นจึงคงนำไปใช้ได้กับกรณีที่เป็นไปตามสมมติฐานของแบบจำลองเท่านั้น เช่น เป็นปัญหาการปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากรที่มีจำนวนทรัพยากรหมุนเวียนจำกัด โดยการวิจัยต่อไปก็อาจนำข้อสมมติฐานของแบบจำลองนี้ไปพัฒนาปรับปรุงต่อไป

รูปลักษณ์ของโปรแกรมต้นแบบของแบบจำลองนี้เป็นไปเพื่อการวิจัย ยังคงมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User interface) ที่ไม่สวยงามเหมือนกับโปรแกรมช่วยวางแผนสำเร็จรูปที่มีอยู่ โดยเฉพาะไม่มีส่วนการคำนวณฟังก์ชันและการแสดงผลลัพธ์เป็นรูปกราฟต่างๆ อย่างอัตโนมัติสมบูรณ์ทั้งหมด แต่ต้องอาศัยการทำงานจากผู้ใช้ด้วยบางส่วน อย่างไรก็ตามการวิจัยต่อไปอาจเลือกที่จะพัฒนาแบบจำลองการวางแผนบนโปรแกรมช่วยวางแผนสำเร็จรูป เช่น Microsoft Project ก็จะทำให้ได้ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่คุ้นเคย

4.4 ผลลัพธ์

การวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 3 บทความ การประชุมระดับชาติจำนวน 2 บทความ ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ จำนวน 2 บทความ และร่างบทความเพื่อส่งตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติ จำนวน 1 บทความ มีรายละเอียดดังนี้

1. Benjaoran, V. and Tabyang, W. (2014) “Construction Resource-constrained Scheduling with Alternative Relationships Compared with the Conventional Method” Proceeding of the 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, 23-25 September 2014, Yogyakarta, Indonesia.

2. Benjaoran V., and Intarasap A. (2013). “Hospital renovation construction project scheduling with special relationships” ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability - Proceedings of the 2013 International Conference on Construction and Real Estate Management, pp. 258-270.

3. เอกอนันต์ อินทรทรัพย์ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2556). “ตัวแบบปัญหาการปรับระดับทรัพยากรโดยทบทวนทางเลือกความสัมพันธ์ กรณีศึกษา โครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, vol.6(2), 35-45.

4. Benjaoran, V. (2011) “A Consideration of Precedence Relationships as Decision Variables in Construction Scheduling Model” Proceedings of the 2011 International Conferences on Construction and Real Estate Management, pp. 84-87, 19-20 November 2011, Guangzhou, China.

5. น้ำผึ้ง แซ่แต้ และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2554) “การจัดสรรเวลาและต้นทุนด้วยเงื่อนไขจำนวนทรัพยากรแรงงานและชนิดความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่หลากหลาย.” เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม 2554, พัทยา

6. วชรภูมิ เบญจโอฬาร และ น้ำผึ้ง แซ่แต้ (2554) “การวางแผนงานก่อสร้างที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์.” เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม 2554, พัทยา

7. Benjaoran, V. and Sae-Tae, N. (2011) “Time-Cost Trade-off Scheduling under Construction Labor Resource Constraints.” Suranaree Journal of Science and Technology, 18(1), pp 29-39.

8. Benjaoran V., Tabyang, W., and Sooksil N. (2014) Manuscript titled “Precedence Relationship Options for the Resource Leveling Problem using Genetic Algorithm.”

ร่างบทความ

Title: Precedence Relationship Options for the Resource Leveling Problem using Genetic Algorithm

Abstract: Resource leveling problem (RLP) is project scheduling that attempts to reduce the fluctuation of the resource demand. This arrangement of the project activities is achieved under a constraint of the preselected precedence relationships. This research is presenting the new concept of RLP with relationship options: An activity can have one or more alternative types of relationship with other activities. The scheduling model was formulated with the mathematical equations and the prototype was created on spreadsheet software. This scheduling problem model was solved by using the Genetic Algorithm based optimization. And the prototype was tested in two cases, small and large construction projects. The test results demonstrated that this new model could calculate and arrange the project schedules correctly no matter which type of relationships were applied to the schedule. In addition, the model could result in optimal and efficient resource allocation schedules quickly and consistently, which is much better than the conventional RLP model. And these schedules had lower resource demand fluctuation and lower maximum resource demand level. This new RLP with relationship options can help the planners to arrange an efficient schedule. It not only provides the additional flexibility to the level resource demands but also determines a suitable type of relationships for the project activities.

Keywords: construction scheduling, precedence relationships, resource utilization, resource leveling.

1. Introduction

Scheduling is a crucial task of construction project management. Its initial attempt is to arrange all project activities according to the temporal dimension and the precedence relationships. The Critical Path Method (CPM) is widely used in this attempt. After that, the schedule is further adjusted to manage the project resource limitations and to improve the resource utilization by using the optimization model. Without considering the project resource constraints, the schedule can become impractical due to congestion or a lack of resources. The project manager has to arrange a project schedule of all activities and wisely utilize the required resources to meet the demand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Traditionally, resource leveling problem (RLP) is an attempt to stabilize the level of resource demands and to avoid the resource over-allocation. This arrangement is achieved by shifting the start time of activities within their own available float time or splitting them in some cases. This arrangement is restrained to some extent because it must conform to the existing scheduling constraints, particularly pre-specified precedence relationships of activities. Therefore, the efficient resource utilized schedules may not be obtained. RLP is defined as a non-deterministic polynomial-time hard (NP-hard) optimization problem (Kolisch and Hartmann 2006) and is on the focus of many research studies (Tang et al. 2014, Ponz-Tienda et al. 2013, Alsayegh and Hariga 2012, Jun and El-Rayes 2011, El-Rayes and Jun 2009, Leu et al. 2000, Hegazy 1999). The problem's studies include the problem solving methodology, the variation of project resources, and the resource fluctuation metrices. However, only few researches explore a variety and an impact of the precedence relationships (Chassiakos and Sakellaropoulos 2005). Most of them proposed the problem models by using only one simple type of relationship, Finish-to-Start (FS). However, in practice the planners exploit various types of relationships to get the most suitable project time or resource utilization level. Some relationships between activities can be revised or changed to other types as appropriate. Figure 1 shows a comparison between schedules with all FS relationships and some revised relationships. If some relationships are revised from FS to other types, the activities will have more available float time within the same project makespan. For this reason, they can be shifted with a greater possibility in order to minimize the fluctuation of resource utilization level and this may lead to the better resulting schedules.

This report is proposing a new model of the resource leveling problem with precedence relationship options. This new model as a planning tool can help the planners to determine a suitable type of precedence relationships for a purpose of smoother resource utilization schedule. The problem model was solved by using the genetic algorithm techniques. The literature relevant to the development such as resource constrained project scheduling problem, resource leveling problem, precedence relationships, and genetic algorithm based optimization were reviewed. All mathematical equations of the proposed model were formulated and implemented with spreadsheet software. And the proposed model was verified by using two different sizes of construction projects which were adopted from the literature.

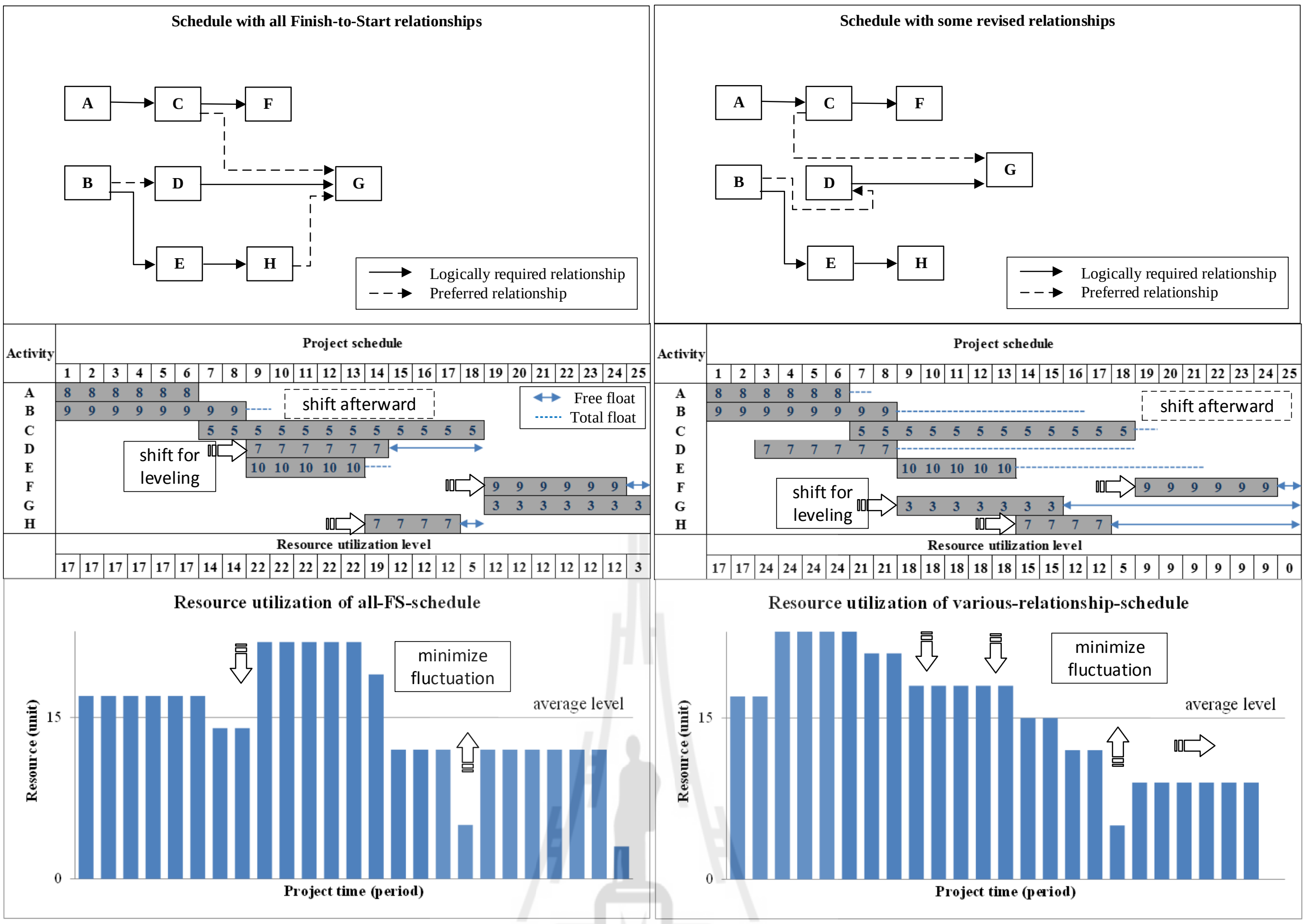


Figure 1. A comparison between schedules with all FS relationships and some revised relationships

2. Project Scheduling Problem with a Consideration of Resources

Construction project schedules are traditionally arranged using the Critical Path Method (CPM) which incorporates the dependent relationships among activities and makes temporal logic calculations. As it is concerned with the time aspect only, the schedule results might be inapplicable because of resource constraints and limited availabilities. A construction project requires different types of resources and these resources are limited in quantity; therefore, the project manager needs to arrange a project schedule of all activities and wisely utilize the required resources to meet the demand. The project resources can be classified into two categories – the consumable resources and the sharable resources. The consumable resources are those used up as the project progresses such as time, materials, and budget. The sharable resources are those used in completing the project activities such as labor, equipment, cash, and working space. The consumable resources can be exploited at any rate throughout the project but not more than the total amount available (Zhang et al. 2006a). As for the sharable

resources, they are occupied for a certain time by an activity and released when finished, and then can be taken up by another different activity. They must be utilized at any time but not more than the total amount available. The demand level of the sharable resources should be uniform in order to utilize these resources effectively. The big fluctuation of the demand increases idle and cost (El-Rayes and Jun 2009), therefore, the sharable resources are related to the project time and required to be scheduled properly.

To solve the problem, the resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) was invented. It is the optimization model that incorporates the project resources availability. RCPSP is a rational technique for the project scheduling because it can simultaneously consider both the activities timetable and the resource allocations. In the RCPSP model, the solution variables are used as the activities' start times and the constraint functions are used as the dependence relationships. Feasible solutions are the combinations of shifting of the activities' start times within their own float times. These feasible solutions then are evaluated with the objective function to find the optimum. The feasible solutions of RCPSP are directly restricted by the precedence relationships. This makes the schedule results may not be good enough as needed. However, some precedence relationships are arbitrarily predefined according to managerial policies, which can be revised occasionally.

A construction project's activity, which represents a unit of control, requires certain amounts of different resources for execution. These quantities are estimated as non-negative and deterministic values. Each activity has its own estimated and non-pre-emptive duration (interruption is not allowed). The total project time is calculated on the assumption that the quantities of resources are infinite and then the schedule is adjusted according to the actual availability of resources. The issues for consideration in making the adjustments are separated into resource allocation and resource leveling. This consideration ensures that the schedule results are applicable and all available resources are utilized effectively and efficiently throughout the project (Ammar and Mohieldin 2002).

2.1 Resource Allocation

Resource allocation is a construction scheduling problem that focuses upon the availability of all project resources. Both consumable and sharable resources are limited in certain quantities. The utilization of all resources cannot exceed their own available quantities. The activities require different types of resources in different amounts. If two activities require

the same type of resource and are scheduled to be accomplished at the overlapping periods, the total demand of this resource will be increased. The sum of consumable resources allocated throughout the project cannot be more than their availabilities. And at any project time, the sharable resources cannot be allocated more than their availabilities (Zhang et al. 2006b).

The resolution approach to this problem targets on the sharable resources. It is to shift the start time of either activity to a different period while maintain the predefined precedence relationships. When they are executed at the different periods, the competition for the same resource can be relieved. This is performed in an attempt to keep the project time to a minimum. As a result, in shifting out the activities, the non-critical activities should be prioritized over the critical activities. The solutions of this scheduling problem are the combinations of all activities' start times in order to prevent the total resources demands from exceeding their own availabilities and to reduce the project time to a minimum (Leu and Yang 1999; Kolisch and Hartmann 2006).

2.2 Resource Leveling Problem

Resource leveling problem (RLP) is a project scheduling problem that focuses upon the fluctuation of the sharable resource utilization levels. This problem also aims to determine all activities' start times which make the resource utilization levels uniform throughout the project. The conditions are to maintain the project time and the precedence relationships and it assumes that the amount of the resources is infinite. When the resource utilization levels become less fluctuated or closer to the average, the number of resources required as well as the project cost can be reduced. The resolution approach is to shift the start time of some activities in order to stabilize the sum of daily resources demand as much as possible (Leu et al. 2000).

The shapes of the fluctuation of the resource utilization level can be inacceptable or undesirable. A rectangular shape is the most acceptable because it implies the most stable level. A mountain (an upside down parabolic) shape is acceptable because it is manageable. The resources demands are gradually rising up and falling down. The resources can be switched from one project to another. On the other hand, other irregular shapes are undesirable because the resources have to be released and refilled according to the wavering level or have to be kept spare at the highest demand. To measure and evaluate the

fluctuation level, some resource leveling metrics are used such as the fluctuation moment (Hegazy 1999), Release and Re-Hire (*RRH*) and Resource Idle Days (*RID*) (El-Rayes and Jun 2009).

Hegazy (1999) proposed the resource leveling model that used the sum of fluctuation moments as the objective function. The sum of fluctuation moments includes two axes - X and Y. The X axis represents the project time whereas the Y axis represents the resource demand.

$$M_x = \sum_{t=1}^{T} R_t^2 \qquad (1)$$

$$M_y = \sum_{t=1}^{T}\big(R_t \times (t-d)\big) \qquad (2)$$

where M_X is the fluctuation moment about X-axis, M_Y is the fluctuation moment about Y-axis, R_t is the resource demand on a period *t*, *d* is the first period the resource employed in the project, and *T* is the project time.

El-Rayes and Jun (2009) proposed another different resource leveling model that used *RRH* and *RID* as the performance measurements. *RRH* is used to quantify the total amount of the resources needed to be temporarily released during the low demand periods and rehired at later stage during high demand periods throughout the project.

$$RRH = H \; - MRD \qquad (3)$$

$$H = (R_1 + \sum_{t}^{T-1}|R_t - R_{t+1}| + R_T)/2 \qquad (4)$$

$$MRD = max(R_1, R_2, \dots, R_T) \qquad (5)$$

where *H* is the total increases in the daily resource demand, *MRD* is the maximum resource demand during the entire project time.

RID is used to quantify the total number of the idle and nonproductive resource-days caused by undesirable resource fluctuations.

$$RID = \sum_{t}^{T}[R_t - min(max(R_1, R_1, \dots, R_t)\,, max(R_t, R_{t+1}, \dots, R_T))] \qquad (6)$$

These resource leveling metrics were created and used as the objective function of the optimization model. Although the smaller values of these metrics mean better resource leveling, they may not reach a minimum all together. When one metric is getting low, another metric is going up. The minimization of M_x and *MRD* tends to push the fluctuation level to get closed to the average level along the project time, which results in a low and flat level of resource demand; whereas, the minimization of M_y pushes the level to the X and Y-axes. And the minimization of *RRH* and *RID* forces the level to be closed to the mountain or rectangular shape.

3. Precedence Relationships

Generally, a construction activity cannot be accomplished at any time on its own but depends on other activities with which it has relationships. These precedence relationships come from the characteristics of the activity. According to the degree of necessity, they can be categorized into two levels (Hinze 2008) - (1) logically required or mandatory relationships and (2) preferred or discretionary relationships. The logically required relationships come from the physical constraints of the construction process that cause some activities to be accomplished in a strict sequence. This level of relationships cannot be avoided or replaced (Project Management Institute 2012). For example, steel-bar-placing activity needs to be finished before the concrete-pouring activity starts. On the other hand, the preferred relationships are loosely enforced. They come from managerial policies in an attempt to take advantage of a situation in many different aspects such as safety, environment, contract, finance, and resources. For example, the interior-decoration activity is set to be finished before the landscaping activity starts although they are at the different locations. The preferred relationships are sometimes reconsidered and revised during the schedule adjustment time to achieve a new target. Hence, these preferred relationships can have different options available for selection.

The planners should be aware of these two levels of relationships because the preferred relationships can be reconsidered and revised occasionally, especially during the project execution and when the remaining work of the project needed to be rescheduled. However, the previous researches and the existing planning software do not have this feature. The planners are left to review these preferred relationships on their own (Hendrickson and Au 1989). Besides, the number of precedence relationships of all activities should be as small as possible because the excessive relationships can restrain some efficient resources-utilization scheduling results.

There are three types of precedence relationship between a pair of activities as follows (Project Management Institute 2012):

(1) Finish-to-Start (FS) is a conditional relationship that enforces an activity to be started only after its predecessor has been finished. FS is a common and a default type which is extensively used in scheduling and in the previous researches.

(2) Start-to-Start (SS) is a conditional relationship that enforces an activity to be started only after its predecessor has already been started.

(3) Finish-to-Finish (FF) enforces an activity to be finished only after its predecessor has already been finished.

In addition, these types of relationships can be applied along with an overlapping or delaying time. An overlapping time is specified with a negative number for a lead time whereas a delaying time is specified with a positive number for a lag time. The equations (7)-(9) are the constraints for the three types of the precedence relationships and are used in the scheduling time calculations.

Finish-to-Start:

Finish-to-Start:

$$ST_i \geq FT_h; \forall h \qquad (7)$$

Start-to-Start:

$$ST_i \geq ST_h; \forall h \qquad (8)$$

Finish-to-Finish:

$$FT_i \geq FT_h; \forall h \qquad (9)$$

where ST_i is the start time of activity *i*, FT_i is the finish time of activity *i*, $\forall h$ is all predecessors of activity *i*.

It is noted that the number and types of precedence relationships have a huge and direct impact on the start and finish times of the activities and consequently the resource utilization level. A reconsideration of a choice of precedence relationships or an initiation of alternatives of these relationships will help the project schedule to be more flexible. This also increases the feasible solutions and a chance to obtain better schedule results from the RLP.

4. Model Formulation

The proposed model of the RLP with precedence relationship options is an optimization model. It consists of three elemental components - solution variables, objective function, and constraint functions. The model also uses the forward and backward pass

calculations to determine the scheduling time of the activities. The details of the components are described as follows:

Solution variables

The values of the solution variables compose a single valid project schedule. The solution variables include the shifting time of each activity (S_i) and the precedence relationship option (X_{ihm}). The shifting time is defined as an amount of time that the activity has been postponed from its earliest start (ES_i). It must be a positive integer or zero. Since the shifting times of activities are the common solution variables of the RLP, the start time (ST_i) of an activity is calculated as follows:

$$ST_i = ES_i + S_i \quad (10)$$

When an activity is shifted, it can directly affect both the predecessors and the successors, and consequently the resource demand level. The earliest start of the activity is determined by the traditional forward pass calculation which depends on the type of the precedence relationships.

As for the precedence relationship option, some relationships between pairs of the activities are allowed to have a choice of types. For example, there are two options of determining the relationship between activity *H* and activity *I*; either Finish-to-Start or Start-to-Start. However, only the “preferred” relationships can have choices according to the planners’ preferences whereas the “logically required” relationships have no choice. This precedence relationship option (X_{ihm}) is a binary variable (its value can be only 0 or 1) and is defined as the selection of the m^{th} option of the relationship between activity *i* and its predecessor *h*. The value 1 represents the option being selected, and the value 0 for that not selected. All options of any relationship are mutually exclusive:

$$\sum_m X_{ihm} = 1 \quad (11)$$

Objective function

The objective function is used to evaluate the fluctuation of the resource demand level. The objective function of the proposed model is set as the minimization of the resource fluctuation moment about the project time axis (M_x). M_x is defined as the sum of squares of the resource demand for each period (R_t) throughout the project (T). This metric is used

because it is very effective and is used by many researchers (Harris 1978, Hegazy 1999, Ponz-Tienda et al. 2013). The smaller M_x will also result in the reduction of required resources throughout the project or the maximum resource demand (*MRD*).

Minimize $(M_x = \sum_{t=1}^{T} R_t^2)$ (12)

Constraints

Constraints are the conditional functions used to specify whether a schedule is feasible. Only schedules that are consistent with constraints are feasible and are further evaluated. Like the traditional resource leveling problem, this model uses the prescribed makespan of the project as a constraint. The maximum of the finish time of activities ($Max(FT_i)$) must not exceed the prescribed makespan of the project (*T*).

$Max(FT_i) \leq T$ (13)

An activity can delay its start to any day within its own available free float.

$S_i \leq FF_i$ (14)

Scheduling time calculations

The scheduling time calculations for the proposed model with precedence relationship options are created. The equations are based on the forward and backward pass calculations. Each activity has six scheduling times - the earliest start (*ES*), the earliest finish (*EF*), the latest start (*LS*), the latest finish (*LF*), the total float (*TF*), and the free float (*FF*). Some equations can be used regardless of relationship types. For any activity *i*, time calculations are as follows:

Forward pass: $EF_i = ES_i + D_i$ (15)

where, D_i is duration of activity *i*. when the activity *i* has the shifting time, the finish time (FT_i) is defined as: $FT_i = EF_i + S_i = ST_i + D_i$ (16)

Backward pass: $LS_i = LF_i - D_i$ (17)

Total Float calculation: $TF_i = (LS_i - ST_i) = (LF_i - FT_i)$ (18)

Some equations for calculating the scheduling times depend on the types of precedence relationships. Besides, the choices of the relationships must be incorporated into the equations. The equations for *ES* on the forward pass, *LF* on the backward pass, and *FF* are

affected and needed to be modified. The following four scenarios are used to illustrate and to generalize the time calculations, given that one relationship is limited to two options.

Case 1: All relationships are Finish-to-Start without option. The FS relationship without option is used as a default type. This is a basic case which involves five activities (G, H, I, J, K) and four FS relationships (without option). Figure 2 shows the network diagram. Activity I has FS relationships with G, H, J, and K. Activity G and H are its predecessors, whereas J and K are its successors. The time calculations for Activity I are:

Forward pass: $ES_I = Max(FT_G, FT_H)$ (19)

Backward pass: $LF_I = Min(LS_J, LS_K)$ (20)

Free Float calculation: $FF_I = Min(ST_J, ST_K) - FT_I$ (21)

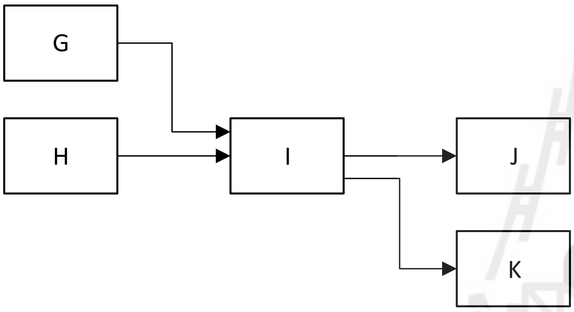


Figure 2. Case of all default FS relationships without option

Case 2: A relationship with options of Finish-to-Start and no-relationship. This case combines one relationship with options and two default relationships. The relationship with options is represented by a thick dash arrow and the default relationships are represented by arrows in Figure 3. There are two options for the relationship between H and I - FS or none. Activity G and H are the predecessors of I, while Activity I and J are the successors of H. X_{IH1}, and X_{IH2} are the binary solution variables for the relationship between Activity H and Activity I; they represent the option 1 (FS) and option 2 (none) respectively. When an option is selected, its variable will be equal to 1 and another one will be zero. These two options are mutually exclusive. *BN* represents a big number compared to the project duration. The time calculations for Activity H and Activity I, which are involved in the relationship with options are as follows:

Forward pass: $ES_I = Max(FT_G, FT_H * x_{IH1})$ (22)

Backward pass: $LF_H = Min(LS_I + BN * x_{IH2}, LS_J)$ (23)

Free Float calculation: $FF_H = Min(ST_I + BN * x_{IH2}, ST_J) - FT_H$ (24)

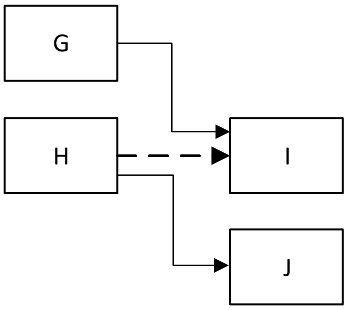


Figure 3. Case of a relationship with options FS and No

Case 3: A relationship with options of Finish-to-Start and Start-to-Start. This case combines one relationship with options and the other two default relationships. Activity G and H are the predecessors of I and Activity I and J are the successors of H. The relationship with options is represented by a thick dash arrow and the default relationships are represented by arrows in Figure 4. There are two options for the relationship between H and I - FS or SS. X_{IH1}, and X_{IH2} are the binary solution variables for the relationship between Activity H and Activity I; they represent the option 1 (FS) and option 2 (SS) respectively. These two options are also mutually exclusive. The time calculations for Activity H and Activity I are as follows:

Forward pass: $ES_I = Max(FT_G, FT_H * x_{IH1}, ST_H * x_{IH2})$ (25)

Backward pass: $LF_H = Min\big(LS_I + D_H + BN * x_{IH1}, LS_I + BN * x_{IH2}, LS_J\big)$ (26)

Free Float calculation: $FF_H = Min\big(ST_I, ST_J\big) - FT_H * x_{IH1} - ST_H * x_{IH2}$ (27)

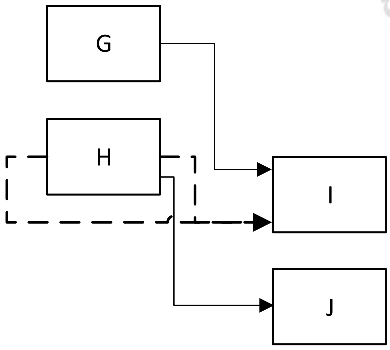


Figure 4. Case of a relationship with options FS and SS

Case 4: A relationship with options of Finish-to-Start and Finish-to-Finish. Likewise, this case combines one relationship with options and the other two default relationships. The relationship with options and the default relationships are represented by a thick dash arrow and solid arrows respectively as shown in Figure 5. In this case, there are two options for the relationship between H and I - FS or FF. X_{IH1}, and X_{IH2} are the binary solution variables for the

relationship between Activity H and Activity I; they represent the option 1 (FS) and option 2 (FF) respectively. The time calculations for Activity H and Activity I are as follows:

Forward pass: $ES_I = Max(FT_G, FT_H - D_I * x_{IH2})$ (28)

Backward pass: $LF_H = Min\left(LS_I + BN * x_{IH2}, LF_I + BN * x_{IH1}, LS_J\right)$ (29)

Free Float calculation: $FF_H = Min\left(ST_I + BN * x_{IH2}, FT_I + BN * x_{IH1}, ST_J\right) - FT_H$ (30)

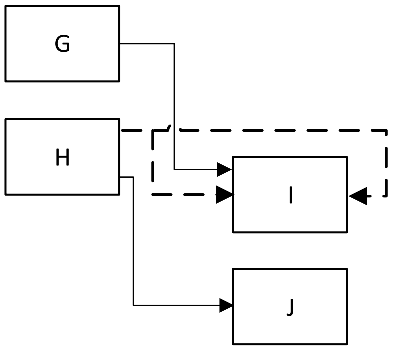


Figure 5. Case of a relationship with options FS and FF

The above equations indicate that the precedence relationship options can be formulated with a help of binary variables and big numbers. When the binary variable that represents the option selection is multiplied by other values, the result can be to keep or to eliminate those values from the equations. Similarly, the product of the binary variable multiplied by a big number and used together with the minimum function (*Min()*) can result in a value relevant to the product that can be kept or eliminated as required. After that, all these mathematical expressions of the model are formulated using common spreadsheet software, Microsoft Excel 2010.

Genetic Algorithm based optimization

The Genetic Algorithm (GA) is selected as the solving algorithm of this model; it is capable of handling both small and large sized optimization problems (Elbeltagi et al. 2005). The solution variables are encoded as permutations of a string of integers. This string of integers are the shifting times of all activities (S_i) and the relationship option selections (X_{ihm}), therefore, each individual string represents a valid and feasible solution. Given that each relationship has no more than two options, only X_{ih1} (for option 1) is included in the string. The total number of activities is equal to *n*.

Individual: $\{S_1, S_2, \ldots, S_i, S_{i+1} \ldots, S_n; X_{121}, X_{131}, \ldots, X_{ih1}, X_{(i+1)(h+1)1} \ \ldots, X_{nm1}\}$

The Genetic Algorithm begins from creating the initial population of some individuals. Then these individuals evolve through many generations by the reproduction process including the crossover and mutation procedures. In the crossover procedure, two healthy individual parents are selected through the probabilistic roulette wheel based on the objective function measure (Goldberg 2006). The two-point crossover is used. One point is chosen randomly within the set of S_i and the other point within the set of X_{ih1}. Then the genes of the two parents are exchanged to produce two offspring. In the mutation procedure, any genes of a chromosome (string) are ramdomly replaced by other valid genes to create a new mutant offspring. After that, all these offspring are evaluated their fitness according to the objective function. Some of them, which are infeasible or weak, are eliminated. Only healthy offspring are kept to fullfill the population of the next generation.

During the model pretest, the suitable values for the GA parameters are determined such as population size = 1000, the two-point crossover rate = 0.5, and the mutation rate = 0.1. The optimization stoping criterion is set to 50 generations. The GA based optimizatoin of this model is implemented with VBA for Excel.

5. Model Verification

The proposed RLP with precedence relationship options is verified with two different projects - small and large sized. Since the contribution of this research is the new breed of the RLP, the benchmark problems are not available. However, the test instances are modified from the previous researches (Liu and Wang 2008, El-Rayes and Jun 2009, Hegazy 1999). The small project consists of 8 activities, whereas the large one consists of 23 activities. These activities require different amounts of one common resource. The details of the small project data are shown in Table 1.

Table 1. Small project data

Activity	Duration (periods)	Resource (units)	Predecessor(s)					
			Option 1			Option 2		
			1	2	3	1	2	3
A	6	8						
B	8	9						
C	12	5	A			-		
D	6	7	B			FF:B		
E	5	10	B			-		
F	6	9	C			-		
G	7	3	C	D	H	SS:C	-	no:H
H	4	7	E			-		

The makespan of the small project is set as 25 periods. The average resource demand is 15 unit per period. An activity can have up to three predecessors and each precedence relationship can have no more than two options. There are a total of 8 relationships between activities. Five of them have only relationship option 1, which is a Finish-to-Start (FS) type. And three of them have the additional option 2 for alternative relationships: the Finish-to-Finish relationship between Activity B and Activity D (represented by FF:B), the Start-to-Start relationship between Activity C and Activity G (SS:C), and the No-relationship between Activity H and Activity G (no:H).

Table 2. An example of time calculations for a schedule with relationships option 2

Activity	X_{ihm}						Schedule time						
	Option 1			Option 2									
	1	2	3	1	2	3	*Si*	ST	FT	LS	LF	TF	FF
A							0	0	6	0	6	0	0
B							0	0	8	7	15	7	0
C							0	6	18	6	18	0	0
D	0			1			0	2	8	11	17	9	0
E							0	8	13	15	20	7	0
F							0	18	24	18	24	0	0
G	0		0	1		1	0	8	15	17	24	9	9
H							0	13	17	20	24	7	7

The large project has much greater possibility to be leveled. Its makespan is 36 periods and its average resource demand is 17.4 unit per period. There are 30 relationships and only three of them have an alternative option 2. The large project data are shown in Table 3.

Table 3. Large project data

Activity	Duration (periods)	Resource (units)	Predecessor(s)					
			Option 1			Option 2		
			1	2	3	1	2	3
A	7	3						
B	2	4						
C	3	6	A					
D	6	5	A			NO:A		
E	3	2	A	B				
F	6	10	B					
G	4	6	C					
H	5	4	D					
I	7	7	E	F				
J	5	11	G					
K	7	3	G					
L	6	2	G					
M	5	10	H					
N	6	6	I			SS:I		
O	1	12	L					
P	3	8	K	M	N			
Q	4	5	N					
R	7	5	H					
S	5	8	J	O				
T	2	3	O	P				
U	3	3	Q	R				
V	7	6	S	T		FF:S		
W	6	5	P	U				

First of all, the time calculation resulting from the proposed Equations (7)-(30) are verified. Since the proposed model uses various types of relationships with options, the calculation is complicated and needed to be verified whether it can provide the correct results consistently. The solution variables are varied to arrange many different schedules. And then, these time calculation results are compared with the ones from the conventional scheduling software, Microsoft Project 2010. From many different settings of both small and large project cases, the proposed model can give the same time calculation results as Microsoft Project 2010. Therefore, it implies that the proposed equations are correct. Table 2 shows an example result of time calculations for the small project.

After that, the concept of the RLP model with precedence relationship options is validated by comparing with the conventional RLP model. Mostly, the scheduling software such as Microsoft Project 2010 has a feature of resource leveling. This tool is based on a heuristic approach and results in one constant solution. Unlike the heuristic approach, the

proposed model uses the GA based optimization with a large amount of feasible solutions to search for the best one. The results may vary with different runtimes. The model is repeatedly optimized for thirty runtimes to generalize the results.

6. Experimental Results

The results of the small project case are shown in Table 4. The solution variables include the shifting time of all 8 activities (S_i) and three relationship option 1 (X_{ih1}). The objective function index is M_X, and the other resource fluctuation indices are *MRD*, *RRH*, and *RID*. The initial solution set before the resource leveling optimization is the as-soon-as-possible schedule with all FS relationships and the value of $(M_x)_{initial}$ is 6237. The first test scenario is that all relationships are FS without option. The model's relationship option 1 (X_{ih1}) is set as a constant = 1. The best solution from different runtimes reduces M_x to 5971. Only Activity D is shifted by 4 periods whereas the other activities stay the same. This implies that the initial schedule is difficult to adjust or has little room for feasibly shifting. The second test scenario is that the model has relationship options. The best solution shows that the schedule is intensively adjusted. It prefers the relationship option 2 or the alternative relationships to the default FS ones. As a result, many activities have more float time and can be shifted further in order to stabilize the resource demand. It can reduce M_x to 5767, which is better. If we compare these two scenarios based on the same ideal resource demand which lies evenly and horizontally at the average level ($(M_x)_{ideal}$ = 5625), the first scenario gives 43.5% reduction whereas the second gives a much more 76.8% reduction.

$$\%Reduction = \frac{(M_x)_{initial} - (M_x)_{best}}{(M_x)_{initial} - (M_x)_{ideal}} \times 100 \qquad (31)$$

Table 4. Results of the small project case

Variables	Initial solution	All FS without option Best solution	Relationships with options Best solution
S_A	0	0	0
S_B	0	0	0

S_C	0	0	0
S_D	0	4	6
S_E	0	0	6
S_F	0	0	1
S_G	0	0	0
S_H	0	0	2
X_{DB1}	1	1	0
X_{GC1}	1	1	0
X_{GH1}	1	1	0
M_x	6237	5971	5767
MRD	22	22	18
RRH	10	3	9
RID	13	14	47

Table 5 displays the optimization results of the large project case. It has a total of 23 shifting time variables (S_i) for each activity and three varibles of the relationship option 1 (X_{ih1}). The GA based optimization is also set as the minimization of M_x. The initial solution of $(M_x)_{initial}$ is 13642 and the best solution of M_x, which is the first test scenario in which all FS relationships without option are applied, is 12520. This scenario can give 41.8% reduction of M_x, based on the ideal resource demand of this case ($(M_x)_{ideal}$ = 10955). In the second test scenario, the relationships with options are applied. The best solution takes all alternative relationship options 2 and employs more and longer shifting times than that of the first scenario. The result is M_x = 11208, which is a stagerring 90.8% reduction. This means that the best solution can stabilize the resource demand very close to the horizontal average level. The maximum resource demand (*MRD*) of the best solution decreases in the same direction as M_x but neither for *RRH* nor for *RID*. Histograms of the resource demand levels of these solutions are compared and shown in Figure 6.

Table 5. Results of the large project case

Variables	Initial solution	All FS without option Best solution	Relationships with options Best solution
S_A	0	0	0
S_B	0	0	0
S_C	0	0	0
S_D	0	0	0
S_E	0	0	1
S_F	0	0	0
S_G	0	0	0

S_H	**0**	**0**	**0**
S_I	**0**	**0**	**3**
S_J	**0**	**0**	**12**
S_K	**0**	**3**	**2**
S_L	**0**	**0**	**0**
S_M	**0**	**0**	**0**
S_N	**0**	**0**	**2**
S_O	**0**	**3**	**2**
S_P	**0**	**0**	**0**
S_Q	**0**	**0**	**1**
S_R	**0**	**1**	**9**
S_S	**0**	**0**	**0**
S_T	**0**	**0**	**1**
S_U	**0**	**0**	**0**
S_V	**0**	**0**	**0**
S_W	**0**	**0**	**0**
X_{DA1}	**1**	**1**	**0**
X_{NI1}	**1**	**1**	**0**
X_{VS1}	**1**	**1**	**0**
M_x	**13642**	**12520**	**11208**
MRD	**37**	**32**	**22**
RRH	**27**	**15**	**23**
RID	**64**	**50**	**73**

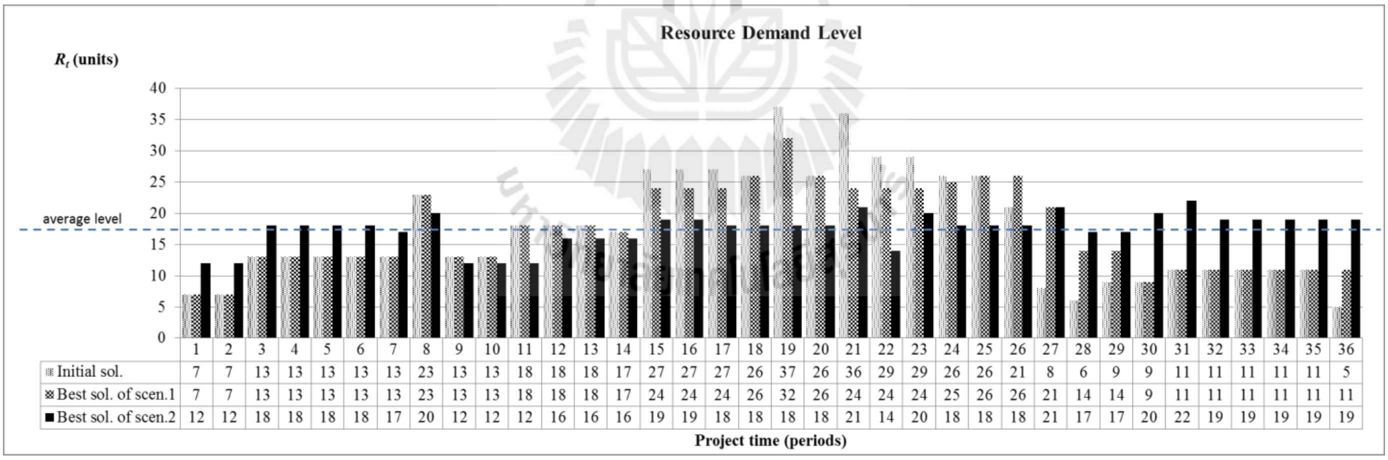


Figure 6. Histograms of resource demand level of initial, scenario 1, and 2 solutions.

Although only some relationships can have an option, the optimal solutions mostly prefer the option 2, which creates longer floats, to the option 1. In both sizes of the project cases, it is indicated that floats are necessary for arranging an efficient resource utilization schedule conforming to desirable shapes. Therefore, the proposed RLP model potentially gives better results than the traditional one. Even if the results of RLP are problem dependent,

the proposed model ensures that its results are definitely at least as good as that of the traditional one.

7. Conclusions

The research reported on this paper is aimed to develop a new resource leveling problem with a capability of precedence relationship options. Since one important task of project management is to efficiently utilize sharable resources throughout the project duration, the resource leveling problem receives attention of many researches. However, most existing researches focus on the problem solving methodology, the performance metrices, and the integration of resources while pay little regard to the precedence relationships. As a result, The conventional RLP is constrained by the predefined relationships and the effective resource utilization schedules may not be obtained. And various types of relationships have not been used although they have direct impact on the flexibility of the schedule.

Hence, this research initiates precedence relationship options for the resource leveling problem using Genetic Algorithm based optimization. Relationship options are included in a set of solution variables, apart from the activities' shifting times. Various relationship types such as Finish-to-Start, Start-to-Start, Finish-to-Finish, with lag and lead time, and no-relationship can be the alternatives for any preferred relationships as appropriate. Scheduling time calculations need to be reformulated as indicated in the equations (7) to (30). The resource fluctuation moment about time axis (M_x) is used as the objective function that stabilizes the resource demand to the average level. A constraint of this problem is set as the prescribed project makespan. The proposed model is implemented with Excel and VBA code for the GA based optimization process. Finally, the model is verified with small and large sized projects. The results show that the RLP with relationship options give better schedules than the one without relationship options. The options which create more float time are more likely to be selected and then activities have greater room to be shifted; therefore, the resource demand level can be more stabilized. This contribution leads to a new direction of the project scheduling. This RLP with relationship options can assist the project managers in practice when they have to adjust the schedule and to select a suitable type of relationships.

Future research efforts can be directed towards the application of some other special time constraints such as the relationships with lag or lead time, as-soon-as-possible, as-late-as-possible, must-start-on, must-finish-on, start-not-earlier-than, etc. This will generalize and

enhance the applicability of the model to cover most practical types of precedence relationships which can affect the resource demand level. In addition, the future development can apply the concept of relationship options to other project scheduling problems such as time-cost tradeoff, resource allocation, and cash-flow management since the preselected precedence relationships have direct impact on the project schedule. Moreover, other optimization algorithms such as particle swam and ant colony algorithms can be examined as well.

References

Alsayegh, H. and Hariga, M. (2012). "Hybrid meta-heuristic methods for the multi-resource leveling problem with activity splitting." *Automation in Construction*, 27(10), 89–98.

Ammar, M.A. and Mohieldin, Y.A. (2002). "Resource constrained project scheduling using simulation." *Construction Management and Economics*, 20(4), 323–330.

Chassiakos, A.P. and Sakellaropoulos, S.P. (2005). "Time-cost optimization of construction projects with generalized activity constraints." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(10), 1115-1124.

Elbeltagi, E., Hegazy, T. and Grierson, D. (2005). "Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms." *Advanced Engineering Informatics*, 19(1), 43–53.

El-Rayes, K. and Jun, D.H. (2009). "Optimizing Resource Leveling in Construction Projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(11), 1172–1180.

Goldberg, D.E. (2006). *Genetic Algorithms*, Pearson Education India.

Harris, R.B. (1978). *Precedence and arrow networking techniques for construction*, New York: Wiley.

Hegazy, T. (1999). "Optimization of Resource Allocation and Leveling Using Genetic Algorithms." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(3), 167–175.

Hendrickson, C., and Au, T. (1989). “Project Management for Construction.” Prentice-Hall, New York.

Hinze, J. (2008). *Construction planning and scheduling*, 3rd Edition, Pearson Prentice Hall.

Jun, D.H. and El-Rayes, K. (2011). "Multiobjective Optimization of Resource Leveling and Allocation during Construction Scheduling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(12), 1080–1088.

Kolisch, R. and Hartmann, S. (2006). "Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update." *European Journal of Operational Research*, 174(1), 23–37.

Leu, S.S. and Yang, C.H. (1999). "GA-Based Multicriteria Optimal Model for Construction Scheduling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(6), 420–427.

Leu, S.S., Yang, C.H. and Huang, J.C. (2000). "Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application." *Automation in Construction*, 10(1), 27–41.

Liu, S.S. and Wang, C.J. (2008). "Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow." *Automation in Construction*, 17(8), 966–974.

Ponz-Tienda, J.L., Yepes, V., Pellicer, E., and Moreno-Flores, J. (2013). "The Resource Leveling Problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm." *Automation in Construction*, 29(14), 161–172.

Project Management Institute. (2013). A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK(R) Guide, Fifth Edition.

Tang, Y., Liu, R. and Sun, Q. (2014). "Two-Stage Scheduling Model for Resource Leveling of Linear Projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(7),

Zhang, H., Li, H. and Tam, C.M. (2006a). "Particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling." *International Journal of Project Management*, 24(1), 83–92.

Zhang, H., Tam, C.M. and Li, H. (2006b). "Multimode Project Scheduling Based on Particle Swarm Optimization." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(2), 93–103.

เอกสารอ้างอิง

Ammar, M. A, and Y. A Mohieldin. 2002. “Resource Constrained Project Scheduling Using Simulation.” *Construction Management and Economics* 20 (4): 323–30.

Bean, J. C. 1994. “Genetic Algorithms and Random Keys for Sequencing and Optimization.” *ORSA Journal on Computing* 6 (2): 154–60.

Chan, Weng-Tat, David K. H. Chua, and Govindan Kannan. 1996. “Construction Resource Scheduling with Genetic Algorithms.” *Journal of Construction Engineering and Management* 122 (2): 125–32. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1996)122:2(125).

Chassiakos, A. P, and S. P Sakellaropoulos. 2005. “Time-Cost Optimization of Construction Projects with Generalized Activity Constraints.” *Journal of Construction Engineering and Management* 131: 1115.

Chen, P. H, and H. Weng. 2009. “A Two-Phase GA Model for Resource-Constrained Project Scheduling.” *Automation in Construction* 18 (4): 485–98.

Elbeltagi, Emad, Tarek Hegazy, and Donald Grierson. 2005. “Comparison among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms.” *Advanced Engineering Informatics* 19 (1): 43–53. doi:10.1016/j.aei.2005.01.004.

Ellis, R., and J. Kim. 2005. “Development of a Resource Scheduling Model Using Optimization.” In *Construction Research Congress 2005*, 1–10. American Society of Civil Engineers.

El-Rayes, Khaled, and Dho Heon Jun. 2009. “Optimizing Resource Leveling in Construction Projects.” *Journal of Construction Engineering and Management* 135 (11): 1172–80. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000097.

Feng, C. W, L. Liu, and S. A Burns. 2000. “Stochastic Construction Time-Cost Trade-off Analysis.” *Journal of Computing in Civil Engineering* 14: 117.

Harris, Robert Blynn. 1978. *Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction*. Wiley.

Hegazy, Tarek. 1999. “Optimization of Resource Allocation and Leveling Using Genetic Algorithms.” *Journal of Construction Engineering and Management* 125 (3): 167–75. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:3(167).

Hegazy, Tarek, and Tolga Ersahin. 2001. “Simplified Spreadsheet Solutions. I: Subcontractor Information System.” *Journal of Construction Engineering and Management* 127 (6): 461–68. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2001)127:6(461).

Hendrickson, Chris, and Tung Au. 1989. *Project Management for Construction: Fundamental Concepts for Owners, Engineers, Architects, and Builders*. Chris Hendrickson.

Hinze, Jimmie. 2008. *Construction Planning and Scheduling*. Pearson Prentice Hall.

Institute, Project Management. 2012. *PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE 5TH Edition {A Guide to the Project Management Body of Knowledge}: PMBOK(R) Guide by Project Management Institute*. 5 edition. Project Management Institute.

Kolisch, Rainer, and Sönke Hartmann. 2006. “Experimental Investigation of Heuristics for Resource-Constrained Project Scheduling: An Update.” *European Journal of Operational Research* 174 (1): 23–37. doi:10.1016/j.ejor.2005.01.065.

Leu, Sou-Sen, and Chung-Huei Yang. 1999. “GA-Based Multicriteria Optimal Model for Construction Scheduling.” *Journal of Construction Engineering and Management* 125 (6): 420–27. doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:6(420).

Leu, Sou-Sen, Chung-Huei Yang, and Jiun-Ching Huang. 2000. “Resource Leveling in Construction by Genetic Algorithm-Based Optimization and Its Decision Support System Application.” *Automation in Construction* 10 (1): 27–41. doi:10.1016/S0926-5805(99)00011-4.

Liu, Shu-Shun, and Chang-Jung Wang. 2008. “Resource-Constrained Construction Project Scheduling Model for Profit Maximization Considering Cash Flow.” *Automation in Construction* 17 (8): 966–74. doi:10.1016/j.autcon.2008.04.006.

Oracle. 2009. *Oracle Primavera® P6™ Project Management Reference Manual Version 7.0*. Vol. 2009.

Stover, Teresa S. 2010. *Microsoft Project 2010 inside out*. Sebastopol, Calif.: O’Reilly.

Zhang, H., X. Li, H. Li, and F. Huang. 2005. “Particle Swarm Optimization-Based Schemes for Resource-Constrained Project Scheduling.” *Automation in Construction* 14 (3): 393–404.

Zhang, Hong, C. M. Tam, and Heng Li. 2006. “Multimode Project Scheduling Based on Particle Swarm Optimization.” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 21 (2): 93–103. doi:10.1111/j.1467-8667.2005.00420.x.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชื่อสกุล : ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร (Dr. Vacharapoom Benjaoran)

ตำแหน่ง : รองศาสตราจารย์

ที่อยู่หน่วยงานที่ติดต่อได้ : สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย

อ.เมืองจ.นครราชสีมา30000

โทรศัพท์ 044-224172, โทรสาร 044-224607

E-mail: vacharapoom@sut.ac.th

ประวัติการศึกษา :

2005 – Doctor of Philosophy in Construction Management and IT,

School of Science and Technology, University of Teesside, Middlesbrough, UK.

2002 –Master of Engineering in Construction Engineering and Management,

School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

1997 – Bachelor of Engineering in Civil Engineering Program,

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รางวัล :

2002 – Research Studentship to pursue PhD in Construction Management and IT at

School of Science and Technology, University of Teesside, UK.

2002 – Mahesh Varma Prize awarded for the most outstanding academic

performance among graduating master's students in Construction Engineering

and Management Program.

2000 – AIT-STAR Foundation full scholarship to pursue Master’sDegree

at School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand.

1997 – Second Honour, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

ประสบการณ์ทำงาน :

2007 to present Full-time lecturer, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

2005 – 2007 Full-time lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand.

2002 – 2005 Research Assistant, Centre for Construction Innovation and Research (CCIR), University of Teesside, Middlesbrough, UK.

1997 – 2000 Civil Engineer, Italian-Thai Development Public Company Limited, Bangkok, Thailand.

หัวข้อวิจัยที่สนใจ :

- Artificial intelligence, optimization, simulation, visualization and process modeling;
- Information and communication technology for construction industry;
- Cost accounting and control;
- Material waste reduction;

ผลงานทางวิชาการ :

[1] Benjaoran, V. and Tabyang, W. (2014) "Construction Resource-constrained Scheduling with Alternative Relationships Compared with the Conventional Method" Proceeding of the 2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials, 23-25 September 2014, Yogyakarta, Indonesia.

[2] Benjaoran, V. and Bhokha, S. (2014) "Three-step Solutions for Cutting Stock Problem of Construction Steel Bars" KSCE Journal of Civil Engineering, 18(5), 1239-1247.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[3] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2013) "Trim Loss Minimization for Construction Reinforcement Steel with Oversupply Constraints" Proceeding of 2013 4th International Conference on Construction and Project Management, 1-3 September 2013, Beijing.

[4] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2013) "Cutting Pattern Generation for Reinforcement Bars using Intensive Search Algorithm" Proceeding of The Thirteenth East Asian-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 11-13 September 2013, Sapporo.

[5] Benjaoran V., and Intarasap A. (2013). "Hospital renovation construction project scheduling with special relationships" ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability - Proceedings of the 2013 International Conference on Construction and Real Estate Management, pp. 258-270.

[6] Benjaoran, V. (2011) "A Consideration of Precedence Relationships as Decision Variables in Construction Scheduling Model" Proceedings of the 2011 International Conferences on Construction and Real Estate Management, pp. 84-87, 19-20 November 2011, Guangzhou, China.

[7] Benjaoran, V. and Sae-Tae, N. (2011) "Time-Cost Trade-off Scheduling under Construction Labor Resource Constraints." Suranaree Journal of Science and Technology, 18(1), 29-39.

[8] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2010) "An Integrated Safety Management with Construction Management Using 4D CAD Model." Safety Science, 48(3), 395-403.

[9] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2009) "Enhancing visualization of 4D CAD model compared to conventional methods." Engineering, Construction and Architectural Management, 16(4), 392-408.

[10] Benjaoran, V. (2009) "A cost control system development: A collaborative approach for small and medium-sized contractors." International Journal of Project Management, 27(3), 270-277.

[11] Benjaoran, V. (2008) "A development of a cost control system for small and medium-sized contractors." Suranaree Journal of Science and Technology, 15(1), 1-11.

[12] Benjaoran, V. and Dawood, N. (2006) "An intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products." Automation in Construction, 15(6), 737-745.

[13] Benjaoran, V. and Dawood, N. (2006) "Integration of 4D Visualization Plans with Construction Safety Requirements" Journal of Research in Engineering and Technology, 3(2), 95-106 (A Publication of Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand).