รหัสโครงการ **SUT7-712-53-24-15**

รายงานการวิจัย

การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างด้วยการกำหนดเวลาและต้นทุนที่เหมาะสม

(Construction Scheduling and Controlling with Time-Cost Optimization)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ **SUT7-712-53-24-15**

รายงานการวิจัย

การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างด้วยการกำหนดเวลาและต้นทุนที่เหมาะสม

(Construction Scheduling and Controlling with Time-Cost Optimization)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณพ.ศ. 2553-4

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2554

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากปราศจากการสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัยด้วยเงินงบประมาณจากสำนักงบประมาณ (ผ่านการพิจารณาจัดสรรโดยคณะกรรมวิจัยแห่งชาติ) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2553 และ 2554 และความร่วมมือจากผู้บริหารและพนักงานของบริษัทก่อสร้างที่สนับสนุนข้อมูลที่สำคัญในการวิจัย คณะผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

คณะผู้วิจัย

กันยายน 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานก่อสร้างเป็นงานแบบโครงการที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ทรัพยากรหลักของโครงการก่อสร้าง (Common project resources) ได้แก่ เวลา ต้นทุน วัสดุ แรงงาน/เครื่องจักร และเงินสด การบริหารโครงการก่อสร้างจึงมีหน้าที่สำคัญที่ต้องวางแผนและควบคุมการใช้ทรัพยากรหลักเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตามทรัพยากรหลักเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างกันอยู่อย่างซับซ้อนทั้งโดยตรงและโดยอ้อม การเปลี่ยนแปลงของจำนวนทรัพยากรหลักประเภทใดประเภทหนึ่งจะส่งผลต่อความต้องการใช้ทรัพยากรหลักประเภทอื่นๆ การวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเทคนิคการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง (Construction scheduling problems) ที่สามารถบูรณาการเงื่อนไขด้านทรัพยากรหลักของโครงการก่อสร้าง เรียกว่า Integrated Common Resource Project Scheduling Problem (ICRPSP) ตัวแปรตัดสินใจของโมเดลประกอบด้วย กลุ่มตัวแปรเวลาเลื่อน (Shifting time) ของกิจกรรมใดๆ และกลุ่มการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource combinations) และมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายวัตถุประสงค์ย่อย (Multi-objective functions) เพื่อใช้ชี้วัดเป้าหมายหลายด้านพร้อมกัน คือ กลุ่มด้านต้นทุนทั้งหมดของโครงการ (Total project cost: TC) และกลุ่มด้านระดับการจัดสรรทรัพยากร (Resource fluctuation) นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันข้อจำกัดแบ่งหลายกลุ่มตามประเภทของทรัพยากรหลัก ได้แก่ เวลา ทรัพยากรดำเนินงาน และวงเงินเครดิต และข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมก่อสร้าง

จากนั้นจึงได้พัฒนาโมเดลบนโปรแกรมสำนักงานพื้นฐาน Microsoft Excel ที่สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก โดยใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบ Genetic Algorithms ซึ่งเป็นวิธีประสิทธิภาพดีเหมาะสำหรับโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนเช่น ICRPSP นี้ โมเดล ICRPSP ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ได้ถูกนำมาทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบได้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ ICRPSP ในการนำมาใช้เพื่อช่วยการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้าง โดยจะเป็นเครื่องมือสำหรับประเมินค่าจำนวนทรัพยากรหลักประเภทต่างๆเพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมเท่าที่จำเป็นต้องใช้ได้ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าการพิจารณาวางแผนทรัพยากรหลักเฉพาะที่คู่ใดคู่หนึ่ง เป็นการละเลยผลกระทบที่มีต่อทรัพยากรหลักอื่นที่ไม่ได้ถูกพิจารณาในคราวนั้นได้ แผนงานที่ได้จึงไม่สมเหตุสมผล ซึ่งไม่เกิดกับแผนงานคำตอบที่ได้จากโมเดล ICRPSP ผลลัพธ์ของการวิจัยนี้จึงทำให้ได้วิธีในการโมเดลปัญหาแผนงานโครงการก่อสร้างเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรโครงการต่างๆและทำให้ได้แผนงานคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อนำไปใช้ควบคุมและดำเนินการโครงการต่อไป

คำสำคัญ : การวางแผนและการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง, การควบคุมโครงการ, การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด, ทรัพยากรโครงการก่อสร้าง, ข้อจำกัดทางทรัพยากร, การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน

Abstract

Construction is a project-based type of work with limited resources. Common construction project resources are such as time, budget, materials, labour/equipment and cash. Construction project management is to plan and control the utilization of these common resources effectively. However, the requirements of these common resources have some complex and both direct and indirect interrelationships. The demand of one type of common resources can affect the demand of the other ones. This research aims to develop a new construction scheduling problem model which can integrate all common resource constraints. It is entitled as Integrated Common Resource Project Scheduling Problem (ICRPSP). Decision variables are Shifting-time of activities and Work resource combinations. The objective function is multi-criteria to evaluate Total project cost and Resource fluctuation. Constraint functions include Time, Work resources, Credit limit, and Precedent relationships.

ICRPSP was programmed with spreadsheet software, Microsoft Excel, which was widely used. Genetic Algorithms was used as an optimization tool for the problem model because GA was powerful and suitable for a complex model. Then ICRPSP was tested. The results showed that ICRPSP could be used as a construction planning and scheduling tool. It helps assess and determine the optimal quantities of all common resources. Besides, the results indicated that the resource-constrained scheduling model which partly considered only a couple of resources (not all at onece) could give an impractical plan. This is because the considered resources could affect the other unconcerned ones. ICRPSP improves and gives a sensible plan which all common resource constraints are considered. This construction plan, therefore, can allocate all common resources more effectively and efficiently. It is implemented to control a construction project successfully.

Keywords: Construction planning and scheduling, Project control, Optimization modeling, Construction resources, Resource constraints, Time-cost trade-off

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ช
บทคัดย่อ ..... ซ
Abstract ..... ฌ
สารบัญ ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฐ
สารบัญตาราง ..... ณ
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 การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง 8
2.1 หลักการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง 8
2.1.1 การวางแผนงานก่อสร้าง 8
2.1.2 การควบคุมงานก่อสร้าง 12
2.2 โมเดลปัญหาการวางแผนงาน 14
2.2.1 การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน 16
2.2.2 การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด 25
2.2.3 การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร 26
2.2.4 กระแสเงินสดกับวงเงินเครดิต 29
2.2.5 เงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม 34
2.2.6 การบูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผน 37
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมโครงการ 38
2.4 วิธีการหาคำตอบของโมเดลปัญหา 39
2.4.1 Constraint programming 40
2.4.2 Simulation 43
2.4.3 Genetic algorithms 44
2.4.4 Tabu-search 48

2.4.5 Particle swarm algorithm 51
2.4.6 Ant Colony Algorithms 55
2.4.7 Shuffled Frog Leaping Algorithm 59
2.5 สภาพการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างของไทย 60
2.5.1 การเตรียมการสำรวจ 60
2.5.2 วิธีสำรวจ 61
2.5.3 ผลการเก็บข้อมูล 62
2.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล 67
2.6 สรุปการทบทวนวรรณกรรม 68
2.6.1 บทวิจารณ์ลักษณะโมเดลปัญหา 70
2.6.2 บทวิจารณ์วิธีการหาคำตอบ 73
2.6.3 บทวิจารณ์สภาพการวางแผนและควบคุมของไทย 74
บทที่ 3 โมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการการบริหารทรัพยากรโครงการ 75
3.1 แนวคิดและหลักการ 75
3.2 สมการของโมเดลปัญหา ICRPSP 78
3.3 การสร้างโมเดลด้วย Spreadsheet 81
3.3.1 ข้อมูลนำเข้า 82
3.3.2 ตัวแปรตัดสินใจ 84
3.3.3 การคำนวณแผนงานโครงการ 85
3.3.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 86
3.4 วิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ 86
3.5 การทดสอบ 90
3.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล 96
3.6.1 ประเด็นที่ 1 ผลของคำตอบเริ่มต้น (Initial Solutions) 97
3.6.2 ประเด็นที่ 2 ผลของข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญาของโครงการ (Contract time) 98
3.6.3 ประเด็นที่ 3 ผลของข้อจำกัดด้านจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource limit) ..100
3.6.4 ประเด็นที่ 4 ผลของข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิต (Credit limit) 103
3.6.5 ประเด็นที่ 5 ผลของการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective function weighting) 106
3.7 สรุปผลการพัฒนา 108
บทที่ 4 บทสรุป 111
4.1 สรุปผลการวิจัย 111

4.2 ข้อจำกัด 113
4.3 ข้อเสนอแนะ 113
4.4 ผลลัพธ์ 114
เอกสารอ้างอิง 115
ภาคผนวก 1 119
ภาคผนวก 2 123
ผลการทดสอบโมเดล 123
ประวัตินักวิจัย 137

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ภาพรวมของการควบคุมงานโครงการก่อสร้าง 14
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัด (Hillier 2001) 17
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์แบบไม่ต่อเนื่องระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัด (Feng, L Liu, and Burns 2000) 17
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับเวลาของโครงการ (PH Chen and Weng 2009) 18
รูปที่ 2.5 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใดๆที่ไม่ซ้อนเหลื่อมกัน (Feng, L Liu, and Burns 2000) 20
รูปที่ 2.6 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใดๆที่ซ้อนเหลื่อมกัน (Feng, L Liu, and Burns 2000) 20
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการกระจายความน่าจะเป็นของระยะเวลาและต้นทุนโครงการที่เป็นคำตอบ 2 คำตอบ (Feng, L Liu, and Burns 2000) 21
รูปที่ 2.8 ฟัซซี่เซ็ตของ “ประมาณ 20” (Zheng and Ng 2005) 22
รูปที่ 2.9 ระยะเวลาฟัซซี่ของกิจกรรมในแบบปกติและเร่งรัด (SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001) 23
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนของกิจกรรม (SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001) 23
รูปที่ 2.11 ระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนฟัซซี่ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรม (Zheng and Ng 2005) 24
รูปที่ 2.12 ต้นทุนฟัซซี่ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรมที่ α-cut level 24
รูปที่ 2.13 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและการแทนค่าตัวแปร 28
รูปที่ 2.14 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและการแทนค่าตัวแปร 29
รูปที่ 2.15 ลักษณะ Profile ของกระแสเงินสด (ไม่รวมดอกเบี้ย) ของโครงการก่อสร้าง (Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005) 32
รูปที่ 2.16 ลักษณะ Profile ของกระแสเงินสด (รวมดอกเบี้ย) ของโครงการก่อสร้าง (Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005) 33
รูปที่ 2.17 แผนภาพขั้นตอนของ Constraint programming optimization 42
รูปที่ 2.18 สายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทนโครโมโซม (Chan, Chua, and Kannan 1996) 45

รูปที่ 2.19 ปฏิบัติการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่เพื่อให้ได้รุ่นลูก (Chan, Chua, and Kannan 1996) 45
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างแสดงการ Swap Move (a) C-C (b) NC-NC (c) C-NC (d) NC-C (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008) 49
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างลักษณะการบันทึกความจำของ Tabu List (a) Swap Move (b) Insert Move (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008) 50
รูปที่ 2.22 การเข้ารหัส particle แบบ Priority-based representation 53
รูปที่ 2.23 การเข้ารหัส particle แบบ Permutation-based representation 54
รูปที่ 2.24 การเข้ารหัส particle แบบ Priority and resource-based representation 54
รูปที่ 2.25 การค้นหาระยะทางสั้นที่สุดระหว่างรังกับแหล่งอาหารของพวกมด (Dorigo, Maniezzo, and Colorni 1996)..... 56
รูปที่ 2.26การเข้ารหัส “ตัวมด” เป็นคำตอบ (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005) 57
รูปที่ 2.27 กระบวนการทั่วไปของการวางแผนโครงการของบริษัทก่อสร้างในประเทศไทย..... 66
รูปที่ 3.1 ประเภททั่วไปของทรัพยากรหลักของโครงการ..... 75
รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนเริ่มต้นของการวางแผนโครงการ..... 76
รูปที่ 3.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักประเภทต่าง ๆ..... 77
รูปที่ 3.4 โมเดลปัญหา ICRPSP ที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel 81
รูปที่ 3.5 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง 83
รูปที่ 3.6 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านเงื่อนไขทางการเงิน 83
รูปที่ 3.7 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านขีดจำกัดของทรัพยากรหลักของโครงการ..... 84
รูปที่ 3.8 ส่วนตัวแปรตัดสินใจ 84
รูปที่ 3.9 ส่วนการคำนวณแผนงานโครงการ 85
รูปที่ 3.10 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 86
รูปที่ 3.11 หน้าต่างแสดงโปรแกรม Evolver ของ Palisade Corp. 87
รูปที่ 3.12 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว 87
รูปที่ 3.13 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของโมเดล..... 88
รูปที่ 3.14 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size ของ GAs..... 89
รูปที่ 3.15 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการจบ Runtime 89
รูปที่ 3.16 ตารางข้อมูลโจทย์ปัญหาโครงการตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 91
รูปที่ 3.17 ตารางข้อมูลโจทย์ด้านเงื่อนไขทางการเงิน..... 91
รูปที่ 3.18 แผนภาพเน็ตเวิร์คของกิจกรรมของโครงการก่อสร้าง 92

รูปที่ 3.19 แผนภาพ Effect of Initial Solutions ที่มีต่อค่า Total Score 97
รูปที่ 3.20 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า Total Score 98
รูปที่ 3.21 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า MRD และ RRH 99
รูปที่ 3.22 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า Max.OD.,และ Total Cost 99
รูปที่ 3.23 แผนภาพ Effect of Resources R1, R2 ที่มีต่อค่า Total Cost และ Total Score 101
รูปที่ 3.24 แผนภาพ Effect of Resources R1, R2 ที่มีต่อค่า Project Time, MRD, RRH, และ RID 102
รูปที่ 3.25 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Total Cost และ Total Score 104
รูปที่ 3.26 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Project Time, MRD และ RRH 105
รูปที่ 3.27 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Max.Overdraft 106
รูปที่ 3.28 แผนภาพ Effect of Multi-objective function weighting ที่มีต่อค่า Max. Overdraft และ Total Cost 107
รูปที่ 3.29 แผนภาพ Effect of Multi-objective function weighting ที่มีต่อค่า Project Time, MRD, และ RRH..... 108

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แผนงานโครงการวิจัย 6
ตารางที่ 2 ข้อมูลขั้นตอนการวางแผนงาน..... 62
ตารางที่ 3 ข้อมูลขั้นตอนการติดตามและควบคุม 64
ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่ผ่านมา. 68
ตารางที่ 5 ประเด็นการทดสอบโมเดล ICRPSP 93

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานก่อสร้างเป็นงานโครงการที่ต้องอาศัยระยะเวลาและใช้ทรัพยากรจำนวนมาก การวางแผนและควบคุมด้วยการจัดตารางเวลางานก่อสร้างเป็นขั้นตอนที่สำคัญยิ่งในการบริหารโครงการให้ประสบผลสำเร็จ โดยมีเป้าหมายอยู่ที่การหาขั้นตอนวิธีการดำเนินงานที่เหมาะสมที่ทำให้โครงการเสร็จสมบูรณ์ได้ภายในระยะเวลาที่กำหนดและด้วยต้นทุนที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม โครงการก่อสร้างในประเทศกำลังพัฒนามักประสบกับสภาวะต้นทุนเกินงบและความล่าช้า ซึ่งจากงานวิจัยเชิงสำรวจในประเทศไทย (Toor and Ogunlana, 2008) พบว่าสาเหตุสำคัญของความล่าช้าคือความไม่มีประสิทธิภาพในการวางแผนและการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง (planning and scheduling deficiencies) และความไม่สมเหตุผลของแผนงาน (unrealistic project schedule) งานวิจัยของ Iyer และ Jha (2006) ที่สำรวจถึงปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จและความล้มเหลวตามแผนงานของงานก่อสร้างในอินเดีย (กลุ่มประเทศกำลังพัฒนา) ก็ได้พิจารณารวมถึงปัจจัยทางด้านความสามารถและความใส่ใจของผู้จัดการโครงการในการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างและการใช้เทคนิคที่เหมาะสมเพื่อการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง

เป็นเวลานานกว่า 60 ปีแล้วตั้งแต่ Critical Path Method (CPM) ได้ถูกคิดค้นขึ้น มีข้อวิจารณ์มากมายต่อการใช้ CPM เพียงอย่างเดียวว่ายังไม่ดีเพียงพอ จึงได้พัฒนาเทคนิคต่างๆขึ้นมาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการวางแผนงานก่อสร้าง สามารถแบ่งเป็นกลุ่มเทคนิคได้เป็น time-cost trade-off, resource allocation, และ resource leveling เพื่อการวางแผนให้โครงการก่อสร้างมีทั้งระยะเวลาและต้นทุนน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของบริษัทก่อสร้าง สำหรับปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างนั้นเนื่องจาก โครงการจะมีทรัพยากรที่จำกัด และทรัพยากรโครงการจะถูกจัดสรรใช้ตามกำหนดเวลาการดำเนินงานกิจกรรมก่อสร้างต่างๆและต้องการใช้เป็นระยะเวลาต่างๆกัน การใช้ทรัพยากรโครงการต่างๆจะทำให้เกิดต้นทุนและกระแสเงินออก (cash flow out) ดังนั้นแผนงานก่อสร้างจึงเป็นตัวกำหนดและส่งผลกระทบโดยตรงต่อสถานะภาพทางการเงินของบริษัทก่อสร้าง แผนงานก่อสร้างจึงต้องทำให้การใช้จ่ายเงินสดที่ ณ เวลาใดๆไม่เกินไปกว่าขีดจำกัดของเครดิตของบริษัทก่อสร้างด้วย ซึ่ง Russell (1991) พบว่าความล้มเหลวของบริษัทก่อสร้างกว่า 60% มีสาเหตุมาจากการบริหารการเงิน ขีดจำกัดของเครดิตนี้อาจส่งผลให้การดำเนินโครงการได้ล่าช้าหรือหยุดชะงักหรือเป็นสาเหตุให้มีต้นทุนทางอ้อม (indirect cost) สูงขึ้น

งานวิจัยจำนวนมากที่ผ่านมามักแยกคิดปัญหาเป็นเฉพาะส่วน เช่น วิเคราะห์ Time-cost, Resource allocation หรือ Resource leveling โดยไม่ได้รวมทุกอย่างเข้าไว้ด้วยกัน (Hegazy และ Ersahin, 2001) ทั้งนี้เนื่องมาจากความซับซ้อนของการโมเดลปัญหาให้รวมการพิจารณาทุกด้านไว้ด้วยกัน และข้อจำกัดในวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) อีกทั้งเงื่อนไขต่างๆของกิจกรรมก็มักถูกสมมติให้ง่าย (simplified) ได้แก่ ประเภทความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม

(precedence relationships), ข้อจำกัดของกิจกรรม (activity constraints), และข้อจำกัดทางเวลา (time constraints) (Chassiakos และ Sakellaropoulos, 2005)

โครงการวิจัยที่เสนอนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อที่จะหาวิธีการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการโมเดลปัญหาและหาคำตอบสำหรับการวางแผนงานก่อสร้างด้วยการพิจารณาเงื่อนไขทุกด้านพร้อมกัน ได้แก่ ระยะเวลา ต้นทุน และทรัพยากรต่างๆของโครงการ เพื่อให้สะท้อนสภาพความเป็นจริงที่เหมาะสมของโครงการก่อสร้าง พร้อมทั้งเสนอแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้ด้วยการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบและทดสอบประเมินกับกรณีศึกษาตัวอย่างจริง

1.2 วัตถุประสงค์

จากปัญหาวิจัยดังกล่าว จึงมีวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยดังต่อไปนี้

พัฒนาเทคนิคการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง (Construction scheduling problems) ที่สามารถรวมการพิจารณาเงื่อนไขเฉพาะในงานก่อสร้างทั้งทางด้านเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ต้นทุน และการบริหารทรัพยากรโครงการ เพื่อให้ได้โมเดลที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากขึ้น และใช้วิธีแก้ปัญหา (Solving algorithms) เพื่อให้ได้แผนงานก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

1.3 ขอบเขต

ขอบเขตของการวิจัยนี้จะครอบคลุมถึงเรื่องต่างๆดังนี้

เงื่อนไขเฉพาะต่างๆสำหรับงานก่อสร้างในการโมเดลปัญหา Construction scheduling problems ที่จะศึกษานั้นรวบรวมมาได้จากการทบทวนวรรณกรรม ได้แก่ เวลา (Time), ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (Activity relationships), ต้นทุน (Cost), กระแสเงินสด (Cash flow), การจัดสรรทรัพยากร (Resource allocation), และการปรับระดับสมดุลทรัพยากร (Resource leveling) ซึ่งประเด็นเงื่อนไขเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อความสมเหตุสมผลของแผนงานก่อสร้างที่เป็นผลลัพธ์

วิธีแก้ปัญหา (Solving algorithms) ที่จะเปรียบเทียบศึกษานั้นจะคัดเลือกวิธีใหม่ๆที่ได้รับการพิสูจน์มาในระดับหนึ่งแล้วว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมีวิธีแก้ปัญหาอยู่เป็นจำนวนมากมาย การคัดเลือกในเบื้องต้นจะช่วยให้ประหยัดเวลาในการวิจัยได้ และสามารถเริ่มคิดค้นพัฒนาวิธีแก้ปัญหาแบบใหม่ขึ้นมาจากกลุ่มวิธีที่คัดเลือกไว้แล้วให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม

โปรแกรมต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นนั้นก็เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเผยแพร่องค์ความรู้ที่คิดค้นขึ้นจากโครงการ โดยที่จัดทำเป็นฟรีแวร์ให้ดาวน์โหลดได้สำหรับผู้ที่สนใจ แต่ทั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นสร้างฟังก์ชั่นอำนวยความสะดวกต่อการใช้งานหรือความสวยงามอย่างเต็มที่ โปรแกรมต้นแบบจะพัฒนาขึ้นจากซอฟแวร์สำนักงานพื้นฐานที่บริษัทก่อสร้างทั่วไปมีใช้อยู่ เพื่อให้สามารถเข้าใจการใช้

งานได้รวดเร็ว และสามารถติดตั้งใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาซอฟแวร์เฉพาะทางอื่นใด การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบนี้เพื่อการค้าอยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้างที่จะเลือกมาใช้ ต้องมีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้เป็นโครงการที่จำเป็นต้องวางแผนงาน และประเภทของงานก่อสร้างของโครงการต้องเป็นงานก่อสร้างที่มีเนื้องานเป็นเอกลักษณ์และไม่ซ้ำกัน เพราะจะทำให้การวางแผนงานเป็นไปในอีกลักษณะหนึ่งที่ไม่ใช่เป้าหมายของการวิจัยนี้ สามารถใช้เป็นตัวแทนของกรณีที่จะเกิดขึ้นทั่วๆไปได้ ด้วยการคำนึงกรอบระยะเวลาของโครงการวิจัยนี้ โดยข้อมูลการปฏิบัติงานจริง โมเดลปัญหา และการสร้างโปรแกรมต้นแบบ ในโครงการวิจัยนี้จะอ้างอิงมาการใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้าง ให้สามารถเปรียบเทียบนำไปใช้กับกรณีทั่วไป

1.4 วิธีวิจัย

เพื่อที่จะดำเนินงานให้บรรลุเป้าหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ โครงการนี้จะคัดเลือกบริษัทก่อสร้างเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา รายละเอียดของวิธีการดำเนินการวิจัยที่ได้จัดแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนงานมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ศึกษาวิเคราะห์วิธีการและปัญหาในการวางแผนและควบคุมโครงการ และการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง โดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้างในการเก็บข้อมูล

วิธีการ: เลือกกรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการ เพื่อการเก็บข้อมูลโดยการสังเกตการณ์ ตรวจเยี่ยมชม และสัมภาษณ์ผู้บริหาร(วิศวกรโครงการ) และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับงานวางแผนและควบคุมโครงการ รวมทั้งการทบทวนความรู้หรืองานวิจัยอื่นๆจากวรรณกรรมวารสารทางวิชาการ เพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดวิธีปฏิบัติงานจริงที่เป็นอยู่ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงกัน โดยที่ขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบทำความเข้าใจในรายละเอียดกับปัญหาวิจัยของโครงการวิจัยนี้และยืนยันถึงความสำคัญของปัญหา

ผลลัพธ์: ความเข้าใจในรายละเอียดวิธีปฏิบัติงานจริงรวมทั้งปัญหาที่บริษัทก่อสร้างประสบอยู่ใน การวางแผนและควบคุมโครงการ และการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง

ขั้นตอนที่ 2: ทบทวนพัฒนาการของการโมเดลปัญหาและวิธีแก้ปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง ด้วยเทคนิคต่างๆกันที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อบ่งชี้จุดในการพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้นและใกล้เคียงกับสภาพงานก่อสร้างจริงของประเทศไทย

วิธีการ: สืบค้นหนังสือ วารสาร และบทความการประชุมทางวิชาการต่างๆและรวบรวมเพื่อทำความเข้าใจกับพัฒนาการและความหลากหลายของการโมเดลปัญหา เช่น Time-cost trade-off, Resource allocation, Resource leveling, และ Constraint satisfaction problems รวมทั้งพัฒนาการและความหลากหลายของวิธีแก้ปัญหาทั้งแบบ heuristics, stochastic, linear programming, integer programming, และ constraint programming

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

ขั้นตอนที่ 3: สร้างโมเดลปัญหาการวางแผนและควบคุมโครงการ และการจัดตารางเวลางานก่อสร้างให้สอดคล้องกับลักษณะการปฏิบัติงานจริงของประเทศไทย รวมทั้งคิดค้นวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

วิธีการ: จากการวิเคราะห์ปัญหาจริงจากโครงการก่อสร้างในขั้นตอนที่ 1 และการวิเคราะห์เทคนิคการโมเดลปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาจุดด้อยหรือประเด็นเงื่อนไขที่ยังไม่ได้พิจารณารวมเข้าไว้ในโมเดล จากนั้นจึงสังเคราะห์โมเดลปัญหาการสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะที่สอดคล้องเหมาะสมกับความจริงที่สุด และจากการวิเคราะห์เทคนิคการแก้ปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 ทำให้สามารถคิดค้นการปรับปรุง algorithms ใหม่ให้มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าและใช้เวลาหาคำตอบรวดเร็วกว่า ต่อมาจึงทดสอบกับกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างจริงและเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการแบบเดิม

ผลลัพธ์: องค์ความรู้ใหม่ที่เป็นการโมเดลปัญหาการวางแผนและควบคุมโครงการ และการจัดตารางเวลางานก่อสร้างให้สอดคล้องกับลักษณะการปฏิบัติงานจริง และ algorithms ใหม่ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีที่คิดค้นขึ้น ซึ่งเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ และเพื่อใช้ประกอบงานเขียนบทความเพื่อเผยแพร่ต่อไป

ขั้นตอนที่ 4: พัฒนาโปรแกรมต้นแบบให้สะดวกและสอดคล้องกับการนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงในบริษัทก่อสร้าง

วิธีการ: โปรแกรมต้นแบบสำหรับการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างจะถูกพัฒนาขึ้นจากโมเดลปัญหาและวิธีแก้ปัญหาที่ได้ริเริ่มขึ้นมาใหม่ในขั้นตอนที่ผ่านมา โดยคณะผู้วิจัยที่มีองค์ความรู้นั้นพร้อมทั้งประสบการณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ และความเชี่ยวชาญในการพัฒนาซอฟแวร์ จะพัฒนาโปรแกรมต้นแบบขึ้นมาจากซอฟแวร์ปฏิบัติการที่เป็นที่รู้จักและใช้กันโดยทั่วไปในธุรกิจการก่อสร้างในประเทศ โดยโปรแกรมต้นแบบจะถูกพัฒนาบนพื้นฐานข้อมูลจริงของโครงการก่อสร้างที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษา การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบนี้จะเป็นแบบหลายรอบ โดยนำบางส่วนหรือเวอร์ชันไปทดสอบกับผู้ใช้งานเป็นระยะเพื่อรวบรวมข้อเสนอแนะที่ได้ มาใช้ปรับปรุงโปรแกรมต้นแบบให้สมบูรณ์ที่สุด

ผลลัพธ์: ซอฟแวร์ใหม่ของโปรแกรมต้นแบบสำหรับการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น พร้อมติดตั้งและทดลองใช้ในบริษัทก่อสร้างที่สนใจ

ขั้นตอนที่ 5: ทดลองใช้และประเมินผลความสำเร็จของโปรแกรมต้นแบบกับผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้าง

วิธีการ: การทดสอบและประเมินผลจะดำเนินการควบคู่ไปในระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ โดยการเลือกกรณีตัวอย่างเป็นโครงการก่อสร้างก่อสร้างจริงที่กำลังดำเนินการที่มีขนาดใหญ่ซับซ้อนที่พอเหมาะกับเทคนิคการวางแผนที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งอาจเป็นช่วงเวลาที่โครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ (mega projects) ของประเทศกำลังดำเนินการ โครงการก่อสร้างกรณีตัวอย่างจะใช้เพื่อทดสอบโปรแกรมต้นแบบการใช้งานกับผู้ปฏิบัติงานจริง (วิศวกรวางแผน) โดยจะปรับเปลี่ยนไปตามข้อเสนอแนะที่เหมาะสมที่ได้กลับมาจากการทดสอบ เพื่อให้โปรแกรมต้นแบบสอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงและความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งจะทำให้เกิดการพัฒนาเป็นลำดับขั้นหรือเวอร์ชัน โดยในเวอร์ชันสุดท้ายที่ได้จะนำไปทดสอบกับผู้ใช้งานอีกครั้งเพื่อวัดและสรุปผลลัพธ์ที่ได้ ทั้งนี้ข้อมูลบางส่วนในการใช้ทดสอบโมเดลที่เป็นความลับของบริษัทและไม่สามารถนำมาใช้ได้ อาจจะต้องใช้การประมาณเทียบเคียงค่าจริง โดยให้วิศวกรวางแผนของบริษัทกรณีตัวอย่างเป็นผู้ตรวจสอบให้สมเหตุสมผล การขอร่วมมือกับบริษัทก่อสร้างเพื่อเป็นกรณีตัวอย่างนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับบริษัทก่อสร้างขนาดใหญ่ และสามารถให้เป็นการดูงานของนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาร่วมด้วย

ผลลัพธ์: ข้อคิดเห็นและเสนอแนะจากผู้ทดลองใช้งาน แนวทางการปรับปรุงโปรแกรมต้นแบบในเวอร์ชันต่างๆ ประสิทธิภาพและผลการใช้งานระบบต้นแบบเวอร์ชันสุดท้ายที่สมบูรณ์ ผลการประเมินคุณค่าที่ได้จากการใช้งานโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 6: เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยนี้สู่องค์ความรู้ส่วนรวมในที่ประชุมและวารสารทางวิชาการต่างๆทั้งระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งเป็นแหล่งเผยแพร่การใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ให้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศ

วิธีการ: นำองค์ความรู้ใหม่จากผลการดำเนินโครงการวิจัยนี้ออกเผยแพร่สู่สาธารณะทั้งในและนอกประเทศ โดยการเขียนบทความทางวิชาการจากการวิเคราะห์ปัญหา สร้างโมเดลปัญหาและริเริ่มวิธีวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าที่ทำให้ลดระยะเวลา ต้นทุน ความล่าช้า ระดับการใช้ทรัพยากรของโครงการลงได้ และยังทำให้กระแสเงินสดของโครงการอยู่ภายในขีดจำกัดทางการเงิน โดยมุ่งหมายให้ได้บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และนำเสนอบทความในการประชุมทางวิชาการระดับประเทศหรือต่างประเทศ รวมทั้งเผยแพร่โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสู่ผู้ที่สนใจทั่วไป โดยเปิดให้ดาวน์โหลดไฟล์โปรแกรมได้จากเว็บไซต์ของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทั้งยังเป็นแหล่งข้อมูลความช่วยเหลือและสนับสนุนให้บริษัทก่อสร้างที่สนใจได้นำผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้

ผลลัพธ์: บทความในวารสารวิชาการระดับชาติหรือนานาชาติ หรือบทความการประชุมทางวิชาการระดับประเทศหรือต่างประเทศ รวมอย่างน้อย 2 เรื่อง รวมทั้งฟรีแวร์ของโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

1.5 แผนการวิจัย

จากรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินโครงการและผลลัพธ์ของแต่ละขั้นตอนข้างต้น ได้ประมาณระยะเวลาดำเนินงานของแต่ละขั้นตอน และวางแผนงานโดยได้แสดงไว้ในรูปแบบตารางดังต่อไปนี้ โดยโครงการนี้มีระยะเวลาวิจัย 2 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2553 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2554

ตารางที่ 1 แผนงานโครงการวิจัย

รายการกิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)	ไตรมาสที่ 1	2	3	4	5	6	7	8
1.ศึกษาวิเคราะห์ปัญหาที่เป็นอยู่ จากกรณีศึกษาตัวอย่าง	4								
2. ทบทวนพัฒนาการของโมเดลปัญหาและวิธีแก้ปัญหา	6								
3. คิดค้นการโมเดลปัญหาและวิธีแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น	6								
4. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบ	5								
5.ทดลองใช้และประเมินผลความสำเร็จของโปรแกรมต้นแบบ	4								
6.เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย	4								

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากโครงการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อธุรกิจก่อสร้าง ทั้งต่อบริษัทก่อสร้างและเจ้าของงานก่อสร้าง คือจะช่วยให้มีโมเดลที่สอดคล้องใกล้เคียงกับสภาพการปฏิบัติงานจริงมากขึ้น จึงสามารถสร้างตารางเวลางานก่อสร้างและติดตามความก้าวหน้าโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ซึ่งจะทำให้การใช้ทรัพยากรของโครงการเกิดคุณค่ามากที่สุด และช่วยให้ประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง ลดการใช้จ่ายเกินงบ รวมทั้งช่วยให้โครงการแล้วเสร็จได้ตรงตามกำหนดเวลาเพิ่มขึ้น ลดความล่าช้าที่นำมาสู่ปัญหาความขัดแย้ง ซึ่งผลงานที่เป็นรูปธรรมของโครงการวิจัยคือโปรแกรมต้นแบบที่สามารถเผยแพร่ไปสู่ผู้ที่สนใจทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจก่อสร้างของประเทศ เป็นการลดการพึ่งพาซอฟแวร์จากต่างประเทศ

องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยอันจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ คือวิธีการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลาที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ ซึ่งจะรวมเอาข้อเงื่อนไขต่างๆ จากสภาพการปฏิบัติงานก่อสร้างจริงไว้ และ algorithms ใหม่สำหรับใช้ในการแก้ปัญหานี้ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดจากที่มีอยู่เดิม โดยมีชื่อผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ได้คือ Overall-constrained construction scheduling and controlling optimization using constraint programming algorithms ในวารสาร Construction Management and Economics โดยส่ง manuscript ได้ประมาณไตรมาศที่ 7 (ปีที่ 2) ของโครงการ

การดำเนินโครงการวิจัยนี้คาดว่าจะได้รับผลสำเร็จเป็นระดับตามลำดับคือ ผลสำเร็จเบื้องต้น และผลสำเร็จกึ่งกลาง และผลสำเร็จตามเป้าประสงค์ ดังนี้

ผลสำเร็จเบื้องต้น (P: preliminary results) ของโครงการวิจัยนี้คือ การค้นพบความบกพร่องและความขัดขัดแย้งกับสภาพความเป็นจริงในเทคนิคการจัดตารางเวลางานก่อสร้างที่มีอยู่ และความไม่มีประสิทธิภาพของเทคนิคการแก้ปัญหาการจัดตารางเวลาที่มีอยู่ ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการศึกษาวิเคราะห์ขั้นตอนวิธีการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างที่บริษัทก่อสร้างกรณีศึกษาใช้ปฏิบัติจริงในประเทศไทย และที่รวบรวมได้จากการทบทวนวรรณกรรมวิชาการ ซึ่งผลสำเร็จเบื้องต้นนี้จะทำให้เข้าใจถึงสภาพปัญหาจริงที่มีอยู่และเห็นแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสม อันจะทำให้เพิ่มโอกาสในการนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง องค์ความรู้นี้ยังสามารถนำไปเผยแพร่ให้นักวิจัยอื่นๆที่สนใจใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดได้ต่อไป

ผลสำเร็จกึ่งกลาง (I: intermediate results) ของโครงการวิจัยนี้คือ วิธีการโมเดลปัญหาและวิธีการแก้ปัญหาที่คิดค้นขึ้นมาใหม่และมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม ด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์แผนงานก่อสร้างที่ได้จากวิธีการใหม่นี้กับที่ได้จากวิธีการเดิม โดยประเด็นที่ใช้วัดประสิทธิภาพคือ ระยะเวลา ต้นทุน กำไร จำนวนทรัพยากรของโครงการ ความสมจริงของโมเดล และความเร็วในการหาคำตอบ ผลสำเร็จกึ่งกลางเป็นองความรู้ที่มีประโยชน์เชิงวิชาการ ทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดเทคนิควิธีการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างให้ดียิ่งๆขึ้นไป

ผลสำเร็จตามเป้าประสงค์ (G: goal results) คือผลสำเร็จที่สามารถพัฒนาโปรแกรมต้นแบบสำหรับใช้ในการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างจริงได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในเชิงปฏิบัติและการประยุกต์ใช้ โดยโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพและเพิ่มศักยภาพในการดำเนินงานของบริษัทก่อสร้างที่เป็นกรณีศึกษาได้จริง ซึ่งบริษัทเหล่านี้จะเป็นตัวแทนและหลักฐานยืนยันความเป็นไปได้ในการใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งสามารถใช้ทดลองผลและแก้ไขจนได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจที่สุด ซึ่งเหมาะสมสำหรับบริษัทก่อสร้างอื่นๆทั่วไปด้วย ความคุ้มค่าของโครงการจะอยู่ที่ผลประโยชน์ต่อเนื่องแบบบูรณาการภายในสายโซ่อุปทานของทีมงานโครงการก่อสร้าง ทั้งเจ้าของงาน บริษัทก่อสร้าง (ผู้รับเหมาหลักและช่วง) และซัพพลายเออร์ การวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพยังช่วยลดปัญหาความขัดแย้งภายในทีมงาน

องค์ความรู้ใหม่ที่เกิดขึ้นในระดับต่างๆจากโครงการวิจัยนี้สามารถนำไปเผยแพร่สู่สาธารณะเพื่อให้นักวิจัย บริษัทพัฒนาโปรแกรม วิศวกรโครงการ บริษัทก่อสร้างนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ต่อไป อันจะทำให้เกิดการพัฒนาของธุรกิจอุตสาหกรรมก่อสร้างของประเทศอย่างยั่งยืน และช่วยให้โครงการก่อสร้างทั้งของรัฐและเอกชนประสบความสำเร็จในด้านต้นทุนและเวลา ด้วยการวางแผนและควบคุมโครงการอย่างมีหลักวิชาการและมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2 การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง

ในบทนี้ได้ศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง โดยเริ่มตั้งแต่หลักการขั้นพื้นฐานทั่วไปไปจนถึงวิธีการขั้นสูงที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยต่างๆ และบทนี้ได้นำเสนอสภาพทั่วไปของการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างในประเทศไทยที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา นอกจากนี้บทนี้ยังได้รวมบทวิจารณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ วิจารณ์เนื้อหาของการศึกษาทบทวนในประเด็นต่างๆดังกล่าว บทวิจารณ์นี้จึงสะท้อนแนวคิดและมุมมองของผู้วิจัยต่อการพัฒนาวิธีการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง

2.1 หลักการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง

งานก่อสร้างมีลักษณะแตกต่างจากอุตสาหกรรมการผลิตทั่วไป คือดำเนินการแบบ “งานโครงการ” (Projects) ซึ่งหมายถึงว่า งานก่อสร้างแต่ละงาน (โครงการ) จะเป็นงานที่มีเนื้องานแน่นอน มีความเป็นเอกลักษณ์ ไม่ซ้ำกัน และงานก่อสร้างมักมีขนาดชิ้นงานใหญ่จึงมีขั้นตอนการทำที่ซับซ้อนและต่อเนื่องจำนวนหลายขั้นตอน แต่งานก่อสร้างกลับมีความจำกัดทางด้านทรัพยากรที่ใช้ในการดำเนินงาน ที่สำคัญได้แก่ งบประมาณ บุคคลากร ระยะเวลาที่แน่นอน โดยมีทีมงานชั่วคราวและสถานที่ทำงานชั่วคราวงานก่อสร้างจึงต้องการหลักการบริหารโครงการที่ดี เพื่อช่วยให้งานก่อสร้างประสบความสำเร็จตามต้องการได้ ซึ่งการวางแผนและควบคุมเป็นขั้นตอนที่สำคัญส่วนหนึ่งของการบริหารโครงการ ขั้นตอนการวางแผนจะต้องทำให้แล้วเสร็จตั้งแต่ก่อนเริ่มดำเนินงานโครงการก่อสร้าง เนื่องจากเมื่อถึงเวลาดำเนินงานโครงการก็จะได้นำแผนงานที่วางไว้มาใช้เพื่อในการควบคุมโครงการ การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างจึงเป็นขั้นตอนที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน มีหลักการทั่วไปในการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างดังนี้

2.1.1 การวางแผนงานก่อสร้าง

การวางแผน (Planning) คือกระบวนการกำหนดวัตถุประสงค์ของการทำงาน และแจกแจงรายละเอียดของขั้นตอนงานต่างๆที่ต้องทำเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เหล่านั้น และกำหนดการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด การวางแผนนั้นเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับงานแบบโครงการ เช่นงานก่อสร้าง เนื่องจากเป็นงานที่มีเนื้องานที่เป็นเอกลักษณ์ ไม่ซ้ำเดิม รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานโครงการก่อสร้างจึงต้องถูกกำหนดขึ้นใหม่ทุกครั้ง (วชรภูมิ, 2553) ดังนั้นหากเป้าหมายหลักของงานก่อสร้างคือการทำให้โครงการแล้วเสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาและงบประมาณที่กำหนดไว้ในสัญญา การวางแผนก่อสร้างจึงต้องนำเป้าหมายเหล่านี้ไปใช้กำหนดรายละเอียดของการทำงานที่เหมาะสม

ในทางปฏิบัติ การวางแผนคือการกำหนดรายละเอียดของการทำงาน ได้แก่มีงาน “อะไร” บ้างที่ต้องทำ ต้องทำ “อย่างไร” “ที่ไหน” “เมื่อไร”และโดย “ใคร” สำหรับงานก่อสร้าง แบบก่อสร้าง (plans) และรายการประกอบแบบ (specifications) เป็นแหล่งข้อมูลสำคัญที่อธิบายถึงรูปร่าง

รูปแบบ ส่วนประกอบของตัวชิ้นงานสิ่งก่อสร้าง และยังกำหนดขอบเขตเวลาของโครงการ แต่ไม่ได้ให้รายละเอียดถึงขั้นตอนการก่อสร้าง ดังนั้นเมื่อวางแผนงานโครงการ จึงต้องคิดถึงรายละเอียดของขั้นตอนการก่อสร้าง และกำหนดรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนว่า “อย่างไร” “อะไร” “เมื่อไร” “ที่ไหน” และ “โดยใคร”

การวางแผนจะเกี่ยวข้องกับคำศัพท์สองคำที่มักใช้สลับกันในความหมายรวมๆโดยทั่วไปที่ใกล้เคียงกันคือ การวางแผน (Planning) และการจัดตารางเวลา (Scheduling)การจัดตารางเวลามีลักษณะหมายความมุ่งเน้นไปที่ส่วนของ “เวลา” ในแผนงาน ผลที่ได้ก็คือ ตารางเวลางาน (timetable หรือ schedule) การวางแผนงานก่อสร้างในเบื้องต้นใช้วิธีการสร้างโมเดลเน็ตเวิร์คของกิจกรรมก่อสร้างทั้งหมดเพื่อการจัดทำตารางเวลา มีขั้นตอนสำหรับการสร้างโมเดลเน็ตเวิร์คดังนี้

1. การกำหนดกิจกรรมและระดับชั้นของกิจกรรม กิจกรรม (Activity) คือ ขั้นตอนงานย่อยอันหนึ่งจากเนื้องานทั้งหมดของโครงการก่อสร้างที่จะต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จ กิจกรรมต้องมีขอบเขตเนื้องานที่ต้องทำแน่นอนชัดเจน และเป็นเอกเทศคือไม่มีส่วนของเนื้องานของกิจกรรมหนึ่งที่ซ้อนทับกับกิจกรรมอื่นๆการกำหนดกิจกรรมและระดับชั้นของกิจกรรมมักจะทำด้วย “วิธีการสร้างโครงสร้างกระจายงานย่อย” (Work Breakdown Structure: WBS) WBS คือการแบ่งย่อยกระจายงานโครงการหนึ่งออกเป็นงานย่อยต่างๆตามลำดับชั้นจากบนลงล่าง (หยาบไปหาละเอียด) อย่างเป็นระบบและมีโครงสร้างแบบต้นไม้ ซึ่งงานย่อยลำดับล่างที่สุดที่ถูกแบ่งออกมาเหล่านี้ก็คือ “กิจกรรม” (Activity)

2. การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม หรือการจัดเรียงกิจกรรมต่างๆเป็นลำดับก่อนหลัง คือการกำหนดให้กิจกรรมหนึ่งนั้นมีความสัมพันธ์ในเชิงเวลากับกิจกรรมอื่นๆอย่างไร เช่น กิจกรรมก่อสร้างหนึ่งอาจจะไม่สามารถเริ่มดำเนินการได้จนกระทั่งอีกกิจกรรมหนึ่งได้ถูกดำเนินการแล้วเสร็จ (Activitydependency or relationships) โดยที่กิจกรรม (ที่ติดกัน) ที่ต้องเริ่มดำเนินงานก่อน เรียกว่า “Predecessor”และกิจกรรม (ที่ติดกัน) ที่ต้องทำทีหลัง เรียกว่า “Successor”ความสัมพันธ์แบบปกติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

Finish-to-Start (FS) คือเมื่อกิจกรรม predecessor เสร็จสมบูรณ์แล้ว กิจกรรม successor จึงสามารถเริ่มได้

Finish-to-Finish (FF) คือเมื่อกิจกรรม predecessor เสร็จสมบูรณ์แล้ว กิจกรรม successor จึงสามารถแล้วเสร็จสมบูรณ์ได้

Start-to-Start (SS) คือเมื่อกิจกรรม predecessor เริ่มแล้ว กิจกรรม successor จึงสามารถเริ่มได้

นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์แบบพิเศษได้อีก 2 ลักษณะคือ

ความสัมพันธ์แบบซ้อนทับ (Overlapping) คือ กิจกรรมหนึ่งเริ่มดำเนินการหลังจากกิจกรรม predecessor ได้ดำเนินการไประยะหนึ่งแต่ไม่รอจนกิจกรรม predecessor แล้วเสร็จ

ความสัมพันธ์แบบตามหลัง (Delaying) คือ กิจกรรม successor ไม่สามารถเริ่มได้ทันทีทันใดเมื่อกิจกรรม predecessor แล้วเสร็จ ต้องรอเวลาอีกสักระยะหนึ่ง

3. การกำหนดระยะเวลาของกิจกรรม คือระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อดำเนินการกิจกรรมนั้นตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้น ระยะเวลาของกิจกรรม (duration) เป็นค่าที่ได้จากการประมาณโดยใช้ความรู้สึกและหรือประสบการณ์ระยะเวลาจะมีความสัมพันธ์กับ “อัตราผลผลิต” (productivity) และจำนวนทรัพยากรที่ใช้ดำเนินงาน ได้แก่ จำนวนแรงงานและเครื่องจักร เป็นต้น เป็นผลให้ระยะเวลามีผลโดยตรงต่อต้นทุนของกิจกรรมนั้นเช่นกัน เนื่องจากกิจกรรมก่อสร้างเป็นงานที่อาศัยแรงงานคน อัตราผลผลิตซึ่งเปรียบได้กับอัตราเร็วของการทำงานจึงแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยของคนงานและสภาพแวดล้อมในการทำงาน อัตราผลผลิตของการทำกิจกรรมหนึ่งจึงเป็นค่าไม่แน่นอนส่งผลให้ระยะเวลาของกิจกรรมเป็นค่าที่ไม่แน่นอนด้วย

$$\boldsymbol{Productivity = \frac{Quantity\ of\ work\ output}{Man \cdot hour}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.1)}$$

$$\boldsymbol{Duration = \frac{Quantity\ of\ work\ output}{Productivity \times Men}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.2)}$$

$$\boldsymbol{Labour\ cost = Duration \times Payrate} \qquad \textbf{สมการที่ (2.3)}$$

4. การคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมด้วย “วิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต” (Critical Path Method: CPM) ข้อมูลเบื้องต้นของกิจกรรมก่อสร้างที่กำหนดขึ้นจากขั้นตอนต่างๆก่อนหน้านี้จะใช้ในการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรม 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 ช่วงเวลาเลื่อนก่อนที่กิจกรรมนั้นจะทำให้ successor ล่าช้า

Total Float (TF) หมายถึง ช่วงเวลาเลื่อนก่อนที่กิจกรรมนั้นจะทำให้โครงการล่าช้า

กิจกรรมก่อสร้างต่างๆจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ และมักมีความสัมพันธ์แบ่งเป็นกลุ่มๆ โดยที่กลุ่มงานหนึ่ง ที่มีกิจกรรมต่างๆที่สัมพันธ์กันและเรียงต่อกันเป็นลักษณะสายทางจะเรียกว่า “สายทางกิจกรรม” (Path) ขณะที่ในระหว่างกลุ่มงานที่ไม่สัมพันธ์กัน จะมีลักษณะเป็นเส้นสายทางกิจกรรมที่ขนานกันไป โมเดลเน็ตเวิร์คของโครงการก่อสร้างหนึ่งนั้นจะต้องมีสายทาง

กิจกรรมอย่างน้อยหนึ่งสายที่เป็นตัวบ่งการกำหนดเสร็จสิ้นของทั้งโครงการ โดยจะเรียกสายทางกิจกรรมนั้นว่า “สายทางกิจกรรมวิกฤต” (Critical Path) และกิจกรรมต่างๆที่อยู่ในสายทางเหล่านั้นเรียกว่า “กิจกรรมวิกฤต” (Critical Activities) ซึ่งผู้ดำเนินโครงการจะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษกับสายทางกิจกรรมวิกฤตเพราะมีผลกระทบต่อกำหนดเสร็จสิ้นของทั้งโครงการ

การคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมจะช่วยทำให้ระบุได้ว่ากิจกรรมใดเป็นกิจกรรมวิกฤต โดยที่กิจกรรมใดที่มี TF เท่ากับศูนย์คือกิจกรรมวิกฤต สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเวลา สำหรับกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์แบบใดๆระหว่าง Predecessors และ Successors มีดังนี้

$$ES_i = Max(EF_h);\ \forall h \qquad \text{สมการที่ (2.4)}$$

$$EF_i = ES_i + D_i \qquad \text{สมการที่ (2.5)}$$

$$LF_i = Min(LS_j);\ \forall j \qquad \text{สมการที่ (2.6)}$$

$$LS_i = LF_i - D_i \qquad \text{สมการที่ (2.7)}$$

$$FF_i = Min(ES_j) - EF_i;\ \forall j \qquad \text{สมการที่ (2.8)}$$

$$TF_i = LS_i - ES_i \qquad \text{สมการที่ (2.9)}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยที่ i คือกิจกรรมใดๆที่มี predecessors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ h และมี successors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ j

D_i คือ ระยะเวลาของกิจกรรม i

ค่าเวลาต่างๆของกิจกรรมที่ได้จะช่วยให้สามารถจัดตารางเวลางานของโครงการก่อสร้างได้ โดยที่ทำให้ได้ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ บอกกำหนดวันเริ่มอย่างช้าและอย่างเร็วที่สุด และกำหนดวันเสร็จอย่างช้าและอย่างเร็วที่สุดของแต่ละกิจกรรม ทำให้รู้ว่าในแต่ละกิจกรรมจะสามารถดำเนินการล่าช้าได้สักเท่าใด รวมทั้งรู้ว่ากิจกรรมใดบ้างที่ห้ามดำเนินการล่าช้า

2.1.2 การควบคุมงานก่อสร้าง

การควบคุม (Controlling) คือกระบวนการวัด เปรียบเทียบ และประเมินผลการทำงานในระหว่างการดำเนินงานนั้นอยู่อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาจนกระทั่งแล้วเสร็จ แผนงานคือสิ่งที่กำหนดตั้งเอาไว้ก่อนดำเนินงานจึงเป็นสิ่งที่ต้องการให้เป็น เป็นเป้าหมาย และเป็นแนวทางดำเนินงาน แผนงานที่เป็นผลลัพธ์ของขั้นตอนวางแผน จะเรียกว่า “แผนงานฐาน” (baseline schedule) ซึ่งเป็นแผนงานที่สมบูรณ์ที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิงสำหรับการเปรียบเทียบ ในขณะที่ “ผลการดำเนินงานจริง” (actual work done) คือเหตุการณ์ทำงานจริงและผลงานที่ได้จากการลงมือดำเนินงานจริง ในเวลาจริง เป็นผลดำเนินงานจริงที่ติดตามบันทึกได้ในระหว่างการดำเนินโครงการ แผนงานกับผลดำเนินงานจริงอาจจะแตกต่างกันได้เพราะเมื่อได้ลงมือดำเนินงานจริง มีโอกาสน้อยมากที่ผลดำเนินงานจริงจะเป็นไปตามแผนทุกประการ

ดังนั้นในระหว่างดำเนินงานจะต้องติดตามบันทึกความก้าวหน้าของโครงการ(project progress) หรือก็คือผลการดำเนินงานจริงที่ได้ในช่วงที่ติดตามเฝ้าดู ซึ่งอาจเรียกว่าการปรับปรุงแผนงาน การติดตามบันทึกผลดำเนินงานจริงนี้ควรทำเป็นช่วงรอบเวลาอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เช่น ทุกวัน ทุกสัปดาห์ ทุกเดือน ขึ้นอยู่กับระดับความใกล้ชิดที่ต้องการการติดตามผลด้วยรอบเวลาที่สั้นช่วยให้รู้สถานะของโครงการอย่างรวดเร็วอันจะนำไปสู่การแก้ไขสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ได้อย่างทันท่วงที แต่ก็ต้องเสียทรัพยากรที่ใช้ในการติดตามมากกว่า ผลการดำเนินงานจริงที่ติดตามบันทึกได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับแผนงานที่ต้องการให้เป็นในช่วงเดียวกัน โดยผลการดำเนินงานจริงที่คลาดเคลื่อนจากสิ่งที่วางแผนไว้จะต้องสร้างมาตรการแก้ไขขึ้นมา เพื่อให้ผลการดำเนินงานช่วงรอบเวลาต่อไปกลับเข้ามาเป็นไปตามแผน ซึ่งในงานโครงการก่อสร้างนั้นจะพบอยู่เสมอ ๆว่าผลการดำเนินงานจริงไม่เป็นไปตามที่วางแผนไว้ อันเนื่องมาจากเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด อุบัติเหตุ และเหตุสุดวิสัย ทำให้ต้องปรับแก้แผนงานอยู่ตลอดเวลา

“แผนงานปรับปรุง” (updated schedule) คือแผนงานฐานที่ได้ผสมข้อมูล “ผลการดำเนินงานจริง” และบันทึก “ความก้าวหน้าของโครงการ” ณ ขณะเวลาหนึ่ง เข้าไปด้วย และอาจปรับแก้เพื่อให้โครงการยังคงเสร็จตามกำหนดการเดิม โดยการปรับปรุงแผนงานนี้จะต้องใช้ข้อมูลที่บันทึกได้ถึง ณ ขณะเวลาหนึ่ง ที่เรียกว่า “วันที่ปรับปรุง” (data date or status date) ดังนั้นวันที่ปรับปรุงจึงหมายถึงขณะเวลาหนึ่งที่ได้ปรับปรุงข้อมูลความก้าวหน้าของโครงการให้เป็นปัจจุบัน

การเปรียบเทียบผลการดำเนินงานจริงกับแผนงานฐานในเชิงปริมาณตัวเลขนั้นจะต้องใช้หน่วยวัดฐานเดียวกันคือ “เงิน” โดยจะแปลงผลการดำเนินงานจริงและแผนงานฐานออกมาเป็นรูปของจำนวนเงิน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะทำให้ได้ “ค่าแตกต่าง” (variance) ออกมา ค่านี้จะใช้ในการกำหนดทิศทางและมาตรการในการแก้ไขแผนงาน เพื่อพยายามให้การดำเนินงานในส่วนที่ยังเหลืออยู่ของโครงการ สามารถกลับไปเป็นตามแผนงานฐานให้ได้ มูลค่าเงินแบบต่าง ๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลงาน มีดังนี้

1. Budgeted Cost of Work Scheduled (BCWS) หมายถึง มูลค่าเงินที่แปลงมาจากความก้าวหน้า (ที่ควรได้) ตามแผน มูลค่าเงินนี้หาได้โดยการรวมมูลค่าเงินจากแผนงานฐานตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงวันที่ปรับปรุง

2. Budgeted Cost of Work Performed (BCWP) หมายถึง มูลค่าเงินที่แปลงมาจากความก้าวหน้าของผลการดำเนินงานจริงที่ทำได้ ตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงวันที่ปรับปรุงมูลค่าเงินนี้ขึ้นกับเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จของกิจกรรมที่ทำได้ที่สภาพหน้างานจริง

3. Actual Cost of Work Performed (ACWP) หมายถึง มูลค่าเงินที่ใช้จ่ายจริงไปในการดำเนินงานตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงวันที่ปรับปรุง ซึ่งมูลค่าเงินนี้หาได้จากแผนกบัญชี ด้วยการรวมรวบใบเสร็จค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน

มูลค่าเงินทั้งสามแบบนี้จะนำมาใช้วัดค่าความแตกต่าง (Variance) ระหว่างแผนงานฐานและแผนงานปรับปรุงซึ่งค่าความแตกต่างนี้สามารถวัดได้เป็นรายแต่ละกิจกรรมและในภาพรวมของทั้งโครงการ เพื่อบ่งบอกว่าผลการดำเนินงานจริงของแต่ละกิจกรรมหรือทั้งโครงการดีหรือแย่เพียงใดเทียบกับแผนงานฐาน ค่าความแตกต่างสามารถเปรียบเทียบวัดได้สองลักษณะดังนี้

1. ค่าความแตกต่างเชิงเวลา (Schedule Variance: SV) คือค่าที่ใช้วัดว่าผลการดำเนินงานจริงที่ทำได้ว่าเร็วกว่าหรือช้ากว่าแผนงานฐาน โดย SV ที่มีค่าเป็นบวกจะแปลความหมายได้ว่า ผลการดำเนินงานจริงเร็วกว่าแผนงานฐาน(และในทางกลับกัน)

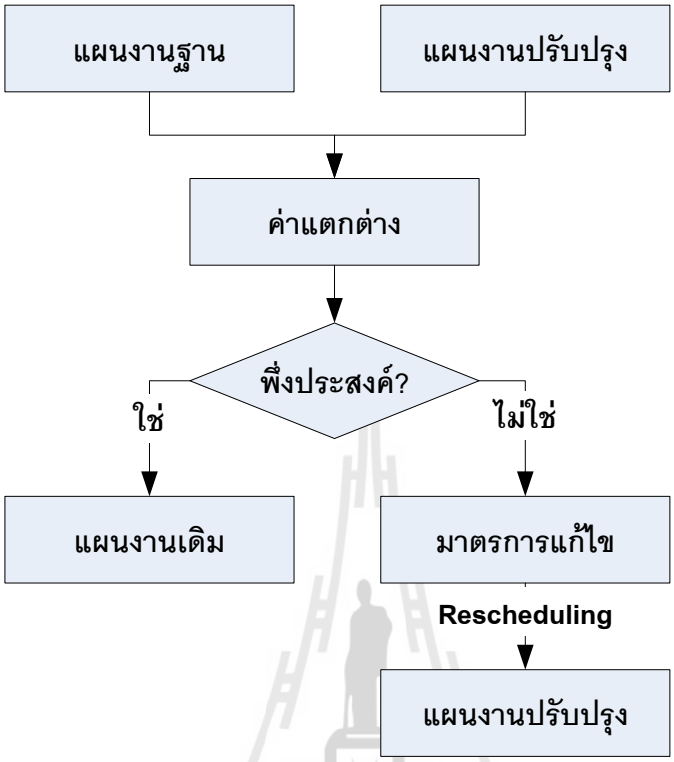
$$\boldsymbol{SV = BCWP - BCWS} \qquad \textbf{สมการที่ (2.10)}$$

2. ค่าความแตกต่างเชิงต้นทุน (Cost Variance: CV) คือค่าที่ใช้วัดว่าผลการดำเนินงานจริงที่ทำได้ว่ามีการใช้จ่ายประหยัดกว่าหรือเปลืองกว่าแผนงานฐาน โดย CV ที่มีค่าเป็นบวก จะแปลความหมายได้ว่า ผลการดำเนินงานจริงประหยัดกว่าแผนงาน (และในทางกลับกัน)

$$\boldsymbol{CV = BCWP - ACWP} \qquad \textbf{สมการที่ (2.11)}$$

หากวิเคราะห์ผลการดำเนินงานจริงแล้วได้ผลลัพธ์ออกมาไม่เป็นที่พึงประสงค์ จะต้องปรับแก้แผนงาน ด้วย“การวางแผนงานซ้ำอีกครั้ง” (Rescheduling) เฉพาะสำหรับส่วนเนื้องานที่ยังไม่ดำเนินการ (ส่วนเนื้องานที่ดำเนินการไปแล้วไม่สามารถย้อนกลับไปเปลี่ยนแปลงได้) เพื่อกำหนดให้ส่วนเนื้องานที่ยังเหลืออยู่เป็นตัวชดเชยกลับคืน และเพื่อปรับให้ผลการดำเนินงานโดยรวมทั้งโครงการยังคงเป็นไปตามแผนงานฐานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นหากพิจารณาภาพรวมของการควบคุมงานโครงการก่อสร้างแล้ว (ไม่รวมการติดตามความก้าวหน้า และการวิเคราะห์ค่าความ

แตกต่าง) จะเห็นได้ว่าการควบคุมงานได้รวมเอา “การวางแผนอีกครั้ง” เป็นขั้นตอนย่อยอันหนึ่ง โดยการวางแผนอีกครั้งจะต้องสะท้อนถึงมาตรการแก้ไขที่กำหนดขึ้นเพื่อชดเชยผลงานจริงที่ไม่พึงประสงค์ในช่วงที่ผ่านมา



รูปที่ 2.1 ภาพรวมของการควบคุมงานโครงการก่อสร้าง

2.2 โมเดลปัญหาการวางแผนงาน

เทคนิคเบื้องต้นที่ใช้สำหรับการวางแผนโครงการงานก่อสร้างโดยทั่วไปอย่างแพร่หลายคือ วิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต (Critical Path Method: CPM) ที่มีเป้าหมายเพื่อจัดตารางเวลาการดำเนินกิจกรรมก่อสร้างให้ได้ระยะเวลาโครงการสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาเงื่อนไขเฉพาะด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (Activity dependency) เป็นหลักซึ่งเป็นมิติด้านเวลา วิธี CPM จึงเป็นการวางแผนงานในขั้นเบื้องต้น และมีข้อด้อยที่ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขที่สำคัญอื่นๆที่มีผลกระทบต่อแผนงาน โดยเฉพาะเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรโครงการประเภทต่างๆที่มีจำนวนจำกัด (Limited resources) ได้แก่ แรงงานเครื่องจักร พื้นที่ทำงาน ต้นทุน วงเงินเครดิต และเวลา ซึ่งหากนำเงื่อนไขด้านความจำกัดของทรัพยากรเหล่านี้เข้าไปรวมพิจารณาด้วยจะทำให้ได้แผนงานที่แตกต่างออกไปแต่มีความสมเหตุสมผลมากขึ้นจึงอาจเรียกการวางแผนลักษณะนี้ว่าการวางแผนในขั้นสูง เนื่องจากสภาพความจำกัดของทรัพยากรเหล่านี้เองเป็นตัวกำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของแผนงานก่อสร้าง ในลักษณะเดียวกับ Constraints ของโมเดลปัญหา Optimization ดังนั้นการวางแผนงานจึงสามารถถูกสร้างเป็นโมเดลปัญหาเพื่อทำการ Optimization ได้ การสร้างโมเดลปัญหาและการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problems) ทำให้ได้คำตอบเป็นแผนงานที่

เหมาะสมที่สุดในด้านต่างๆที่เป็นเป้าหมายหลักของโครงการก่อสร้าง ได้แก่ เวลา ต้นทุน และทรัพยากร หรือเป็นการกำหนดแผนการใช้เวลา ต้นทุน และทรัพยากรของโครงการ (ที่มีอยู่อย่างจำกัด) ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (ในทุกด้าน หรือบางด้านที่ต้องการ)

มีงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากที่มุ่งพัฒนาการวางแผนและควบคุมงานโครงการก่อสร้างด้วยการใช้เทคนิคการสร้างโมเดลปัญหาและการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการก่อสร้าง และเงื่อนไขเฉพาะจำนวนมากที่มีผลกระทบต่อเป้าหมายหลักของโครงการ ทำให้ความพยายามในการพัฒนาเทคนิคเหล่านี้ยังคงต้องดำเนินต่อไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นแผนงานก่อสร้างที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดผลประโยชน์กับทีมงานโครงการก่อสร้าง อันจะนำไปสู่การพัฒนาของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ซึ่งงานวิจัยที่มีความน่าสนใจและเกี่ยวข้องจำนวนหนึ่งได้ถูกรวบรวมและทบทวนไว้ในบทนี้ ลักษณะโมเดลปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่พิจารณาเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากรโครงการอาจเรียกโดยรวมว่า 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

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 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโมเดลปัญหาได้แก่ d_j, r_{jk}, R_k ถูกประมาณกำหนดขึ้นให้เป็นค่าแบบ non-negative and deterministic values วัตถุประสงค์ทั่วไปของ RCPSP คือการหาลำดับการดำเนินกิจกรรมทั้งหมด โดยสอดคล้องกับเงื่อนไข เพื่อให้ได้เวลาเสร็จสิ้นโครงการ (makespan) ที่สั้นที่สุด (Kolisch and Hartmann 2006)

อย่างไรก็ตามยังมีการจำกัดความเพิ่มเติมประเภทของโมเดลอีกเป็นแบบ multimode เนื่องจาก RCPSP โดยทั่วไป จะกำหนดให้แต่ละกิจกรรมมีวิธีการดำเนินการได้เพียง 1 วิธีเท่านั้น (single execution mode) โดยมี d_j, และ r_{jk} ตามลำดับ หากกิจกรรมใดๆสามารถมีวิธีการดำเนินการได้หลายวิธี (multiple execution modes) จะเรียกว่าเป็นโมเดลปัญหา Multimode resource-constrained project scheduling problem (MRCPSP) แต่ละวิธีดำเนินการของแต่ละกิจกรรมใดๆจะกำหนดให้ใช้ระยะเวลาและจำนวนทรัพยากรที่ต่างกัน (Hong Zhang, Tam, and Heng Li 2006)

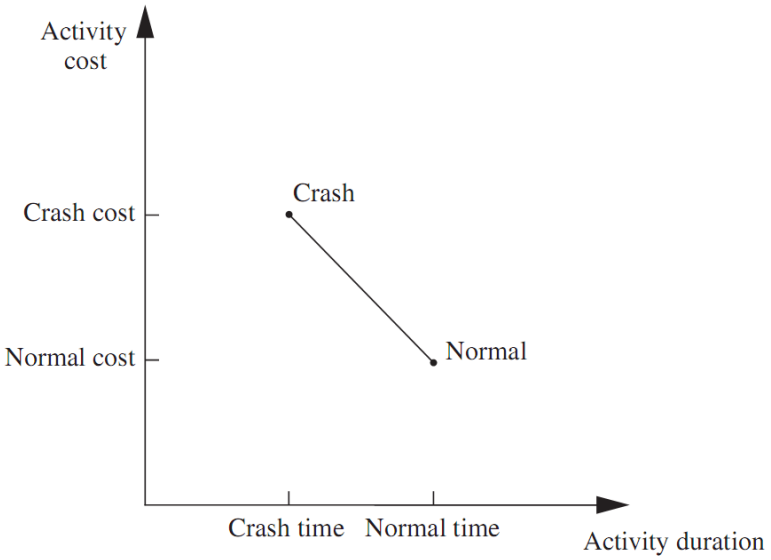
ทรัพยากรของโครงการสามารถแบ่งประเภทออกเป็น ทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources) คือทรัพยากรที่เมื่อใช้ดำเนินการกิจกรรมหนึ่งจนแล้วเสร็จ สามารถนำไปใช้ดำเนินการกิจกรรมอื่นต่อไปได้ ตัวอย่างเช่น คนงาน และเครื่องจักร อีกประเภทคือ ทรัพยากรไม่หมุนเวียน (Nonrenewable resources: NR) คือทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เช่น งบประมาณ และวัสดุ ซึ่งทรัพยากรทั้งสองประเภทถูกกำหนดให้มีจำนวนจำกัด โดยที่ทรัพยากรหมุนเวียนจะมีความจำกัดที่ขณะเวลาใดๆต้องนำไปใช้ไม่เกิน RR_k (ทรัพยากรประเภทที่ k) และทรัพยากรไม่หมุนเวียนจะต้องใช้ตลอดทั้งโครงการรวมกันแล้วไม่เกิน NR_k (ทรัพยากรประเภทที่ k) (Hong Zhang, Tam, and Heng Li 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 วัตถุประสงค์ทั่วไปของโมเดลปัญหา MRCPSP จะเป็นการหา ส่วนผสมของวิธีดำเนินการ (mode combination) และลำดับการดำเนินการของกิจกรรมทั้งหมดเพื่อให้ได้ระยะเวลาโครงการที่สั้นที่สุด (Minimization of project duration or makespan) โดยเป็นไปตามเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากร

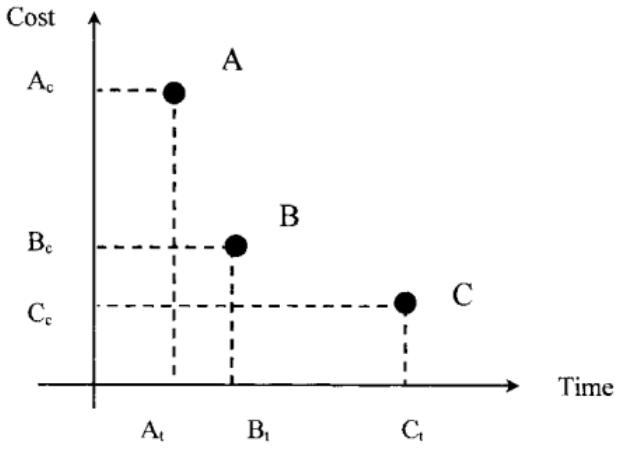
RCPSP สามารถแบ่งออกได้โดยทั่วไปเป็น 4 กลุ่มย่อยคือ การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน (Time-cost trade-off), การจัดสรรทรัพยากร (Resource allocation) การปรับระดับสมดุลทรัพยากร (Resource leveling) และกระแสเงินสดกับวงเงินเครดิต (Cashflow with credit limit) ซึ่งจะได้ทบทวนรายละเอียดแบ่งเป็นแต่ละหัวข้อดังข้างล่าง

2.2.1 การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน

การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน (Time-cost trade-off: TCT) คือปัญหาที่เกี่ยวกับการกำหนดหาต้นทุนของโครงการที่น้อยที่สุดสำหรับค่าระยะเวลาหนึ่งของโครงการตามที่ต้องการโดยมีสมมติฐานเบื้องต้นคือ กิจกรรมก่อสร้างใดๆสามารถมีวิธีการดำเนินงาน (execution methods) ได้หลาย “ทางเลือก”(options)โดยทางเลือกปกติจะมีระยะเวลาปกติ (Normal duration) และต้นทุนปกติ (Normal cost) การเร่งรัดการทำกิจกรรมใดๆให้แล้วเสร็จเร็วกว่าปกติจะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นเป็นค่าทรัพยากรพิเศษ (ที่แพงกว่า) ที่นำมาใช้ ได้แก่ การเพิ่มแรงงาน การเพิ่มแรงงานเชี่ยวชาญ การใช้เครื่องจักรหรือการใช้เทคโนโลยีที่ดี ซึ่งจะทำให้ได้ระยะเวลาเร่งรัด (Crash duration) และต้นทุนเร่งรัด (Crash cost) ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัดอาจถูกกำหนดให้เป็นแบบต่อเนื่อง (continuous) หรือไม่ต่อเนื่อง (discrete) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 ตามลำดับ เนื่องจากเฉพาะกิจกรรมวิกฤตเท่านั้นที่มีผลต่อระยะเวลาของโครงการ การเร่งรัดกิจกรรมด้วยต้นทุนที่แพงจึงควรเลือกทำกับบางกิจกรรม ในขณะที่กิจกรรมที่ไม่วิกฤตสามารถดำเนินการไปตามปกติที่ใช้ต้นทุนต่ำได้ ผู้วางแผนจึงต้องค้นหาส่วนผสมที่เหมาะสมนั้น



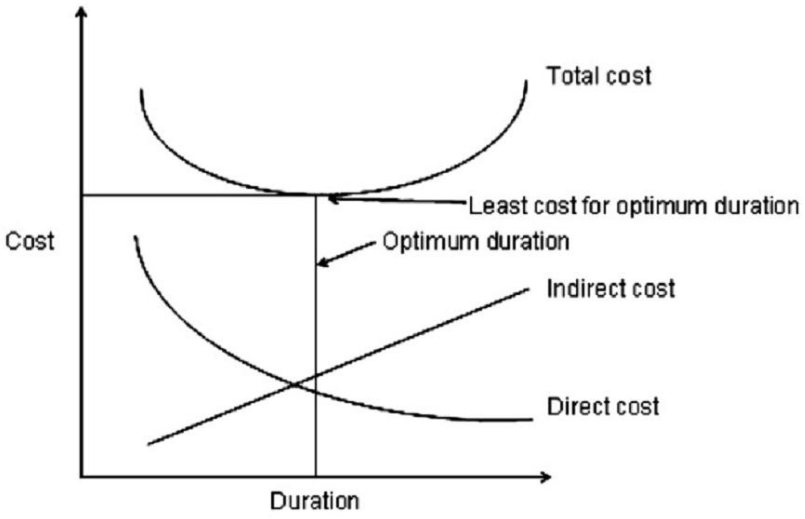
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัด (Hillier 2001)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์แบบไม่ต่อเนื่องระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัด (Feng, L Liu, and Burns 2000)

ต้นทุนของโครงการก่อสร้างนั้นอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ต้นทุนทางตรง (Direct cost) และต้นทุนทางอ้อม (Indirect cost) โดยที่ต้นทุนทางตรงมีลักษณะที่แปรผันตามกับปริมาณเนื้องานก่อสร้างที่ทำได้และทรัพยากรที่ใช้ไป หรือเป็นต้นทุนแปรผัน (Variable cost) แต่ต้นทุนทางอ้อมหมายถึงค่าใช้จ่ายอื่นๆที่มีลักษณะโดยรวมที่ไม่แปรผันไปตามปริมาณเนื้องานก่อสร้างที่ทำได้ หรือเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ที่ต้องจ่ายตามกำหนดเวลา คือแปรผันตามระยะเวลาของโครงการ จากลักษณะนี้เองที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับระยะเวลาของโครงการก่อสร้าง กล่าวคือต้นทุนทางตรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาโครงการถูกเร่งรัดให้สั้นลงแต่ต้นทุนทางอ้อมอาจลดลงได้ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่ต้นทุนโครงการที่ต่ำกับระยะเวลาโครงการที่สั้นสามารถเกิดขึ้นพร้อมกัน (Eshtehardian, Afshar, and Abbasnia 2008) กราฟความสัมพันธ์แสดง

ในรูปที่ 2.4 สำหรับค่าระยะเวลาโครงการค่าหนึ่งจะสามารถใช้หาต้นทุนโครงการที่ต่ำที่สุดได้ ดังนั้น หากกำหนดค่าระยะเวลาโครงการหลาย ๆค่า จะทำให้ได้ต้นทุนโครงการที่ต่ำที่สุดสำหรับแต่ละค่าระยะเวลาโครงการ และจุดเหล่านี้จึงเป็นคำตอบของปัญหาที่คล้ายกับ multi-objective optimization ที่มีเป้าหมายในการหา non-dominated solutions (คือคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับอย่างน้อยหนึ่ง objective) โดยที่ non-dominated solutions เหล่านี้จะเรียงตัวกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า Pareto front



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนกับเวลาของโครงการ (PH Chen and Weng 2009)

โมเดลปัญหาทั่วไปของ TCT เป็นดังนี้แต่ละกิจกรรมก่อสร้าง (activity) มีวิธีการดำเนินงาน (execution methods) ได้หลาย “ทางเลือก”(options) แต่ละทางเลือกจะมีระยะเวลาและต้นทุนเป็น “ค่าที่กำหนดได้” (deterministic values) เฉพาะตัวที่ต่างกันไป คำตอบของปัญหาคือ ทางเลือกของแต่ละกิจกรรมที่ทำให้ต้นทุนโครงการต่ำที่สุด สำหรับค่าระยะเวลาโครงการค่าหนึ่ง ซึ่งจำนวนรูปแบบของทางเลือก (คำตอบ) ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะมีเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น ถ้าให้โครงการมีกิจกรรมทั้งหมด n กิจกรรม แต่ละกิจกรรมมีทางเลือกเท่ากันเท่ากับ m ทางเลือก จะทำให้มีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solutions) ทั้งหมด m^n คำตอบ สมการทั่วไปของ TCT เป็นดังนี้

Decision variables: X_{ij} = ค่าดัชนีการเลือกวิธีทำกิจกรรมที่ i ด้วยทางเลือกที่j

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize\ C} = \sum_{i,j}\left(\boldsymbol{DC_{ij}} \cdot \boldsymbol{x_{ij}}\right) + \boldsymbol{IC} \cdot \boldsymbol{T} \qquad \textbf{สมการที่ (2.12)}$$

Subject to: $\boldsymbol{Max}[\boldsymbol{EF_i}] \leq \boldsymbol{T}; \forall \boldsymbol{i}$

และ Activity dependency

โดยที่ $\boldsymbol{x_{ij}}$ คือตัวแปรแบบ binary ที่มีค่า = 1 ถ้าได้เลือกทางเลือกนั้น หรือมีค่า = 0 ถ้าไม่ได้เลือก

$\boldsymbol{C}$ คือต้นทุนของโครงการทั้งหมด

$\boldsymbol{DC_{ij}}$ คือต้นทุนทางตรงของกิจกรรมที่ *i* ที่ใช้ทางเลือก *j*

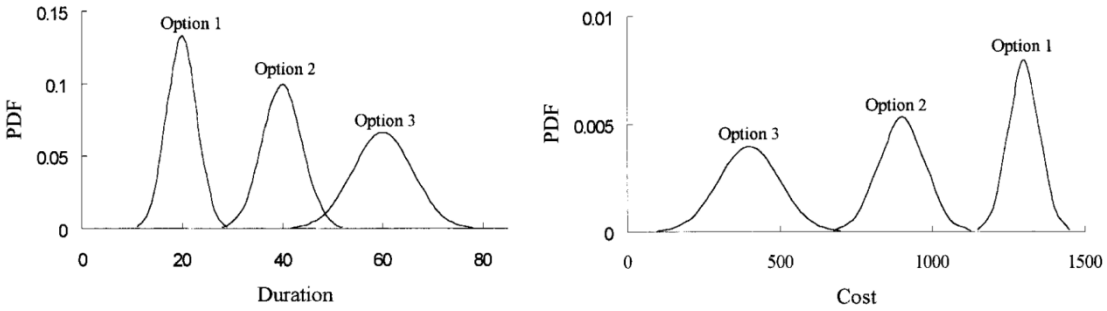
$\boldsymbol{IC_t}$ คืออัตราต้นทุนทางอ้อมของโครงการต่อหน่วยเวลา *t*

$\boldsymbol{T}$ คือระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ ที่ต้องการ

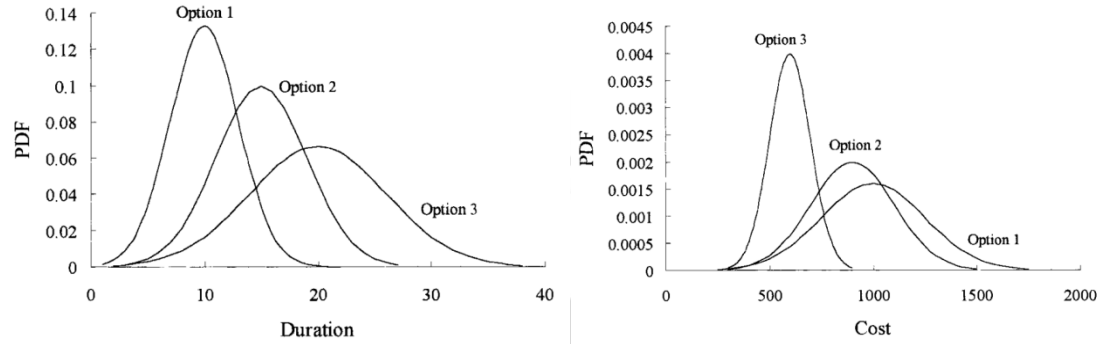
$\boldsymbol{EF_i}$ คือค่าเวลา EF ของกิจกรรมที่ *i*

เนื่องจากโมเดลปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างอาจแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการพิจารณาความไม่แน่นอน (uncertainties) ของค่าปัจจัยที่ใช้ในการวางแผน (เช่น ความไม่แน่นอนของต้นทุนและเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง) ดังนี้คือ การวางแผนด้วยค่าเวลาที่แน่นอน (Deterministic scheduling) (เช่น งานของ Chassiakos and Sakellaropoulos (2005)) กับการวางแผนด้วยค่าเวลาที่ไม่แน่นอน (Non-deterministic scheduling) ตัวอย่างหลักการที่ใช้สำหรับการวางแผนด้วยค่าเวลาที่ไม่แน่นอน ได้แก่ Program Evaluation and Review Technique (PERT), Monte Carlo Simulation, Fuzzy network scheduling (FNET) (Lorterapong and Moselhi 1996) ซึ่งการทบทวนงานวิจัยจะเน้นไปทางกลุ่มที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นแนวทางที่ก้าวหน้าที่ต่างออกไปจากแนวทางเดิมในกลุ่มที่ 1 โดยอาจจะเรียกโมเดลปัญหาการแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุนที่ได้ของกลุ่มที่ 2 ว่า Stochastic TCT

ในทางปฏิบัติแล้ว ระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมต่างๆควรเป็น “ค่าที่ไม่แน่นอน”(uncertain values)เนื่องมาจากความไม่แน่นอนของปัจจัยสภาพการทำงานตามธรรมชาติของงานก่อสร้าง จึงทำให้โมเดลปัญหา TCT ที่แท้จริงแล้วมีลักษณะเป็นแบบ stochastic (Feng, L Liu, and Burns 2000) การพิจารณาปัญหา TCT แบบ deterministic จึงเสมือนกับการพิจารณาเฉพาะค่า mean ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละกิจกรรมเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงเรื่องการกระจายของความน่าจะเป็น (probability distributions) ทั้งนี้ probability distributions ของทางเลือกหนึ่งใดๆ อาจจะแคบหรือกว้างบ่งชี้ถึงดีกรีความไม่แน่นอนของทางเลือกนั้น ซึ่งระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมหนึ่งใดๆอาจมีprobability distributions ที่ไม่ซ้อนเหลื่อมหรือซ้อนเหลื่อมกันก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 หรือรูปที่ 2.6 ซึ่งหากในกรณีที่ซ้อนเหลื่อมกันจะทำให้การพิจารณาปัญหา TCT แบบ deterministic ไม่ถูกต้องและเหมาะสม

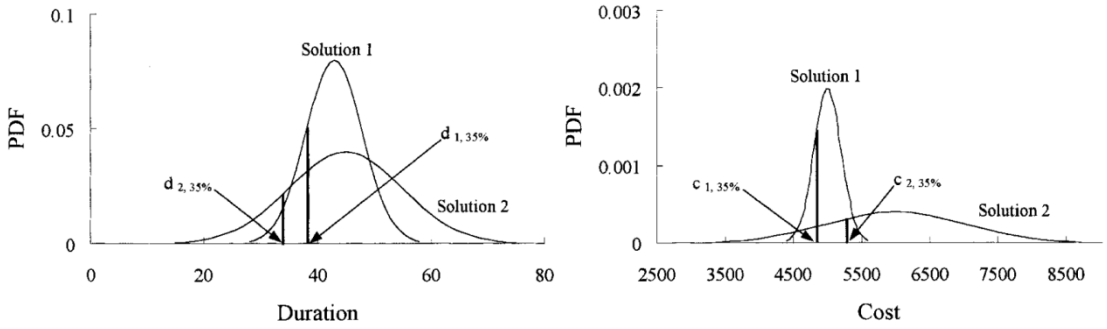


รูปที่ 2.5 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใดๆที่ไม่ซ้อนเหลื่อมกัน (Feng, L Liu, and Burns 2000)



รูปที่ 2.6 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใดๆที่ซ้อนเหลื่อมกัน (Feng, L Liu, and Burns 2000)

การหาคำตอบของปัญหา deterministic TCT เป็นการพิจารณาระยะเวลาและต้นทุนของโครงการ ซึ่งเสมือนกับเป็นผลรวมของค่า mean ของระยะเวลาและต้นทุนของกิจกรรมเท่านั้น แต่หากพิจารณาว่าระยะเวลาและต้นทุนของโครงการมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติแล้ว (Normal Probability Distribution) คำตอบที่ได้อาจไม่ถูกต้องเสมอไป ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.7 กำหนดให้คำตอบที่ 1 มีค่า mean ของระยะเวลาและต้นทุนของโครงการต่ำกว่าและมีการกระจายความน่าจะเป็นน้อยกว่าคำตอบที่ 2 หากพิจารณาเฉพาะค่า mean แล้วจะสรุปว่า คำตอบที่ 1 ดีกว่า 2 เนื่องจากมีทั้งระยะเวลาและต้นทุนต่ำกว่า แต่หากพิจารณาที่ percentile 35 แล้วจะไม่สามารถสรุปได้ว่า คำตอบที่ 1 ดีกว่า 2 ดังนั้น Feng et al. (2000)จึงได้เสนอการใช้หลักการวิเคราะห์ทางสถิติความน่าจะเป็นเพื่อใช้ในการประเมินคำตอบที่ได้จากโมเดลปัญหา stochasticTCT



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการกระจายความน่าจะเป็นของระยะเวลาและต้นทุนโครงการที่เป็นคำตอบ 2 คำตอบ (Feng, L Liu, and Burns 2000)

การพิจารณาค่าระยะเวลาและต้นทุนของกิจกรรมก่อสร้างเป็นแบบ stochastic และกำหนดค่าด้วยการสุ่มค่าจากฟังก์ชันการกระจายความน่าจะเป็น (ProbabilityDensity Function: PDF) เป็นแนวคิดที่มีเหตุมีผล และสอดคล้องกับลักษณะสภาพการณ์จริงที่เกิดในสถานที่ก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์กระจายความน่าจะเป็นเช่นนี้ต้องอาศัยข้อมูลพื้นฐานทางสถิติของกิจกรรมนั้น ซึ่งบางกิจกรรมก่อสร้างอาจมีข้อมูลไม่เพียงพอทำให้ประสบปัญหาในการนำหลักการไปปฏิบัติใช้ ดังนั้น Leu et al. (2001) จึงได้เสนอให้ใช้ทฤษฎีฟัซซี่เซ็ต (fuzzy set theory) แทน พวกเขาได้อ้างว่านักวิจัยส่วนใหญ่พิจารณาปัญหา TCT ด้วยการกำหนดค่าระยะเวลาและต้นทุนของกิจกรรมที่แน่นอน (crisp values) และการใช้หลักการกระจายความน่าจะเป็นก็เป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าเนื่องจากต้องเก็บบันทึกข้อมูลทางสถิติของทุกกิจกรรม การใช้ทฤษฎีฟัซซี่เซ็ตจึงเหมาะสมกว่าเนื่องจากไม่ต้องการข้อมูลทางสถิติที่สมบูรณ์

ฟัซซี่เซ็ตคือทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน (uncertainty) และไม่ชัดเจน (imprecision) แต่ไม่มีลักษณะทางสถิติ (Zadeh 1965) ฟัซซี่เซ็ตสามารถใช้แปลงความกำกวมทางภาษา (linguistic variable) ไปเป็นรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ เช่น ตัวเลข “ประมาณ 20” เขียนให้อยู่ในรูปฟัซซี่เซ็ตได้เท่ากับ A ดังนี้

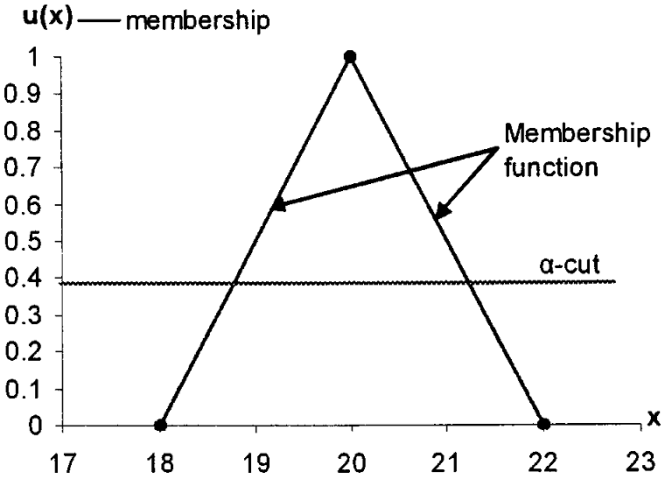
$$\boldsymbol{A} = \{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\mu_A}(\boldsymbol{x}))|\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X}\} \qquad \textbf{สมการที่ (2.13)}$$

โดยที่ A คือฟัซซี่เซ็ตของค่าตัวแปร

x คือสมาชิกของฟัซซี่เซ็ต A

X คือช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้

$\boldsymbol{\mu_A}$คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ที่มีค่าตั้งแต่ [0,1] แสดงถึงดีกรีที่ x เป็นสมาชิกของ fuzzy set A

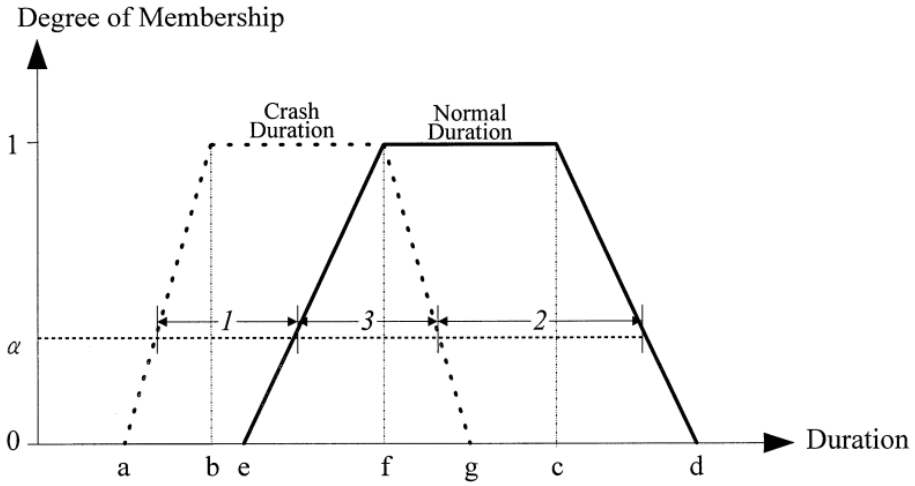


รูปที่ 2.8 ฟัซซี่เซ็ตของ “ประมาณ 20” (Zheng and Ng 2005)

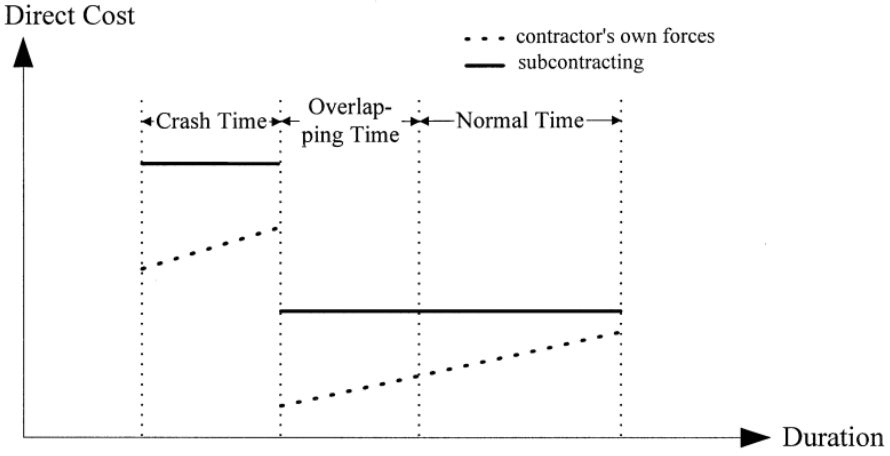
α-cut level เป็นการกำหนดระดับการยอมรับความเสี่ยงของค่าตัวแปร โดยจะยอมรับ x เฉพาะที่มีค่าความเป็นสมาชิก (μ_A) ที่มากกว่าเท่ากับ α การกำหนด α-cut level ทำให้ค่าตัวเลขฟัซซี่ถูกแปลงให้อยู่ในรูปเซ็ตของตัวเลขที่แน่นอน (crispsets) ได้ ลักษณะของฟังก์ชันสมาชิกและ α-cut level แสดงในรูปที่ 2.8

$$^{\alpha}A = \{(x, \mu_A(x) \geq \alpha) | x \in X\}; \forall \alpha \in [0, 1] \qquad \text{สมการที่ (2.14)}$$

ด้วยความไม่แน่นอนของระยะเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง จึงสามารถถูกกำหนดให้เป็นตัวเลขฟัซซี่ และระดับการยอมรับความเสี่ยง (acceptable risk level) ถูกกำหนดด้วย α-cut level จึงสามารถแปลงให้ตัวเลขฟัซซี่กลายเป็นตัวเลขแบบ crisp sets จากนั้นจึงนำตัวเลข crisp sets ไปวิเคราะห์ในแบบ deterministic ได้ อย่างไรก็ตามค่า α ที่กำหนดจะส่งผลต่อคำตอบที่ได้ Leu et al. (2001) ได้พัฒนาโมเดลปัญหา fuzzy TCT เพื่อหาคำตอบและได้ปรับเปลี่ยนค่า α ที่ต่างๆกันสำหรับให้ผู้วางแผนได้ใช้ในการตัดสินใจ พวกเขาได้กำหนดแบ่งช่วงระยะเวลาฟัซซี่ของกิจกรรมในแบบปกติและเร่งรัดออกเป็น3 ช่วงคือ 1.ช่วงเร่งรัด 2.ช่วงปกติ และ3.ช่วงซ้อนเหลื่อม ดังกราฟในรูปที่ 2.9 โดยที่ช่วงเร่งรัดนี้จะมีความสัมพันธ์กับต้นทุนแบบเร่งรัด และช่วงปกติจะมีความสัมพันธ์กับต้นทุนแบบปกติ ในขณะที่ช่วงซ้อนเหลื่อมควรจะมีความสัมพันธ์กับต้นทุนแบบปกติด้วย เนื่องจากหลักการของ TCT จะพยายามหาหนทางให้กิจกรรมก่อสร้างถูกดำเนินการด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 2.9 ระยะเวลาฟัซซี่ของกิจกรรมในแบบปกติและเร่งรัด (SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001)

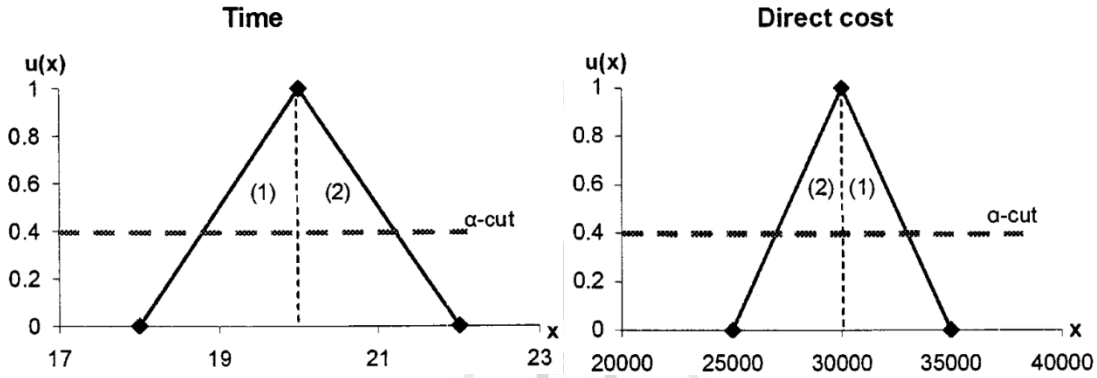


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนของกิจกรรม (SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001)

Leu et al. (2001) ยังได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่กับต้นทุนที่ควรจะเป็นดังกราฟในรูปที่ 2.10 โดยแบ่งออกเป็นสองกรณีคือกรณีที่ผู้รับเหมาหลักดำเนินการและกรณีที่ผู้รับเหมาช่วงดำเนินการ หากเป็นกรณีที่ผู้รับเหมาช่วงดำเนินการต้นทุนของกิจกรรมจะมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับว่าอยู่ในช่วงการเร่งรัดหรือช่วงปกติกับช่วงซ้อนเหลื่อม ในกรณีที่ผู้รับเหมาหลักดำเนินการจะมีต้นทุนของกิจกรรมแปรผันตามระยะเวลา (ขึ้นอยู่กับว่าเป็นช่วงการเร่งรัดหรือช่วงปกติกับช่วงซ้อนเหลื่อม) พวกเขาให้เหตุผลว่าการเร่งรัดงานจะต้องใช้ชุดของทรัพยากรแบบเร่งรัดที่สามารถประมาณต้นทุนค่าใช้ให้อยู่ในรูปของอัตราค่าใช้ต่อหน่วยเวลาได้ และการทำงานแบบปกติก็สามารถคิดต้นทุนเป็นอัตราค่าใช้ต่อหน่วยเวลาได้เช่นกัน

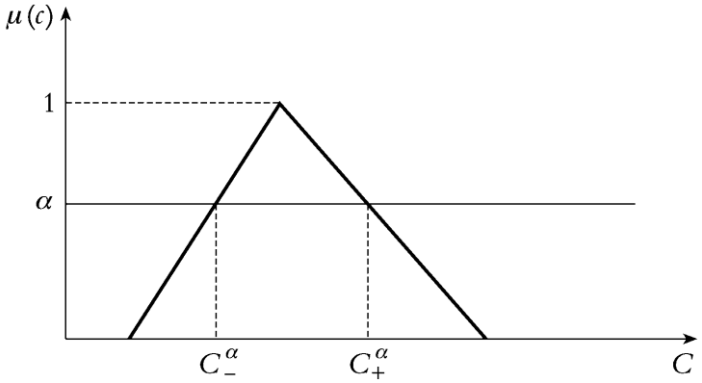
อย่างไรก็ตาม Zheng and Ng (2005) ได้แย้งว่าการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่กับต้นทุนด้วยกราฟเส้นตรงแบ่งเป็นช่วงๆนั้น ไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง เนื่องจาก

ระยะเวลาของกิจกรรมขึ้นกับวิธีการดำเนินการ (execution methods) ที่เลือกใช้ ต้นทุนของกิจกรรมในแต่ละทางเลือกจึงไม่ควรจะสัมพันธ์กับระยะเวลาเป็นแบบเส้นตรงหรือต่อเนื่อง พวกเขาจึงเสนอให้กำหนดระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนฟัซซี่ที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete values) สำหรับแต่ละวิธีการดำเนินการ เนื่องจากสภาพความไม่แน่นอนของงานก่อสร้างสามารถส่งผลได้ต่อทั้งระยะเวลาและต้นทุนดังแสดงในรูปที่ 2.11 พื้นใต้กราฟระยะเวลาและกราฟต้นทุนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ (1) แสดงถึงเหตุการณ์ที่ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าและเกิดต้นทุนมากกว่า ส่วนที่ (2) แสดงถึงเหตุการณ์ที่ใช้ระยะเวลานานกว่าและเกิดต้นทุนน้อยกว่า พวกเขาเสนอขั้นตอนการหาค่าระยะเวลาและต้นทุนในแบบฟัซซี่ดังนี้ เริ่มจากให้กำหนด α-cut level ขึ้นก่อน ต่อมาให้สุ่มเลือก (randomly select) ค่าระยะเวลาจากพื้นที่ส่วนบนของแนวตัด α นั้น ถ้าสุ่มได้ค่าระยะเวลาที่ตกอยู่ในส่วนที่ (1) ให้สุ่มเลือกค่าต้นทุนจากส่วนที่ (1) ด้วยและทางกลับกันหากเป็นส่วนที่ (2)



รูปที่ 2.11 ระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนฟัซซี่ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรม (Zheng and Ng 2005)

ในขณะที่ Eshtehardian et al. (2008) ได้แย้งว่าการกำหนดค่าระยะเวลาและต้นทุนด้วยการสุ่มเลือก (randomly select) ไม่ได้สะท้อนถึงหลักการของฟัซซี่เซ็ตที่แท้จริง พวกเขากล่าวว่ากิจกรรมหนึ่งใดๆอาจมีวิธีการดำเนินการได้หลายทางเลือก (execution methods) โดยที่แต่ละทางเลือกจะให้ค่าระยะเวลาค่าหนึ่งที่เป็นแบบ deterministic แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนทำให้เกิดต้นทุนฟัซซี่ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ต้นทุนฟัซซี่ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรมที่ α-cut level

$$C_\alpha = [c_\alpha^-, c_\alpha^+] \qquad \text{สมการที่ (2.15)}$$

โดยที่ C_α = ต้นทุนฟัซซี่ที่ α-cut level ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรม

c_α^- และ c_α^+ = ขอบเขตล่างและขอบเขตบนของต้นทุนที่ α-cut level

ผลรวมของต้นทุนฟัซซี่ของสองกิจกรรมใดๆ จะต้องใช้คณิตศาสตร์ของตัวเลขฟัซซี่ในการหาผลรวม โดยค่าผลรวมของตัวเลขฟัซซี่ C_1 และ C_2 เป็นดังนี้

$$(C_1 + C_2)_\alpha = [c_{1\alpha}^- + c_{2\alpha}^-, c_{1\alpha}^+ + c_{2\alpha}^+] \qquad \text{สมการที่ (2.16)}$$

ดังนั้นจะได้ว่าผลรวมของต้นทุนฟัซซี่ของกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ (ที่เกิดจากส่วนผสมทางเลือกของกิจกรรมต่างๆ ที่ให้ค่าระยะเวลาโครงการค่าหนึ่ง) จะถูกพิจารณาเป็นตัวเลขฟัซซี่ การเปรียบเทียบต้นทุนฟัซซี่ที่เป็นคำตอบของโมเดลปัญหาอาจกระทำได้ 2 ลักษณะคือ 1 โดยการแปลงให้ต้นทุนฟัซซี่รวมของโครงการกลายเป็นค่าแบบ crisp value ด้วยการหาจุด centroid ของรูปพื้นที่กราฟของต้นทุนฟัซซี่รวมนั้น โดยให้ C^* คือต้นทุนโครงการแบบ crisp value

$$C^* = \frac{\int c \cdot \mu(c) \cdot dc}{\int \mu(c) \cdot dc} \qquad \text{สมการที่ (2.17)}$$

การเปรียบเทียบลักษณะที่ 2 โดยการเปรียบเทียบด้วยคณิตศาสตร์ของตัวเลขฟัซซี่เอง โดยตัวเลขฟัซซี่ C_1และ C_2 ใดๆ จะได้ว่า

$$\forall \alpha \in (0, 1]: c_{1\alpha}^- \geq c_{2\alpha}^- \; and \; c_{1\alpha}^+ \geq c_{2\alpha}^+ \Rightarrow C_1 \geq C_2 \qquad \text{สมการที่ (2.18)}$$

หรือการเปรียบเทียบตัวเลขฟัซซี่อาจทำด้วยการหาระยะ Hamming distance ดังนั้นงานของ Eshtehardian et al. (2008) จึงได้พิจารณาปัญหาด้วยทฤษฎีฟัซซี่ที่แท้จริง การนำคณิตศาสตร์ของตัวเลขฟัซซี่มาใช้ยังพบได้ในงานของ Lorterapong and Moselhi (1996) ที่ได้เสนอวิธีการแบบฟัซซี่เลข (fuzzy sets operations) มาใช้ในการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมต่างๆ และสายทางกิจกรรมวิกฤต เนื่องจากค่าระยะเวลาของกิจกรรมใดๆมีลักษณะเป็นแบบตัวเลขฟัซซี่ พวกเขาได้เรียกวิธีการคำนวณเน็ตเวิร์คนี้ว่า Fuzzy network scheduling (FNET)

2.2.2 การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด

การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด (Resource allocation)เป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดการกับทรัพยากรโครงการประเภทต่างๆที่มีอยู่อย่างจำนวนจำกัด ได้แก่ แรงงาน, เครื่องจักร, พื้นที่ทำงาน เป็นต้น และจะต้องจัดสรรใช้ไม่เกินกว่าขีดจำกัดนี้ (availability)ด้วยหลักการที่ว่า

กิจกรรมก่อสร้างใด ๆมีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทต่าง ๆในปริมาณที่กำหนดแตกต่างกันไป กิจกรรมสองกิจกรรมใดที่ใช้ทรัพยากรเดียวกันและมีกำหนดเวลาดำเนินการซ้อนทับกัน จะทำให้ผลรวมจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรนั้นเพิ่มขึ้น โดยที่ ณ ขณะเวลาหนึ่ง จะไม่สามารถจัดสรรทรัพยากรหนึ่งได้เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ แนวทางที่ทำได้โดยที่ต้องรักษาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (dependence constraints) ไว้ คือการเลื่อนกิจกรรมหนึ่งออกไปแล้วดำเนินการในช่วงเวลาที่ไม่ทำให้เกิดการแย่งชิงทรัพยากรกัน คำตอบของปัญหาจึงเป็นกำหนดวันดำเนินการของกิจกรรมต่าง ๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรทุกประเภทไม่เกินขีดจำกัดและได้ระยะเวลาโครงการที่สั้นที่สุดหรืออาจกล่าวได้ว่าปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดมีเป้าหมายในการจัดเรียงลำดับกิจกรรมต่าง ๆที่เหมาะสม ปัญหานี้จึงสามารถจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาประเภทการจัดเรียงลำดับ (S-S Leu and C-H Yang 1999) สมการทั่วไปของโมเดลปัญหา Resource allocation มีดังนี้

Decision variables: ES_i = เวลาเริ่มที่เร็วที่สุด (Earliest start) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize\ T = Max\{EF_i\}; \forall i} \qquad \textbf{สมการที่ (2.19)}$$

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

และ Activity dependency

โดยที่ T คือระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ

t คือวันที่ใด ๆของโครงการ

$\boldsymbol{rr_{ikt}}$ คือจำนวนทรัพยากรประเภท k ที่กิจกรรม i ต้องการใช้ในวันที่ t

$\boldsymbol{RR_k}$ คือจำนวนทรัพยากรประเภท k ที่มีอยู่

ส่วนงานของ Ellis and Kim (2005) ได้เสนออีกวิธีการในการโมเดลปัญหาการจัดสรรทรัพยากร ด้วยใช้หลักการของ future float เพื่อจัดลำดับความสำคัญของกิจกรรมต่าง ๆที่มีแย่งชิงการใช้ทรัพยากรกัน และใช้เทคนิค genetic algorithms ในการหาคำตอบที่ให้ระยะเวลาโครงการสั้นที่สุด

2.2.3 การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร

การปรับสมดุลระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling)เป็นปัญหาที่มีเป้าประสงค์ในการกำหนดหาวันดำเนินการของกิจกรรมต่าง ๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่าง ๆในแต่ละหน่วยเวลาใด ๆมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาโครงการ ภายในระยะเวลาของโครงการที่กำหนด

และยังคงต้องรักษาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (dependence constraints) โดยต้องมีสมมติฐานที่ให้ความยืดหยุ่นในข้อจำกัดของจำนวนทรัพยากร (หรือกำหนดให้มีจำนวนไม่จำกัด)เมื่อผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่าง ๆในแต่ละหน่วยเวลาใด ๆมีความผันผวน (fluctuation) น้อยและเข้าใกล้ค่าเฉลี่ย จะทำให้ทรัพยากรโครงการที่ต้องจัดหาไว้มีจำนวนน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ด้วยหลักการที่ว่า กิจกรรมก่อสร้างใด ๆมีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทต่าง ๆในปริมาณที่กำหนดแตกต่างกันไป กิจกรรมสองกิจกรรมใดที่ใช้ทรัพยากรเดียวกันและมีกำหนดเวลาดำเนินการซ้อนทับกัน จะทำให้ผลรวมจำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรนั้นเพิ่มขึ้น แนวทางการหาคำตอบที่ทำได้คือการเลื่อนกำหนดวันดำเนินการของกิจกรรมต่าง ๆที่ทำให้ผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรแต่ละประเภทมีค่าที่คงที่ที่สุด

ดัชนีที่ใช้บ่งชี้ความผันผวนของความต้องการใช้ทรัพยากรแต่ละประเภท มีใช้กันอยู่สองลักษณะคือ ค่าความเบี่ยงเบน (Resource deviation index) (Chan, Chua, and Kannan 1996) (S-S Leu, C-H Yang, and J-C Huang 2000) และโมเมนต์ของความผันผวน (Fluctuation moment) (Harris 1978); (Hegazy 1999)สมการทั่วไปของโมเดลปัญหา Resource leveling แบบการหาค่าความเบี่ยงเบนน้อยที่สุด มีดังต่อไปนี้

Decision variables: $\boldsymbol{ST_i}$ = เวลาเริ่ม (Start time) ของกิจกรรมที่ i

Objective function:

$$\boldsymbol{Minimize\ RDI} = \sum_k^K \boldsymbol{w_k\, RD_k} \qquad \textbf{สมการที่ (2.20)}$$

$$\boldsymbol{RD} = \sum_t^T (|\boldsymbol{r_t} - \boldsymbol{\bar{R}}|) \qquad \textbf{สมการที่ (2.21)}$$

$$\boldsymbol{r_t} = (\sum_i^n \boldsymbol{r_i})_t \qquad \textbf{สมการที่ (2.22)}$$

$$\boldsymbol{\bar{R}} = \sum_t^T \sum_i^n (\boldsymbol{r_i})_t \,/\boldsymbol{T} \qquad \textbf{สมการที่ (2.23)}$$

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

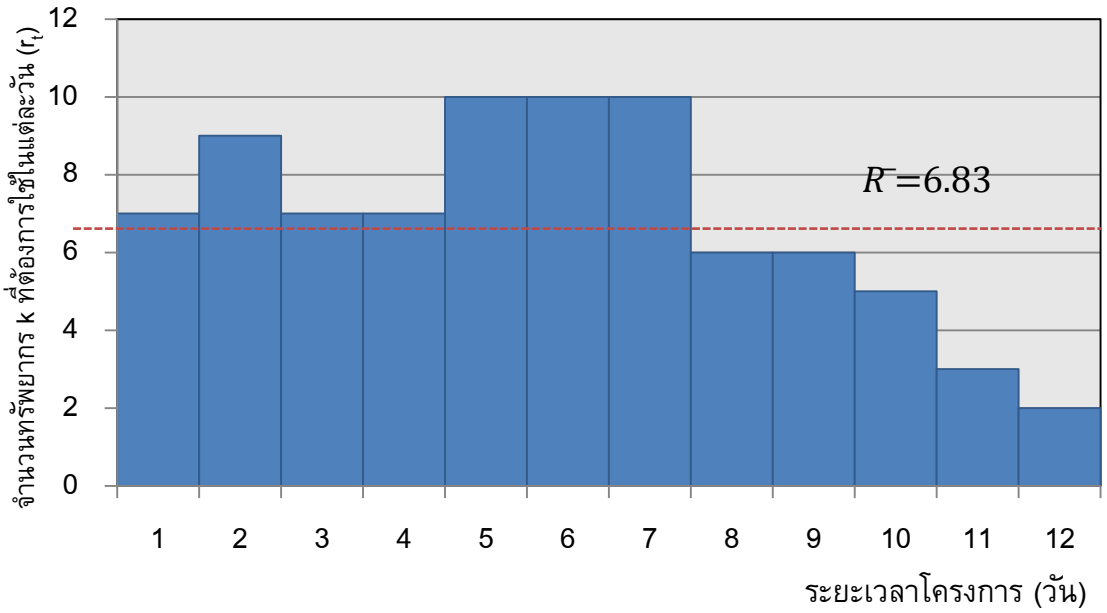
r_i = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ของกิจกรรมที่ i

n = จำนวนกิจกรรมทั้งหมด

t = วันที่ใดๆของโครงการ

$\bar{R}$ = จำนวนทรัพยากรเฉลี่ยที่ต้องการในแต่ละวัน

T = ระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ



รูปที่ 2.13 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและการแทนค่าตัวแปร

สมการทั่วไปของโมเดลปัญหา Resource leveling แบบการหาค่าโมเมนต์ของความผันผวนน้อยที่สุด มีดังนี้

Decision variables: ES_i = เวลาเริ่มที่เร็วที่สุด (Earliest start) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize} \sum_k^K (M_{xk} + M_{yk}) \qquad \textbf{สมการที่ (2.24)}$$

$$M_x = \sum_t^T (r_t)^2 \qquad \textbf{สมการที่ (2.25)}$$

$$M_y = \sum_t^T (r_t \cdot (t - d)) \qquad \textbf{สมการที่ (2.26)}$$

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

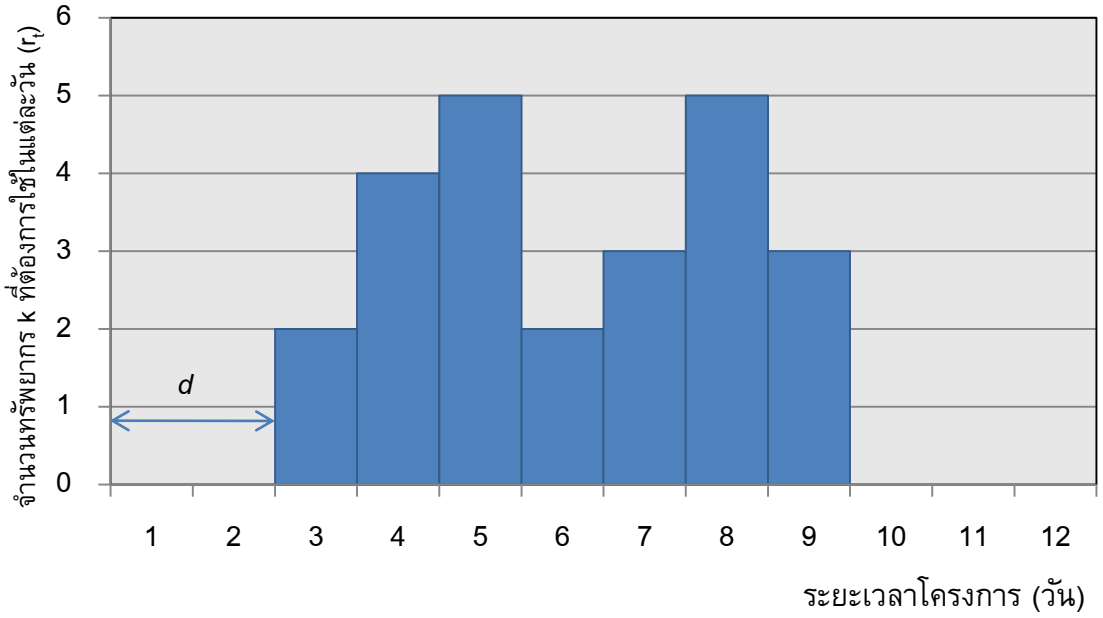
Activity dependency

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

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

r_t = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ในวันที่ t ใดๆ

d = วันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทหนึ่ง



รูปที่ 2.14 แผนภูมิแท่งแสดงความต้องการใช้ทรัพยากรในแต่ละวันและการแทนค่าตัวแปร

2.2.4 กระแสเงินสดกับวงเงินเครดิต

เงินสดจัดเป็นทรัพยากรที่สำคัญประเภทหนึ่งของโครงการ ปริมาณเงินสดคงเหลือที่เวลาต่างๆของโครงการมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอไม่คงที่ และมีลักษณะเหมือนกระแสน้ำที่ไหลเข้าและไหลออก จึงเรียกการเคลื่อนไหวของเงินสดว่า “กระแสเงินสด” (Cash flow) กระแสเงินสดเข้า (Cash inflow) และ กระแสเงินสดออก (Cash outflow) ความสามารถของบริษัทก่อสร้างในการจัดหาเงินสดอย่างเพียงพอสำหรับการดำเนินโครงการในช่วงเวลาต่างๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งอย่างหนึ่งในการดำเนินธุรกิจก่อสร้าง การจัดหาเงินสดนี้ยังต้องทำให้เกิดต้นทุนทางการเงินต่ำที่สุด หากปราศจากปริมาณเงินสดที่เพียงพอกับความต้องการใช้แล้วงานที่วางแผนไว้ก็ไม่อาจดำเนินการได้ กระแสเงินสดกับวงเงินเครดิตจึงเป็นเงื่อนไขสำคัญที่ต้องพิจารณาในการวางแผนงานก่อสร้าง

โดยทั่วไปแล้วการจัดหาเงินสดสำหรับโครงการก่อสร้างจะใช้ “เงินกู้เบิกเกินบัญชี” (Overdraft) จากสถาบันการเงิน ที่จำกัด “วงเงินเครดิต” (Credit limit) ไว้ด้วย ซึ่งหมายความว่ายอดกระแสเงินสดรวมสะสมที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆของโครงการ จะต้องไม่เกินยอดวงเงินเครดิตที่อนุญาตให้ไว้นี้ เงินงวดงานที่บริษัทก่อสร้างได้จากเจ้าของงานเป็นรายรับจะต้องนำไปเป็นกระแสเงินสดเข้าเพื่อหักล้างกับกระแสเงินสดออก บริษัทก่อสร้างจึงต้องวางแผนงานก่อสร้างของตนไม่ให้เกิดยอดกระแสเงินสดรวมสะสมเกินกว่าวงเกินเครดิตที่ได้รับจากการใช้เงินกู้เบิกเกินบัญชี ซึ่งเรียกการวางแผนนี้ว่า การวางแผนที่อ้างอิงการเงิน (Finance-based scheduling) (Elazouni and Gab-Allah 2004)

กระแสเงินสดของโครงการ คือปริมาณเงินสด (cash) ที่คงเหลืออยู่ ที่เวลาต่างๆของโครงการ ซึ่งโดยปกติแล้วจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาไม่คงที่ อันเป็นผลมาจากกระแสเงินสดออก (Cash outflow) ที่ไหลออกไปเป็นค่าใช้จ่ายต่างๆ (ทั้งต้นทุนทางตรง ทางอ้อม และค่าดำเนินการ) สมมติให้มีค่าเป็นจำนวนลบ และกระแสเงินสดเข้า (Cash inflow) ที่ไหลเข้ามาเป็นรายรับที่มาจาก “เงินงวดงาน” (Progress payments) ที่ได้รับจากเจ้าของโครงการ สมมติให้มีค่าเป็นจำนวนบวก ปริมาณเงินสด ณ ขณะเวลาหนึ่งจึงหาได้จากเงินสดสะสมที่รับเข้ามาแล้วทั้งหมด หักกับเงินสดสะสมที่จ่ายออกไปแล้วทั้งหมด หากปริมาณเงินสดที่เวลาหนึ่งได้ค่าเป็นจำนวนลบจะแสดงถึงยอดเงินกู้เบิกเกินบัญชีที่เกิดขึ้น แต่หากปริมาณเงินสดที่เวลาหนึ่งได้ค่าเป็นจำนวนบวกจะแสดงถึงยอดเงินฝาก มีปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระแสเงินสดของโครงการ ได้แก่

1. แผนการเบิกจ่ายเงินงวดงานที่ระบุอยู่ในข้อสัญญาก่อสร้าง ซึ่งปกติมักเป็นมีรอบการเบิกจ่ายเป็นรายเดือนทุกเดือน เงินงวดงานเหล่านี้คือรายรับหลักที่จะได้มาจากเจ้าของโครงการ ซึ่งผู้รับเหมาต้องศึกษาข้อสัญญาเหล่านี้ เงื่อนไขการขอเบิกเงินงวดงานให้ละเอียดถ่องแท้

2. ระยะเวลาการเบิกจ่ายเงินงวดงาน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อที่มาของเงินรายได้ ซึ่งนอกจากจะต้องเข้าใจเงื่อนไขการขอเบิกเงินงวดงานแล้ว จะต้องหาว่าระยะเวลาที่รายได้ที่เป็นรูปเงินสดนั้นจะสามารถได้รับเมื่อใด ซึ่งปกติอาจมีช่องเวลาระหว่างการส่งมอบงวดงาน การตรวจรับงวดงาน และการได้รับเงินงวดงาน (เป็นเงินสด)

3. “เงินล่วงหน้า” (advanced payment) หรือเงินงวดที่ให้สำหรับค่าเคลื่อนย้ายเข้าสถานที่ก่อสร้าง หรือเรียกอีกอย่างว่า mobilization โดยเจ้าของโครงการตกลงให้เงินล่วงหน้านี้เป็นจำนวนตามแต่ที่เห็นสมควรตั้งแต่เริ่มโครงการโดยที่งานก่อสร้างยังไม่ได้เริ่มต้นขึ้น เงินล่วงหน้าเป็นเงินที่จะดึงมาจากเงินงวดงานตอนท้ายๆโครงการที่ต้องให้บริษัทก่อสร้างนั่นเอง

4. บางโครงการ เจ้าของโครงการอาจหักเงินงวดงานที่ควรได้รับ เก็บสะสมไว้เป็น “เงินประกันผลงาน” (Retainage or Retention) ซึ่งอาจจะกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ อัตราปกติสำหรับงานก่อสร้าง เช่น ร้อยละ 5, 10, หรือ 15 เป็นต้น และเงินประกันผลงานนี้จะรวมและจ่ายคืนให้กับบริษัทก่อสร้างเมื่อโครงการก่อสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์ หลักการของการเก็บสะสม Retainage นี้การเพื่อ

เป็นหลักประกันอีกชั้นสำหรับเจ้าของโครงการและเพื่อกระตุ้นให้บริษัทก่อสร้างทำงานโครงการให้แล้วเสร็จสมบูรณ์โดยไม่ทิ้งงานไปกลางคัน

5. ระยะเวลาเครดิต หมายถึง ช่วงเวลาระหว่างที่ได้ใช้จ่ายเงินเพื่อซื้อ วัสดุ เช่าเครื่องจักร จ้างผู้รับเหมาช่วง กับเวลาที่ต้องชำระค่าใช้จ่ายนั้นเป็นเงินสดจริง ซึ่งอาจทิ้งช่วงเวลาเป็นเดือน เช่น เมื่อซื้อวัสดุก่อสร้างจากร้านค้าก็สามารถนำวัสดุมาใช้งานได้เลย ยังไม่ต้องจ่ายเงินสด โดยทางร้านมีระยะเวลาเครดิตให้มาชำระเงินภายหลัง ทั้งนี้ต้นทุนแต่ละประเภทจะมีระยะเวลาเครดิตไม่เท่ากัน

6. การสต็อกวัสดุที่หน้างาน วัสดุพิเศษบางรายการหาซื้อยากและมีราคาแพง หรือวัสดุก่อสร้างธรรมดาทั่วไปที่ต้องใช้จำนวนมากๆ อาจจะต้องสั่งซื้อไว้ล่วงหน้าแต่เนิ่นๆมาเก็บไว้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ โดยอาจยังไม่สามารถติดตั้งได้ จึงเท่ากับว่าเป็นต้นทุนที่ยังไม่ได้ก่อให้เกิดรายได้เป็นเงินกลับคืน

7. อัตราดอกเบี้ยทั้งเงินฝากและเงินกู้ และการวิธีคิดดอกเบี้ยของสถาบันการเงินนั้น ถ้าหากว่ากระแสเงินสดสะสม ณ ขณะเวลาใดๆเป็นลบ หมายถึงมีเงินสดออกสะสมมากกว่าเข้าสะสม เงินส่วนที่ขาดไปนั้นมักจะได้มาจากสถาบันการเงินหรือธนาคาร โดยอาจเป็นในรูปของ “เงินเบิกเกินบัญชี” (overdraft) ซึ่งทางธนาคารจะคิดอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ประเภทเงินเบิกเกินบัญชี ปกติธนาคารจะกำหนดอัตราดอกเบี้ย overdraft ขั้นต่ำไว้ที่ Minimum Overdraft Rate (MOR) ส่วนบริษัทก่อสร้างจะต้องเสียเท่าใดก็ขึ้นกับประวัติทางการเงินและความเสี่ยงในการดำเนินธุรกิจของบริษัทก่อสร้างแต่ละราย

งานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาเกี่ยวกับกระแสเงินสดของโครงการก่อสร้างได้แก่งานของ Chen et al. (2005) ได้ศึกษาผลความสำคัญของเงื่อนไขการจ่ายเงิน ได้แก่ ระยะเวลาการจ่ายเงินตามหลัง, ส่วนประกอบของค่าใช้จ่ายประเภทต่างๆ และความถี่ของการจ่ายเงิน นอกจากนี้ยังประเมินความถูกต้องของกระแสเงินสด งานวิจัยของ Park et al. (2005) ได้ใช้เทคนิค moving weights ของหมวดประเภทของต้นทุนที่ขึ้นอยู่กับความก้าวหน้าของโครงการก่อสร้างเพื่อสร้างโมเดลสำหรับการคาดการณ์กระแสเงินสดที่จะเกิดได้อย่างถูกต้อง

สมการทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณกระแสเงินสดของโครงการก่อสร้าง มีดังนี้ ทั้งนี้รูปที่ 2.15 ได้แสดง profile ของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่างๆ พร้อมทั้งแสดงการอ้างอิงของตัวแปรต่างๆ

$$\boldsymbol{F_t = N_{t-1} + E_t} \qquad \textbf{สมการที่ (2.27)}$$

$$\boldsymbol{N_t = \widehat{F}_t + P_t} \qquad \textbf{สมการที่ (2.28)}$$

$$\boldsymbol{P_t = K \cdot E_t} \qquad \textbf{สมการที่ (2.29)}$$

$$\boldsymbol{K = (1 + \%profit) \cdot (1 - \%retainage)} \qquad \textbf{สมการที่ (2.30)}$$

โดยที่ให้ F_{t+1} = ยอดกระแสเงินสด(รวม)สะสม ก่อนรวมกระแสเงินเข้า ที่ขณะเวลา t+1

N_t = ยอดกระแสเงินสด(สุทธิ)สะสม หลังรวมกระแสเงินเข้า ที่ขณะเวลา t

E_t= กระแสเงินสดออก ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t

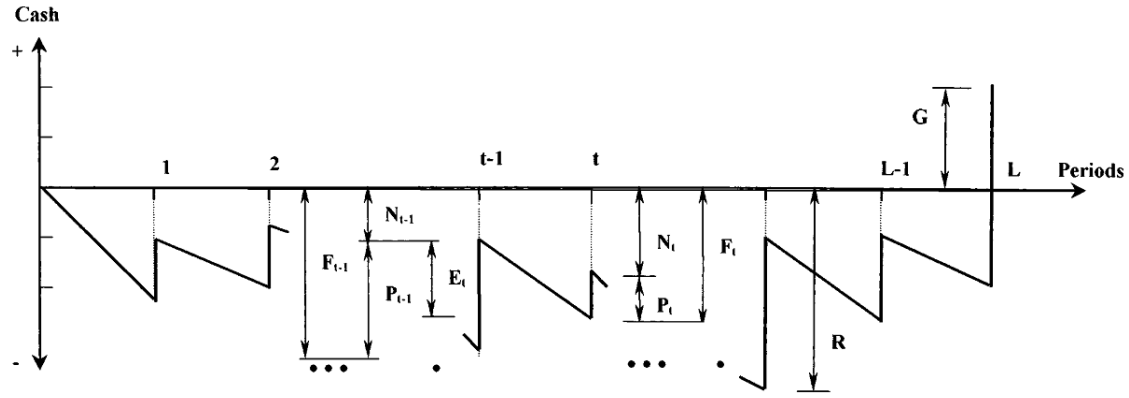
P_t = กระแสเงินสดเข้า ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t

K = อัตราส่วนเงินงวดงานที่ได้รับต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างงวด

G =ยอดกำไรของโครงการ

R = ยอดกระแสเงินสดรวมที่มากที่สุด (Maximum overdraft)

L = ช่วงเวลาสุดท้ายของโครงการ



รูปที่ 2.15 ลักษณะ Profile ของกระแสเงินสด (ไม่รวมดอกเบี้ย) ของโครงการก่อสร้าง (Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005)

ในกรณีที่ยอดเงินกู้เบิกเกินบัญชีถูกคิดดอกเบี้ยที่ตอนสิ้นช่วงเวลา tใดๆ สมการที่ใช้ในการคำนวณกระแสเงินสดจะเปลี่ยนไปเป็นดังนี้ ทั้งนี้รูปที่ 2.16 ได้แสดง profile ของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่างๆ พร้อมทั้งแสดงการอ้างอิงของตัวแปรต่างๆ

$$\boldsymbol{I_t = r(N_{t-1} + E_t/2) + i \cdot (W - \widehat{F}_{t-1})} \qquad \textbf{สมการที่ (2.31)}$$

$$\boldsymbol{\widehat{F}_t = F_t + I_t} \qquad \textbf{สมการที่ (2.32)}$$

$$N_t = \hat{F}_t + P_t \qquad \text{สมการที่ (2.33)}$$

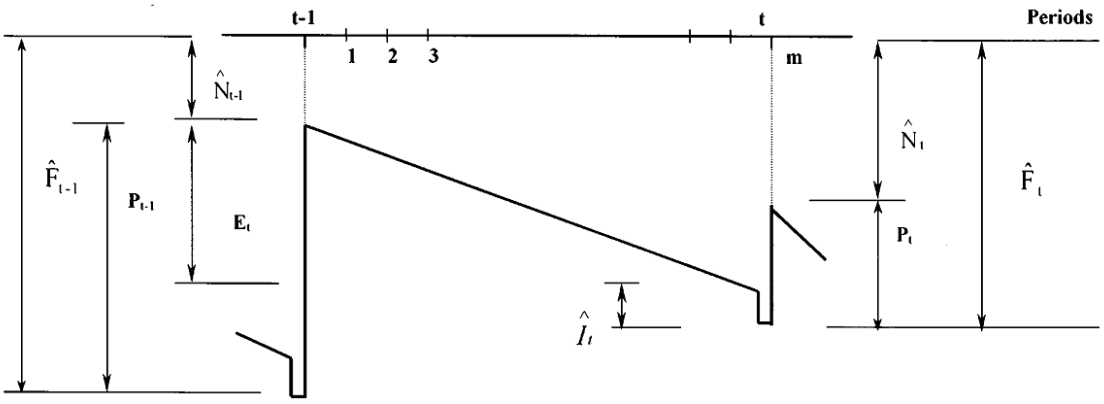
โดยที่ให้ I_t = ดอกเบี้ยที่คิดจากยอดเงินกู้ที่ขณะเวลา t

r = อัตราดอกเบี้ยในช่วงเวลา t

E_t= กระแสเงินสดออก ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t

$\hat{F}_t$ = ยอดกระแสเงินสด(รวม)สะสมหลังจากการคิดดอกเบี้ยทบต้นที่ขณะเวลา t

N_t = ยอดกระแสเงินสด(สุทธิ)สะสม หลังรวมกระแสเงินเข้าหลังจากการคิดดอกเบี้ยทบต้น ที่ขณะเวลา t



รูปที่ 2.16 ลักษณะ Profile ของกระแสเงินสด (รวมดอกเบี้ย) ของโครงการก่อสร้าง (Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005)

ปัญหากระแสเงินสดกับวงเงินเครดิต เป็นปัญหาที่ใช้กำหนดหาวันเริ่มที่เร็วที่สุดของกิจกรรมต่าง ๆ โดยอาจมีเป้าหมายได้หลายประการแต่มีความคล้ายคลึงกันหรือสามารถเทียบเคียงกันได้คือ เพื่อหากำไรสูงสุด (Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005; S-S Liu and Wang 2008) หรือเพื่อหาต้นทุนทางการเงินที่ต่ำที่สุด (Hegazy and Ersahin 2001) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ใช้เป้าหมายเพื่อหาระยะเวลาโครงการที่สั้นที่สุดด้วย (Elazouni and Gab-Allah 2004; Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005) กำไรสูงสุดที่ใช้เป็นเป้าหมายหมายถึงค่าความต่างระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการ (overall expenditure) (ที่รวม ต้นทุนทางตรง ต้นทุนทางอ้อม และต้นทุนค่าดำเนินการ) กับรายรับทั้งหมดของโครงการที่มาจากเงินงวดงานจากเจ้าของโครงการ ซึ่งค่าความต่างนี้ก็คือค่าผลลัพธ์รวมของกระแสเงินสดทั้งหมด ที่เป็นความต่างของกระแสเงินสดเข้าและออกทั้งหมดนั่นเอง หากพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าเป้าหมายกำไรสูงสุดมีความคล้ายคลึงกับเป้าหมายต้นทุนการเงินต่ำที่สุด เนื่องจากแผนงานที่ให้กำไรสูงสุดย่อมเป็นผลมาจากการเสียต้นทุนการเงินต่ำที่สุด (เสียดอกเบี้ยต่ำที่สุด) สมการทั่วไปของโมเดลปัญหากระแสเงินสดกับวงเงินเครดิตที่ใช้กำไรสูงสุดเป็นเป้าหมาย มีดังนี้

Decision variables: ES_i = เวลาเริ่มที่เร็วที่สุด (Earliest start) ของกิจกรรมที่ i

Objective functions:

$$\boldsymbol{Maximize\ N_L} \qquad \textbf{สมการที่ (2.34)}$$

Subject to: $\left|\widehat{\boldsymbol{F_t}}\right| \leq |\boldsymbol{W}|$

$\sum_{\boldsymbol{i}}(\boldsymbol{R_{ik}}) \leq \boldsymbol{RR_k}$

Activity dependency

โดยที่ให้ $\boldsymbol{R_{ik}}$ คือจำนวนทรัพยากรประเภทที่ *k* ที่กิจกรรมที่ *i* ต้องการใช้

$\boldsymbol{N_L}$ คือยอดเงินสุทธิที่รอบเวลาสุดท้าย (L)

$\widehat{\boldsymbol{F_t}}$ คือยอดเงินเบิกเกินบัญชีหลังคิดดอกเบี้ย หรือยอดเงินกระแสเงินสดหลังคิดดอกเบี้ยที่รอบเวลาที่ *t*

W คือวงเงินเครดิตหรือยอดเงินทุนที่มีอยู่

งานของ Elazouni and Gab-Allah (2004) ได้สร้างโมเดลการจัดตารางเวลางานก่อสร้างโดยพิจารณาด้านการเงินด้วยวิธี integer programming ต่อมา Elazouni and Metwally (2005) ยังได้เสนอโมเดลที่พิจารณาขีดจำกัดของเครดิต และใช้เทคนิค genetic algorithms เพื่อหาคำตอบที่ให้ผลกำไรสูงที่สุด นอกจากนี้พวกเขายังเพิ่มเติมใน Elazouni and Metwally (2007) ด้วยการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้างแบบรวบทั้งหมด (overall-optimized schedules) ซึ่งทำให้เกิดการบูรณาการการแก้ปัญหาทุกด้านคือ time-cost trade-off, resource allocation, และ resource leveling ส่วนงานวิจัยของ Liu and Wang (2008) ได้นำเอาเทคนิคการโมเดลปัญหาแบบ constraint satisfaction problems และการแก้ปัญหาด้วยวิธี constraint programming เพื่อให้ได้แผนงานก่อสร้างที่รวมการพิจารณากระแสเงินสดและทรัพยากรโครงการ โดยมุ่งหมายให้ได้ผลกำไรสูงสุด

2.2.5 เงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม

การวางแผนเพื่อดำเนินการกิจกรรมก่อสร้างนั้นมีข้อจำกัดเบื้องต้นที่ใช้ในการจัดตารางเวลาคือความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (activity relationships) และเงื่อนไขด้านเวลาซึ่งงานวิจัยต่างๆที่พัฒนาโมเดลปัญหาการวางแผนงานมักจะสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นแบบอย่างง่ายคือแบบ Finish-to-Start (FS) เพียงแบบเดียวเท่านั้นโดยละเลยความหลากหลายของเงื่อนไขด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้างที่เป็นไปได้ทั้งหมด การวางแผนงานโครงการก่อสร้างมักกำหนดใช้ความสัมพันธ์หลายแบบ บางก็เพื่อพยายามเร่งรัดกิจกรรมก่อสร้างให้ถูกดำเนินการไปแบบขนานกันเพื่อลดระยะเวลาของโครงการ รวมทั้งบางกิจกรรมก็ยังมีเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาเป็นตัวกำหนดวันเริ่มและวันเสร็จที่เหมาะสม นอกเหนือจากการถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเอง

(Chassiakos and Sakellaropoulos 2005) ได้เสนอโมเดลปัญหาการแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน (Time-cost trade-off: TCT) ที่มุ่งเน้นพิจารณาถึงความหลากหลายของเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง โดยที่พวกเขาได้จัดแบ่งเงื่อนไขพิเศษออกเป็นสามกลุ่มคือ ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบพิเศษ (Special precedence relationships), เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม (Activity planning constraints), และ เงื่อนไขภายนอกด้านเวลา (External time constraints)และได้สร้างสมการเพื่อรวมเอาเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาเหล่านี้เข้าไว้ในโมเดลปัญหาการวางแผน

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 ของโมเดลปัญหา มีสมการดังนี้

Subject to:

FS: $$s_j - f_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.35)**

FS+L: $$s_j - f_i \geq L$$ **สมการที่ (2.36)**

FS-L: $$s_j - f_i \geq -L$$ **สมการที่ (2.37)**

SS: $$s_j - s_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.38)**

SS+L: $$s_j - s_i \geq L$$ **สมการที่ (2.39)**

FF: $$f_j - f_i \geq 0$$ **สมการที่ (2.40)**

FF+L: $$f_j - f_i \geq L$$ **สมการที่ (2.41)**

โดยที่ให้ s = เวลาเริ่มของกิจกรรม

f = เวลาเสร็จของกิจกรรม

กิจกรรมที่ i คือ predecessor ของกิจกรรมที่ j

L = ระยะเวลาซ้อนเหลื่อมหรือตามหลัง

เงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรม (Activity planning constraints) ได้แก่ As Soon As Possible (ASAP) และ As Late As Possible (ALAP) คือการกำหนดให้กิจกรรมถูกเริ่มดำเนินการหรือให้เสร็จสิ้นอย่างเร็วที่สุดที่เป็นไปได้ (ภายในช่วงระยะเวลาเลื่อน (Total float) ที่กิจกรรมนั้นมีอยู่) และอย่างช้าที่สุดที่เป็นไปได้ ซึ่งลักษณะเงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรมนี้จะมีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นไม่ตายตัว เนื่องจากไม่ได้กำหนดระยะเวลาหรือวันที่ที่เฉพาะเจาะจง ดังนั้นเงื่อนไขด้านการวางแผนกิจกรรมจึงถูกนำมาสร้างเป็นสมการในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโมเดล ได้ดังนี้

Objective functions:

$$\boldsymbol{Minimize}(\ldots\ldots + \boldsymbol{w_1} \sum_{i \in ASAP} \boldsymbol{S_i} - \boldsymbol{w_2} \sum_{i \in ALAP} \boldsymbol{F_i}) \qquad \textbf{สมการที่ (2.42)}$$

โดยที่ให้ s_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i

f_i = เวลาเสร็จของกิจกรรมที่ i

ASAP = เซ็ตของกิจกรรมที่ถูกกำหนดเงื่อนไข ASAP

ALAP = เซ็ตของกิจกรรมที่ถูกกำหนดเงื่อนไข ALAP

w_1 , w_2 = ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ปรับความสำคัญของเงื่อนไขกลุ่มนี้

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 ของโมเดลปัญหา มีสมการดังนี้

Subject to:

SNET+D_i : $\boldsymbol{s_i \geq D_i}$ **สมการที่ (2.43)**

MSO+D_i : $\boldsymbol{s_i = D_i}$ **สมการที่ (2.44)**

SNLT+D_i : $\boldsymbol{s_i \leq D_i}$ **สมการที่ (2.45)**

FNET+D_i : $$f_i \geq D_i$$ **สมการที่ (2.46)**

MFO+D_i : $$f_i = D_i$$ **สมการที่ (2.47)**

FNLT+D_i : $$f_i \leq D_i$$ **สมการที่ (2.48)**

โดยที่ให้ s_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i

f_i = เวลาเสร็จของกิจกรรมที่ i

D_i = วันที่ที่เป็นเงื่อนไขภายนอกของกิจกรรมที่ i

การนำสมการทั้งหลายเหล่านี้ไปรวมกับโมเดลปัญหาการวางแผนจะช่วยทำให้เกิดการพิจารณาถึงความหลากหลายของเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรมก่อสร้าง อันจะทำให้โมเดลปัญหาการวางแผนที่ได้มีความสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น รวมทั้งช่วยให้ผู้วางแผนสามารถเลือกใช้เงื่อนไขด้านเวลาต่างๆสำหรับกิจกรรมหนึ่งใดๆได้อย่างอิสระตามที่ต้องการ

2.2.6 การบูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผน

งานวิจัยที่ผ่านมามักสร้างโมเดลปัญหาและหาคำตอบด้วยวิธีการแบบ Analystical หรือ Heuristic และเลือกกระทำกับเป้าหมายอย่างใดอย่างหนึ่ง (ดังที่ได้ทบทวนในหัวข้อที่ผ่านๆมา) เพียงเป้าหมายเดียวทั้งนี้เนื่องจากความจำกัดของความสามารถในการหาคำตอบของวิธีการแบบ Heuristic ที่ไม่สามารถหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนหรือที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคำตอบที่ได้ก็อาจขึ้นอยู่กับตัวโจทย์ (Problem dependent) และไม่รับประกันว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solutions) (S-S Leu and C-H Yang 1999)

การสร้างโมเดลปัญหาด้วยเป้าหมายเพียงเป้าหมายเดียว (Single objecitive) อาจทำให้แผนงานคำตอบที่ได้ไม่สมเหตุสมผลหรือไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงมีงานวิจัยกลุ่มหนึ่งพยายามบูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผนหลายเป้าหมายเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ต้องอาศัยการใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการหาคำตอบด้วย เนื่องจากผลที่ได้จะเป็นโมเดลปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนมาก งานวิจัยที่เลือกมาทบทวนดังต่อไปนี้มีความโดดเด่นที่สามารถบูรณาการหลายเป้าหมายเข้าไว้ด้วยกันได้

(S-S Leu and C-H Yang 1999) ได้บูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผนงานที่เรียกว่า Multicriteria construction scheduling model ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วน (two phases) ที่ต่อเนื่องกัน

โดยที่ส่วนแรกได้รวมเอาโมเดลปัญหาแบบ TCT และResource Allocation ไว้ด้วยกัน และส่วนที่สองหลังจากที่ได้คำตอบจากส่วนแรกแล้วเป็นโมเดลปัญหาแบบ ResourceLeveling

(Hegazy and Ersahin 2001) ได้บูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผนงานบนโปรแกรม Spreadsheet ที่ใช้งานง่ายและเหมาะสมแม้กับบริษัทก่อสร้างขนาดกลางและเล็ก โมเดลปัญหาได้รวมเอาทั้ง TCT, Resource Allocation, Resource Leveling และ Cashflow ไว้ด้วยกันเรียกว่า Overall scheduling model ซึ่งมี Objective function เป็นการ Minimize total project cost โดยที่เทอม total project cost ได้สะท้อนเป้าหมายทุกด้านดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกัน ด้วยการใช้หลักการจ่ายค่า penalty จึงสามารถแปลงเป้าหมายด้านต่างๆมาเป็นรูป project cost หรือจำนวนเงินที่สามารถรวมกันได้ มี Decision variables เป็น “ทางเลือก” (options) ของวิธีการดำเนินงาน (execution methods) ของกิจกรรม และ “ระยะเวลาเลื่อน” (delay) ของวันเริ่มของกิจกรรม ซึ่งรวมแล้วมีจำนวน Decision variables ทั้งหมดเท่ากับสองเท่าของจำนวนกิจกรรมก่อสร้าง

(Elazouni and Fikry G. Metwally 2007) ได้สร้างโมเดลที่บูรณาการ Resource Allocation, Resource Leveling และ Cashflow โดยให้ Objective function เป็นการ Maximize total project profit ที่ได้สะท้อนเป้าหมายด้านต่างๆดังกล่าวด้วยการใช้ penalty เพื่อแปลงทุกเทอมให้อยู่ในรูป project cost ที่รวมกันได้ (คล้ายกับหลักการของ (Hegazy and Ersahin 2001))งานของ (S-S Liu and Wang 2008) ที่มีความใกล้เคียงได้สร้างโมเดลที่บูรณาการ Resource Allocation, Resource Leveling และ Cashflow โดยให้ Objective function เป็นการ Maximize total project profit แต่ได้เสนอวิธีการหาคำตอบที่แตกต่างกัน

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมโครงการ

นอกจากที่การจัดตารางเวลางานก่อสร้างจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการ แผนงานก่อสร้างและการปรับปรุงแผนงานตามความก้าวหน้ายังเป็นหลักฐานที่ใช้ในการแก้ปัญหาข้อโต้แย้งอันเนื่องมาจากความล่าช้าของโครงการ (delay claims) อีกด้วย Ibbs และ Nguyen (2007) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ความล่าช้า (delay analysis) ที่รวมการพิจารณาการจัดสรรทรัพยากรของโครงการด้วย เพื่อให้ผลจากการวิเคราะห์มีใกล้เคียงความเป็นจริงและมีความน่าเชื่อถือ เนื่องจากความล่าช้าที่เกิดขึ้นสามารถมีผลกระทบต่อการจัดสรรทรัพยากรในกิจกรรมลำดับถัดๆไป ซึ่ง Hegazy และ Menesi (2008) ได้เพิ่มเติมการปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ความล่าช้าแบบหน้าต่าง (windows delay analysis) ที่นิยมใช้กันอยู่ โดยให้ปรับปรุง baseline หลายรอบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลากิจกรรม ความสัมพันธ์ และผลจากการจัดสรรทรัพยากรเกินขนาด พวกเขากำหนดใช้ขนาดหน้าต่างเป็นรายวันเพื่อให้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสายทางวิกฤต นอกจากนี้ยังใช้ความก้าวหน้าของโครงการ ณ ขณะใดๆเพื่อประกอบการคิดปริมาณความล่าช้าที่เกิดขึ้นด้วย

2.4 วิธีการหาคำตอบของโมเดลปัญหา

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

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

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

Simulation เป็นวิธีการหาคำตอบด้วยการสุ่มค่าพารามิเตอร์บางตัวของโมเดลปัญหา เช่น ระยะเวลา หรือต้นทุนของกิจกรรม คำตอบที่ได้จากวิธีนี้ก็ไม่รับประกันว่าเป็น optimal แต่เป็นประมาณหาคำตอบที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด

Searching algorithms เป็นวิธีการสุ่มเลือกคำตอบใดๆจากคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solutions) ขึ้นมาพิจารณาเปรียบเทียบว่าคำตอบใดดีกว่ากัน โดยจะบังคับทิศทางการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นเรื่อยๆ วิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้ได้แก่ Simulated Annealing, Tabu Search, Genetic Algorithms, Swarm Particle, และ Neural Networks นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ยังสามารถใช้ได้ดีกับโมเดลปัญหาที่มีหลายเป้าหมาย (Multi-objective function) (Feng, L Liu, and Burns 2000) เนื่องจากให้คำตอบที่เป็น Non-dominated solutions (S-S Leu and C-H Yang 1999) และกับโมเดลปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน (H. Zhang et al. 2005) ยังเรียกวิธีการหาคำตอบกลุ่มนี้ว่า Metaheuristic methods การพัฒนาของวิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้คือ ความพยายามลดเวลาที่ใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่ดี และการปรับปรุงคุณภาพของคำตอบที่ได้โดยการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ใน local optima (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005)

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

ในความเป็นจริงแล้ว แผนงานของโครงการก่อสร้างหนึ่ง มักนำมาสร้างได้เป็นโมเดลปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ดูจะเป็นวิธีการที่เหมาะสม ทำให้สามารถสร้างโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานเพื่อทำให้ง่าย (Simplification) การทบทวนวิธีการหาคำตอบต่อไปนี้จึงได้เลือกเฉพาะวิธีที่มีศักยภาพเหมาะสำหรับโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่

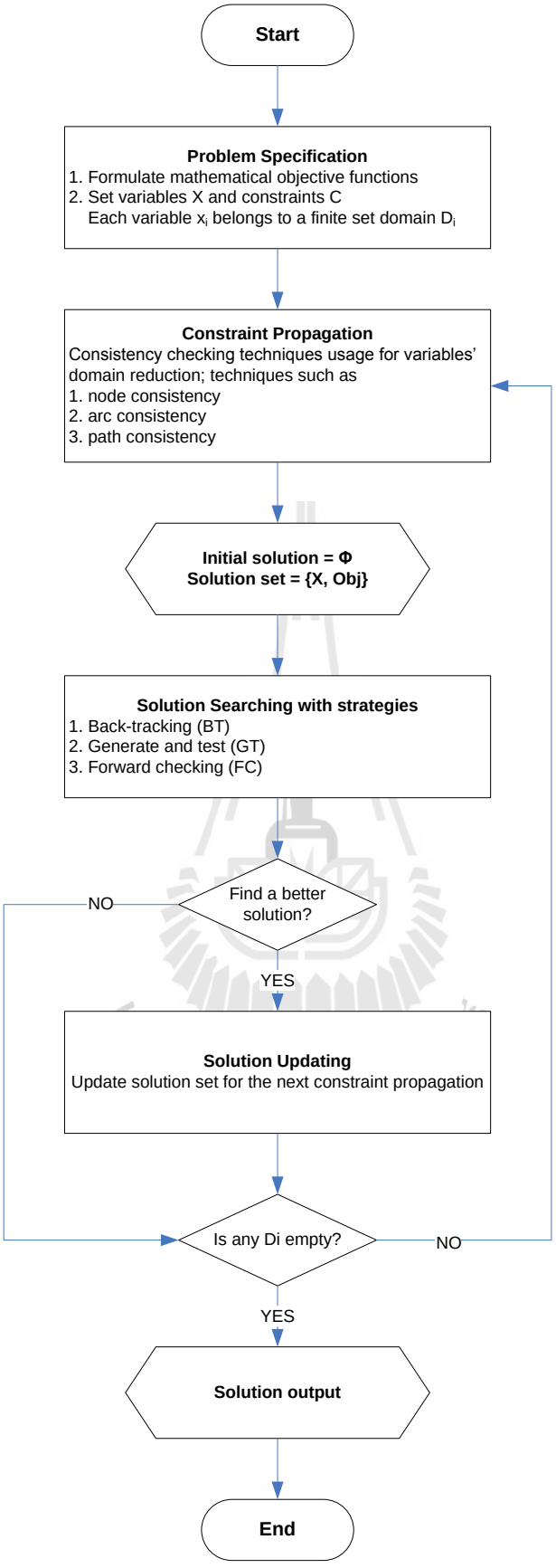
2.4.1 Constraint programming

Constraint programming(CP) เป็นวิธีการหาคำตอบที่รวมหลักการทางคณิตศาสตร์และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และ Operations research ซึ่ง CPมีจุดเด่นหลายประการ คือ มีวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพจึงเหมาะกับปัญหาที่จะมีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมากมายมหาศาล นอกจากนี้การสร้างโมเดลปัญหายังสะดวก และมีความยืดหยุ่นสูงต่อข้อจำกัด (constraints) ประเภทต่างๆ ขั้นตอนในการสร้างโมเดลประกอบด้วย problem specification, constraint propagation, และ systematic search strategies เนื่องด้วยจุดเด่นที่สามารถตัดขอบเขตของการค้นหาคำตอบให้แคบลงได้เรื่อยๆ ซึ่งต่างจากวิธีแบบ approximate ที่ค้นหาไปในขอบเขตโดเมนทั้งหมดของตัวแปร เปรียบเสมือนการค้นหาแบบตาบอด เนื่องจากขั้นตอน constraint propagation คือการตรวจสอบความต่อเนื่องของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้ด้วย consistency techniques ต่างๆเช่น node consistency, arc consistency, และ path consistency เพื่อลดขนาดของโดเมน นอกจากนี้ยังสามารถใช้กลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบได้หลายวิธีเช่น generate and test (GT), back-tracking (BT), forward checking (FC) (S-S Liu and Wang 2008)

ปัญหาที่หาคำตอบด้วยวิธี CP นี้เรียกว่า Constraint satisfaction problems (CSP) จัดเป็นปัญหาประเภท combinatorial problems ซึ่งที่ลักษณะทั่วไปของ CSP มีดังนี้ มีเซ็ตของตัวแปรตัดสินใจ$X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ และสำหรับแต่ละตัวแปรตัดสินใจ x_i จะมีโดเมนD_iของแต่ละตัวแปรคือค่าที่เป็นไปได้ของแต่ละตัวแปร โดยที่ตัวแปรเหล่านี้จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขและความสัมพันธ์ที่กำหนดไว้ในเซ็ทของข้อจำกัด C ดังนั้นคำตอบของปัญหาคือค่าของตัวแปรที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความสอดคล้องกับข้อจำกัดทุกข้อ CSP สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่มประเภทปัญหา ซึ่งปัญหาการจัดตารางเวลางาน (scheduling) ก็จัดเป็น CSP เช่นกัน

หลักการทั่วไปในการหาคำตอบของวิธี CP คือการจัดการกับ Objective function คล้ายกับเป็น Constraint โดยขอบเขตบนและล่างของ Constraint จะถูกปรับปรุงเมื่อค่า Objective function ที่ดีกว่าถูกค้นพบ ทำให้พื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution space) หดแคบลงเรื่อยๆ จนได้ Optimal solutions ในที่สุด รูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการหาคำตอบของวิธี CP

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.17 แผนภาพขั้นตอนของ Constraint programming optimization

2.4.2 Simulation

Simulation คือวิธีการจำลองเลียนแบบเหตุการณ์จริงให้เกิดขึ้นในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ทราบผลลัพธ์ของเหตุการณ์นั้นก่อนที่จะเกิดขึ้นจริง Simulation จึงมีประโยชน์สำหรับใช้ในการวางแผนงานด้านต่างๆที่มีความไม่แน่นอนของการเกิดเหตุการณ์จริง ซึ่งรวมทั้งงานก่อสร้าง ประเด็นสำคัญของ Simulation คือข้อมูลนำเข้า สมมติฐานต่างๆที่ใช้จำลองสภาวะของเหตุการณ์จริง ให้ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้

สำหรับ Discrete-event simulation (DES) ระบบจำลองการเกิดเหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์อย่างเป็นลำดับ แต่ละเหตุการณ์เกิดขึ้นที่เวลาหนึ่งและสร้างให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างใดอย่างหนึ่งของระบบ ส่วนประกอบสำคัญของระบบ DES ได้แก่ นาฬิกาที่ทำหน้าที่แสดงเวลาอ้างอิงของเหตุการณ์ต่างๆ นาฬิกาของระบบจะเริ่มเดินไปเรื่อยๆจนกระทั่งจบ รายการของเหตุการณ์ (ที่จะเกิดขึ้น) เหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์จะมีจุดเริ่มและจุดเสร็จของตน และใช้ระยะเวลาในการเกิดเหตุการณ์นั้น การสุ่มค่าตัวแปรด้วยตัวเลขสุ่มแบบต่างๆเพื่อให้การจำลองเหตุการณ์มีลักษณะไม่แน่นอนตามโอกาสของปัจจัยต่างๆคล้ายกับเหตุการณ์จริง การบันทึกสถิติเพื่อใช้แสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการ simulation และเงื่อนไขการจบที่ใช้ในการสิ้นสุดการ simulation

(Ammar and Mohieldin 2002) ได้ชี้ว่า เทคนิคในการวางแผนงานก่อสร้างสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ duration-driven และ resource-driven โดย CPM เป็นตัวอย่างทั่วไปของเทคนิคแบบ duration-driven ซึ่งมีข้อมูลนำเข้าหลักเป็น กิจกรรรม ระยะเวลา และความสัมพันธ์เท่านั้นถึงแม้ว่าระยะเวลาของกิจกรรมจะเป็นฟังก์ชันกับทรัพยากรที่ต้องการใช้ (required resources) (ไม่ใช่ทรัพยากรที่มีอยู่ available resources) ในขณะที่เทคนิคแบบ resource-driven พิจารณาถึงเงื่อนไขความจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่เสมอ ในการวางแผนกิจกรรมต่างๆเพื่อให้ทั้งโครงการเสร็จทันตามกำหนด ตัวอย่างได้แก่ Line of Balance, Simulation เทคนิคแบบ resource-driven จึงมีข้อดีเหนือกว่า duration-driven เนื่องจากให้แผนงานที่สมเหตุสมผลมากกว่า (Ammar and Mohieldin 2002) ได้ใช้โปรแกรม SIRBUS สำหรับสร้างโมเดลการวางแผนงานโครงการก่อสร้างด้วยการ Simulation ซึ่งจะทำให้เงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมและความจำกัดของทรัพยากรได้รับการพิจารณาไปพร้อมกันในคราวเดียวได้ โดยที่หากมีกิจกรรมก่อสร้างหลายกิจกรรมต้องการใช้ทรัพยากรอันหนึ่งเกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ กิจกรรมเหล่านี้จะต้องถูกจัดลำดับการทำด้วยกฎของความสำคัญ (priority rule) ของกิจกรรม ซึ่ง priority rule ที่ใช้กันทั่วไปมีหลายรูปแบบ เช่น Greatest resource demand (GRD), Minimum slack time (MST), Late start time (LST), Current float (CF)

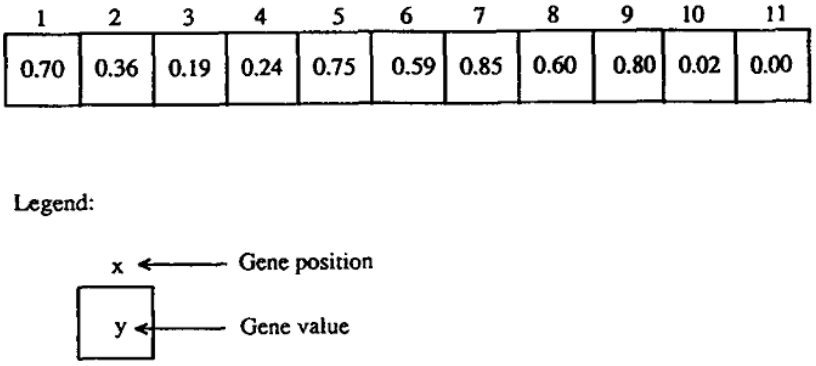
(H. Zhang and H. Li 2004) ได้สนับสนุนการใช้ Simulation สำหรับวางแผนงานก่อสร้าง เนื่องจากสามารถใช้ทดสอบนโยบาย (กฎ) การจัดสรรทรัพยากรเพื่อหานโยบายที่เหมาะสมได้ ก่อนนำไปใช้จริง ถึงแม้ว่าวิธี Simulation จะมีข้อดีตรงที่ไม่ต้องสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก แต่ก็มีข้อเสียที่ให้ผลลัพธ์เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (possible solutions) แต่ไม่สามารถหาคำตอบที่

เหมาะสมที่สุด (optimal solutions) ได้โดยตรง พวกเขาจึงเสนอการใช้ simulation ควบคู่ไปกับการ optimization เนื่องจากทรัพยากรจำนวนหนึ่งที่ถูกจัดเตรียมไว้สำหรับโครงการอาจมีช่วงเวลาที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้งาน (idle) พวกเขาจึงได้เสนอการจัดสรรทรัพยากรแบบพลวัตร (Dynamic resource allocation) เพื่อการ optimization อีกด้วย (M. Lu 2003)ได้พัฒนาการ simulation เพื่อให้ง่ายต่อการใช้วางแผนงานก่อสร้าง (Simplified discrete-event simulation approach) และเกิดการบูรณาการกับวิธี CPM จากนั้น (Ming Lu, Lam, and Dai 2008) จึงได้นำการ simulation ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ควบคู่กับการ optimization ด้วย

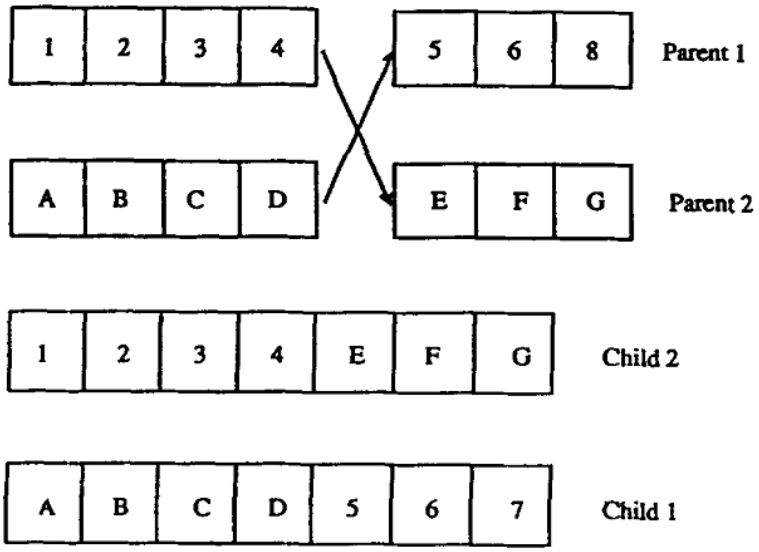
2.4.3 Genetic algorithms

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

ขั้นตอนที่สำคัญมากอันหนึ่งของ GAs คือ “การเข้ารหัส” (Encoding) ของโครโมโซม เนื่องจากโครโมโซมจะต้องเป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้ใดๆอันหนึ่ง ลักษณะของโครโมโซมโดยทั่วไปจะใช้แสดงแทนด้วยสายของตัวอักษร (String of characters) ซึ่ง string นี้จะแสดงถึงคำตอบที่เป็นไปได้อันหนึ่งด้วยดังรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าในโครโมโซมจะประกอบไปด้วย ยีนส์ (Genes) ต่างๆ โดยมีค่าของยีนส์ (Gene value) และตำแหน่งของยีนส์ (Gene position) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและรูปที่ 2.19แสดงลักษณะการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (Parent chromosomes) คู่หนึ่งเพื่อให้ได้โครโมโซมรุ่นลูก (Offspring chromosomes)



รูปที่ 2.18 สายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทนโครโมโซม (Chan, Chua, and Kannan 1996)



รูปที่ 2.19 ปฏิบัติการจับคู่แลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่เพื่อให้ได้รุ่นลูก (Chan, Chua, and Kannan 1996)

เนื่องจากGAs ใช้วิธีค้นหาคำตอบที่ดีด้วยการเลียนแบบหลักการของการวิวัฒนาการ ดังนั้น สมมติฐานหลักของ GAs คือ โครโมโซมพ่อแม่ที่ดีย่อมทำให้เกิดโครโมโซมลูกที่ดีกว่าขึ้นได้ ซึ่งหากเป็นไปตามสมมติฐานก็จะทำให้การถ่ายทอดโครโมโซมต่อ ๆกันเป็นรุ่นไม่สูญเปล่าแต่ได้คำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆ การค้นหาคำตอบด้วย GAs จึงจะมีประสิทธิภาพดี ดังนั้นแสดงว่า Crossover operation จะต้องทำเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง คำตอบที่ดีอยู่แล้วอาจโดนทำลายด้วย Crossove operation (Chan, Chua, and Kannan 1996)

“ปฏิบัติการ” ของ GAs ในระดับโครโมโซมคือ Crossover operation และ Mutation operation บางครั้งอาจทำให้เกิดโครโมโซมรุ่นลูกที่ไม่เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ หรือเป็น illegal schedules ได้เนื่องจากเช่น ให้กิจกรรมที่ซ้ำกัน หรือละเมิดเงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม หรือด้านเวลา หรือด้านข้อจำกัดด้านทรัพยากร ดังนั้นการนำวิธี GAs มาใช้ในการหาคำตอบของโมเดลปัญหาการวางแผนต้องมีส่วนที่จัดการ (หรือปรับปรุงแก้ไข) กับคำตอบที่เป็นไป

ไม่ได้ที่อาจเกิดขึ้นได้เหล่านี้ การที่ต้องจัดการกับ illegal schedules ที่เกิดขึ้นมีผลให้เพิ่มเวลาในการค้นหาคำตอบเป็นอย่างมาก

วิธีการเข้ารหัสโครโมโซมจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบ เนื่องจากส่งผลให้มีเกิดโอกาสการเกิด illegal schedules ได้มากหรือน้อย (Chan, Chua, and Kannan 1996) ได้ชี้ว่ามีประเด็นที่ควรพิจารณาในการเข้ารหัสโครโมโซมให้เหมาะสมอยู่สามประการคือ การกำหนดตัวแปรตัดสินใจของโมเดล (Decision variables), การเข้ารหัสค่าตำแหน่งของยีนส์ (Gene positions) และการเข้ารหัสค่าของยีนส์ (Gene values) สำหรับโมเดลปัญหาการวางแผนงานโครโมโซมที่เป็นสายตัวอักษรแสดงแทนคำตอบหนึ่งที่เป็นไปได้ของแผนงานมักเข้ารหัสเป็นดังนี้

ค่าตำแหน่งของยีนส์ ใช้แทน กิจกรรมที่ i ของโครงการ ดังนั้นโครโมโซมจึงมีจำนวนยีนส์เท่ากับจำนวนกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ

ตัวแปรตัดสินใจของโมเดลปัญหาแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกัน เนื่องจากโมเดลปัญหาการวางแผนมีได้หลายรูปแบบ ดังเช่น TCT, Resource allocation, Resource leveling, Cash flow and credit limit

ค่าของยีนส์ ที่ใช้มักขึ้นอยู่กับตัวแปรตัดสินใจของโมเดลนั้นๆ ทำให้ค่าของยีนส์ที่ใช้แตกต่างๆกันไป เช่น TCT มักมีตัวแปรตัดสินใจเป็น “ทางเลือก”ของการดำเนินการของกิจกรรม ค่าของยีนส์จึงใช้แทน ทางเลือกที่ j ของแต่ละกิจกรรมที่ i, Resource leveling เป็นการจัดเรียงลำดับกิจกรรม จึงมักมีตัวแปรตัดสินใจเป็น “ความสำคัญ” (Priority) ของกิจกรรมที่ i ในการได้รับจัดสรรทรัพยากรก่อน (Chan, Chua, and Kannan 1996; H. Zhang, H. Li, and Tam 2006)

การจัดการกับ illegal schedules มีหลากหลายวิธี วิธีหนึ่งที่ได้ผลดีถูกเสนอโดย (Bean 1994) ด้วยการใช้ random number ในการเข้ารหัสค่าของยีนส์ แล้วใช้การเปรียบเทียบค่าแบบ relative values แทนการใช้ค่าของยีนส์นั้นๆโดยตรง ซึ่งทำให้โครโมโซมรุ่นลูกที่ได้หลังจากปฏิบัติการทางพันธุกรรม ยังคงเป็นคำตอบที่เป็นไปได้

อีกประเด็นหนึ่งที่สำคัญของวิธีการหาคำตอบแบบ GAs คือการ mapping ลำดับของกิจกรรมเป็นสายของโครโมโซม (Activity-to-gene mapping) เนื่องจากโครโมโซมมีลักษณะเป็นสายของตัวอักษรแบบสายเดียว 1 มิติ (linear string of genes) ในขณะที่เน็ตเวิร์คของกิจกรรมก่อสร้างมีลักษณะเป็นโครงสร้างความสัมพันธ์ 2 มิติ การเข้ารหัสแผนงานเป็นโครโมโซมจึงเป็นการแปลงที่ทำให้โครงสร้างของเน็ตเวิร์คหายไป การกระทำแบบนี้เรียกว่า Topological sorting ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ (Chan, Chua, and Kannan 1996) ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธี topological sorting และ linear sorting ในการทำ Activity-to-gene mapping พบว่าการใช้วิธี topological sorting ให้ผลที่ดีกว่า โดยสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วกว่า

ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมของงานวิจัยต่างๆที่น่าสนใจมีดังนี้ (Chan, Chua, and Kannan 1996) สร้างโมเดลปัญหาแบบ Resource-constrained scheduling โดยใช้ค่าตำแหน่งของ

ยีนส์แทนกิจกรรมที่ i และใช้ค่าของยีนส์แทน ค่าความสำคัญ (priority) ของการจัดสรรทรัพยากร และยังใช้ค่าของยีนส์แทนสัดส่วนระยะเวลาเลื่อนของเวลาเริ่มของกิจกรรมด้วย งานของ (Feng, L Liu, and Burns 2000) สร้างโมเดลปัญหาแบบ TCT ใช้ค่าตำแหน่งของยีนส์แทนกิจกรรมที่ i และใช้ค่าของยีนส์แทน “ทางเลือก” ของการดำเนินกิจกรรม งานของ (S-S Leu and C-H Yang 1999) แบ่งโมเดลออกเป็นสองเฟส ทั้งสองเฟสใช้ค่าตำแหน่งของยีนส์แทนกิจกรรมที่ i โดยที่เฟสแรกเป็นโมเดลปัญหาแบบ TCT และ Resource allocation ใช้ค่าของยีนส์เป็นระยะเวลาของกิจกรรมและเฟสที่สองเป็นโมเดลปัญหาแบบ Resource leveling ใช้ค่าของยีนส์เป็นวันเริ่มของกิจกรรมที่ i พบว่าการเข้ารหัสโครโมโซมของโมเดลของ (S-S Leu and C-H Yang 1999) ทำให้เกิด illegal schedules ได้ง่าย ลักษณะการแบ่งโมเดลปัญหาออกเป็นสองเฟสนี้พบได้อีกครั้งในงานของ (PH Chen and Weng 2009)

Pseudocode สำหรับ GAs (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 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;
```

2.4.4 Tabu-search

วิธีการหาคำตอบแบบ Tabu-search (TS) จัดอยู่ในกลุ่มวิธีการหาคำตอบแบบท้องถิ่น Local Search (LS) ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบแบบวนรอบที่เริ่มต้นการหาจากชุดคำตอบที่เป็นไปได้ชุดแรก (initial feasible solutions) จากนั้นจะค่อยๆปรับเปลี่ยนคำตอบชุดนี้ให้ต่างจากเดิมเล็กน้อย (move) เพื่อให้ได้เป็นคำตอบใหม่ที่ดีขึ้นเรื่อยๆเป็นรอบๆไป จนกระทั่งครบจำนวนรอบการค้นหาที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ดีการหาคำตอบแบบ LS นี้มักจะจบลงด้วยคำตอบที่เป็น local optimum ซึ่งไม่ใช่คำตอบที่เป็น global optimum และคำตอบ local optimum ที่ได้มักจะเป็นเพียงคำตอบที่พอใช้หรือปานกลางเท่านั้นเมื่อเทียบกับคำตอบ global optimum ที่ต้องการ คุณภาพของคำตอบที่หาได้และเวลาที่ใช้ในการค้นหาจะมักขึ้นตรงอยู่กับกลยุทธ์ในการปรับเปลี่ยนคำตอบในแต่ละรอบการค้นหานั้นเอง ((F. Glover and others 1989) ((F. Glover 1990) ((Gendreau 2002)

หลักการพื้นฐานของ TS คือการค้นหาแบบท้องถิ่น (LS) ที่เพิ่มเงื่อนไขการป้องกันไม่ให้เกิด local optimum จากการ move กลับไปที่เดิมที่เคยถูกค้นหาแล้ว การป้องกันนี้ทำได้โดยการใช้ “ความจำระยะสั้น” (short-term memories) ที่เรียกว่า “รายการข้อห้าม” tabu lists ที่จะบันทึกรายการ move ที่เคยเกิดขึ้นในอดีตรอบที่ผ่านๆมา และไม่อนุญาตให้ move ครั้งใหม่ใดๆที่ซ้ำกับที่อยู่ใน tabu lists นี้ หลักการของ TS นี้เองที่ทำให้เข้าข่ายหลักการของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) อาจกล่าวได้ว่า TS คือผลรวมระหว่าง LS กับ short-term memories ดังนั้น TS จึงเป็นการค้นหาคำตอบที่ใช้กลยุทธ์ ไม่ใช่การอาศัยการสุ่มเพียงอย่างเดียวดังเช่น GAs (Fred Glover and Kochenberger 2003)

ข้อห้ามจึงเป็นลักษณะเด่นเฉพาะของวิธี TS เพื่อใช้ป้องกันการ move กลับไปกลับมา (cycling) จึงคาดหวังว่าการ move แต่ละครั้งจะทำให้สามารถเคลื่อนที่ออกไปพ้น local optima ได้ หรือใช้หลีกเลี่ยงการ move ที่ไม่ก่อให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น การทำบันทึก tabu list ในลักษณะ short-term memories คือการกำหนดขนาดของความจำที่จำกัดและคงที่ ข้อห้ามใหม่ที่ถูกจดบันทึกที่เกินขนาดของความจำแล้วจะต้องไปแทนที่ข้อห้ามเก่าที่สุดที่ยังอยู่ในรายการ (ในลักษณะ First In First Out) อย่างไรก็ตามบางงานวิจัยก็เสนอให้ใช้ขนาดความจำเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างรอบการค้นหา

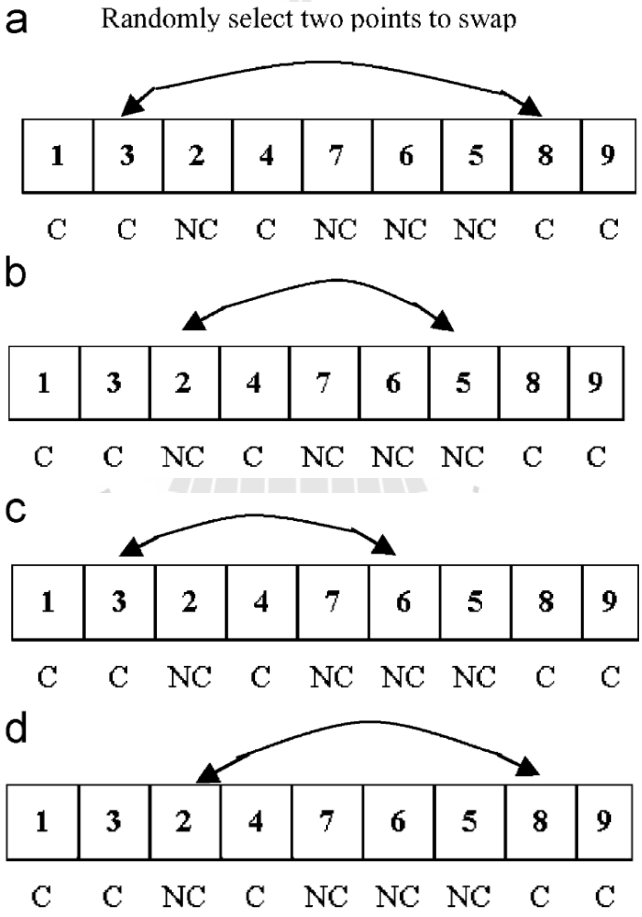
ในบางกรณี Tabus ที่บันทึกไว้ก็อาจส่งผลให้การค้นหาไม่สามารถ move ไปสู่ global optimum ได้ และเป็นการห้ามการ move ที่ไม่ได้ทำให้เกิดการ cycling จึงทำให้ต้องกำหนด “ข้อยกเว้น” (Aspiration Criteria) ที่ใช้สำหรับยกเลิก Tabus ในกรณีที่มีเหตุสมควรได้ Aspiration Criteria นี้มักจะกำหนดขึ้นโดยทั่วไปคือ อนุญาตให้ยกเลิก Tabus ได้ในกรณีที่ คำตอบที่เกิดขึ้นนี้ดีกว่า คำตอบที่ดีที่สุดเท่าที่ค้นพบถึงปัจจุบัน (current best-known solution)

ขั้นตอนหลักของ TS สรุปจาก (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008) ไว้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างคำตอบเริ่มต้น (Starting Solutions) เป็นชุดคำตอบเริ่มต้นชุดแรกที่สร้างขึ้นมาจากวิธีการหาคำตอบแบบ heuristic rules อื่นๆ เช่น Minimum Slack Time (MINSLK), Latest Finish Time (LFT) เป็นต้น (Moder, Phillips, and Davis 1983)

2. การค้นหาแบบท้องถิ่นเพื่อหาคำตอบใกล้เคียง (Neighborhood Solutions) ด้วยการนำคำตอบเริ่มต้นมาปรับเปลี่ยนเล็กน้อยด้วยกลยุทธ์การ move แบบต่างๆ เช่น Swap Move, และ Insert Move จากนั้นนำคำตอบใกล้เคียงที่ได้ไปเก็บไว้ในรายการ Candidate List เพื่อประเมินค่า fitness ของคำตอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อไป ทั้งนี้ Neighborhood solutions ที่สร้างขึ้นใหม่จะต้องเป็น legal schedules รูปที่ 2.20 แสดงตัวอย่างการ Swap Move แบบต่างๆ C หมายถึง กิจกรรมวิกฤต (Critical activities) และ NC หมายถึง กิจกรรมไม่วิกฤต (Noncritical activities)

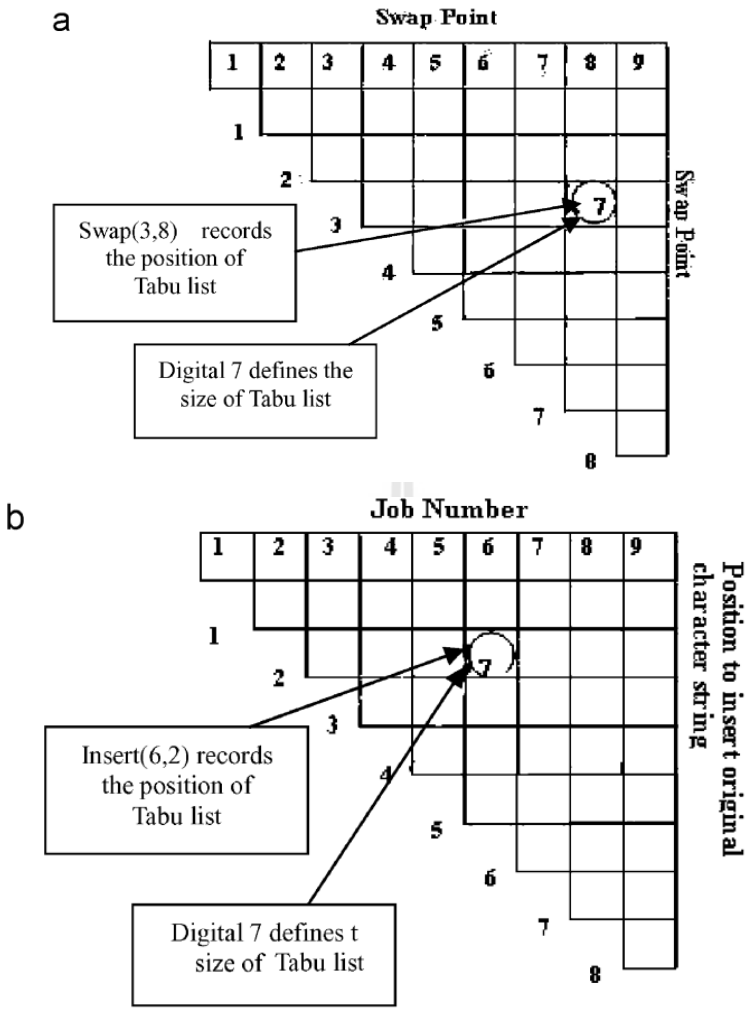
Swap Move คือการสุ่มเลือกตำแหน่งของสายตัวอักษร (ที่ใช้แทนลำดับการดำเนินกิจกรรมก่อสร้าง) 2 ตำแหน่งใดๆ แล้วสลับค่าของตัวอักษรของทั้งสองตำแหน่งนั้น เกิดเป็นสายตัวอักษรใหม่ขึ้นมา ทั้งนี้การสุ่มเลือกตำแหน่งอาจกำหนดให้สุ่มเลือกระหว่าง C กับ C, NC กับ NC, C กับ NC, NC กับ C ก็ได้ อย่างไรก็ตามการ Move ในบางครั้งอาจทำให้เกิดเป็น illegal schedule ได้ จึงต้องตรวจสอบผลจากการ Move และเลือกเก็บเฉพาะที่เป็น legal schedule ไว้ใน Candidate list



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างแสดงการ Swap Move (a) C-C (b) NC-NC (c) C-NC (d) NC-C (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008)

4. รายการข้อห้าม (Tabu List) เป็นการบันทึกรายการ move ที่เกิดขึ้นในรอบที่ผ่านๆมาและจะไม่อนุญาตให้มี move ครั้งใหม่ที่อยู่ใน Tabu List การกำหนด Tabu List จะมีขนาดของความจำที่จำกัด เพื่อให้ move ที่เกิดขึ้นเมื่อนานมาแล้ว สามารถกลับเป็น move ที่อนุญาตอีกครั้งได้

ทั้งนี้ Tabu List จะช่วยป้องกันการ move แบบ cycling ที่ไม่เกิดประโยชน์ และไม่ได้ขยายพื้นที่การค้นหาออกไป



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างลักษณะการบันทึกความจำของ Tabu List (a) Swap Move (b) Insert Move (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008)

5. รายการข้อยกเว้น (Aspiration Criteria) เป็นรายการที่ช่วยยกเว้นหรือหักล้างกับ Tabu List เพื่อช่วยให้ move ที่ดียังสามารถเกิดขึ้นแบบซ้ำๆได้ ทั้งนี้เนื่องจากบางครั้ง move ที่ดีอาจเกิดขึ้นแล้วแต่ในขณะเดียวกันกลับถูกบันทึกไว้ใน Tabu List ทำให้การค้นหาไม่สามารถ move ในแบบเดิมซ้ำได้อีก จึงอาจทำให้เสียโอกาสการไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด (global optimum) Aspiration Criteria จึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อช่วยให้เกิดข้อยกเว้นในกรณีที่กำหนดไว้ เช่น หาก move นั้นทำให้เกิดคำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน ก็จะอนุญาตยกเว้นให้เกิดขึ้นได้

6. เงื่อนไขหยุดการค้นหา (Termination Criteria) โดยทั่วไป มักกำหนดเงื่อนไขสำหรับหยุดการค้นหาไว้ ได้แก่ จำนวนรอบการค้นหาทั้งหมด หรือจำนวนรอบที่ไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้น

Pseudocode สำหรับ TS พัฒนาขึ้นจาก (Pan, Hsaio, and KY Chen 2008)

Begin;

Set parameter values, Tabu list, Candidate list, number of iterations;

Generate a starting solution X_0 by using heuristic MINSLK;

Set the optimal solution $X^* = X_0$; the objective function value $f(X^*) = f(X_0)$;

For each iteration;

For each Candidate list: randomly Move (X_0) by Swap Move and Insert Move:

X_c = Move (X_0)

Calculate $f(X_c)$

End For;

Select best $f(X_c)$;

Check if this move does not in the Tabu List or meet the Aspiration Criteria: Keep X_c:

Else Select next best $f(X_c)$;

Update Tabu List;

Check if termination = true;

End;

2.4.5 Particle swarm algorithm

(H. Zhang et al. 2005) ได้เสนอว่าวิธีหาคำตอบของโมเดลปัญหาการวางแผนงานแบบ GAs มีข้อด้อยที่อาจเกิด premature convergence หรือ slow convergence ได้ ซึ่งอาจทำให้ได้คำตอบไม่ดีในครั้งนั้นๆ พวกเขาจึงใช้วิธี Particle swarm optimization (PSO) ในการคำตอบ PSO เป็นการหาคำตอบด้วยการค้นหาเป็นรุ่นๆแบบสุ่มคล้ายกับ GAs แต่ PSO ใช้การเลียนแบบพฤติกรรมการบินไปสู่ที่หมายของฝูงนก โดยที่ไม่ใช้ปฏิบัติการทางพันธุกรรม (H. Zhang et al. 2005) (Ming Lu, Lam, and Dai 2008) ได้เปรียบเทียบวิธีการคำตอบระหว่าง GAs กับ PSO ด้วยโมเดลปัญหาเดียวกัน พบว่า PSO ให้คำตอบที่ดีกว่า

แต่ละ particle ใช้แทนคำตอบใดๆที่เป็นไปได้ (feasible solution) อันหนึ่งการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของ PSO เริ่มต้นด้วยการสุ่มกลุ่ม particle เป็นประชากรรุ่นแรก และเคลื่อนที่ไปบนพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ ในทิศทางที่เข้าสู่คำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆในรุ่นต่อๆไป แต่ละ particle จะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมที่ดีที่สุดปัจจุบันของตนและของทั้งฝูงไปสู่ตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้นกว่าไป

เรื่อยๆ ด้วยการประเมินว่าดีเพียงใดจากค่าของ objective function ปัจจัยที่ใช้กำหนดสถานะของ particle คือตำแหน่ง (position) และ ความเร็ว (velocity) ตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละ particle หนึ่งใดๆ เรียกว่า local best position (X^L) และตำแหน่งที่ดีที่สุดจากประชากรทั้งหมด เรียกว่า global best position (X^G) ที่รอบการค้นหาใดๆ เมื่อคำนวณได้ค่าตำแหน่ง X^L และตำแหน่ง X^G แล้ว แต่ละ particle จะปรับปรุงค่าตำแหน่งและความเร็วของตนเองใหม่ในรอบการค้นหาถัดไป โดยที่สมการสำหรับใช้คำนวณค่าตำแหน่งและความเร็วของ particle เป็นดังนี้

$$\boldsymbol{V_i(t) = w(t) \cdot V_i(t-1) + c_1 r_1 \cdot \left(X_i^L - X_i(t-1)\right) + c_2 r_2 \cdot \left(X^G - X_i(t-1)\right)} \qquad \textbf{สมการที่ (2.49)}$$

$$\boldsymbol{X_i(t) = V_i(t) + X_i(t-1)} \qquad \textbf{สมการที่ (2.50)}$$

โดยที่ให้ $V_i(t)$ = ความเร็วของ particle ตัวที่ i ที่การค้นหารอบที่ t

$X_i(t)$ = ตำแหน่งของ particle ตัวที่ i ในรอบการค้นหาที่ t

i = 1, 2, 3, …, P เมื่อ P เป็นจำนวนประชากรทั้งหมดของ particle

t = 1, 2, 3,…, T เมื่อ T เป็นจำนวนรอบการค้นหาทั้งหมดที่กำหนด

$w(t)$ = น้ำหนักถ่วงแบบเฉื่อย (inertia weight) ที่มีค่าคงที่หรือแปรผันไปตาม t

c_1 และ c_2 = สัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (learning factors) ที่มีค่าคงที่

r_1 และ r_1 = ตัวเลขสุ่มแบบ (uniformly distributed) ในช่วงระหว่าง (0,1)

การคำนวณหา $V_i(t)$ ขึ้นอยู่กับความเร็วเดิมในรอบการค้นหาที่แล้ว และระยะห่างจากตำแหน่งปัจจุบันกับตำแหน่ง X^L และ X^G ซึ่งเป็นการเรียนรู้จากผลการค้นหาที่ดีที่สุดในรอบที่ผ่านๆ มาทั้งจากประสบการณ์ของตัวเอง (คือ X^L) และจากฝูง (คือ X^G)

วิธีการเข้ารหัสของ particle เนื่องจาก particle เป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้คำตอบหนึ่ง เป็นประเด็นที่มีความสำคัญเนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ ในลักษณะเดียวกับวิธี GAs งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอวิธีการเข้ารหัส particle แบบต่างๆไว้ดังนี้

Priority-based representation เป็นการเข้ารหัสด้วยค่าความสำคัญของกิจกรรมในการได้รับจัดสรรทรัพยากร โดยยึดหลักว่า ในกลุ่มกิจกรรมที่มีความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทเดียวกันและมีกำหนดการดำเนินการที่ซ้อนทับกัน จะพิจารณาจัดสรรให้ทรัพยากรนั้นแก่กิจกรรมที่มีความสำคัญ (priority) มากกว่า ก่อนและตามลำดับ หากจำนวนทรัพยากรนั้นมีไม่เพียงพอจะต้องพิจารณาเลื่อนกำหนดเริ่มของกิจกรรมที่สำคัญน้อยกว่าออกไป ทั้งนี้จะต้องรักษาเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมไว้เสมอ แต่ละ particle จะแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้หนึ่งคำตอบ

หรือเป็นจุดหนึ่งในพื้นที่ N มิติ โดยที่ N เป็นจำนวนกิจกรรมก่อสร้างทั้งหมดของโครงการ ค่าตำแหน่งและค่าความเร็วของ particle หนึ่งใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\boldsymbol{X_i(t) = \{x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t), \dots, x_{iN}(t)\}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.51)}$$

$$\boldsymbol{V_i(t) = \{v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \dots, v_{iN}(t)\}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.52)}$$

ใช้สายของตัวอักษร (String of characters) แสดงแทน particle หนึ่งใดๆในพื้นที่ N มิติ โดยให้ค่าของตำแหน่งแทนกิจกรรมที่ i ตั้งแต่ 1 ถึง N และค่าของตัวเลขแทนค่าความสำคัญของกิจกรรมนั้นๆ ดังรูปที่ 2.22 ค่าความสำคัญของกิจกรรมนั้นอาจกำหนดตัวเลขให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ทั้งนี้ค่าตัวเลขไม่ได้มีความหมายในเชิงสัมบูรณ์ แต่เป็นความหมายในเชิงสัมพัทธ์ คือนำมาใช้เปรียบเทียบกันเพื่อหาลำดับก่อนหลังเท่านั้น

Particle 1:X_1 (t)	0.8	0.5	0.2	0.34	0.61	…	0.118	0.21	0.39
Particle 2: X_2 (t)	0.77	0.39	0.66	0.7	0.41	…	0.45	0.18	0.23

x – where x means the priority of the activity the element corresponds to

รูปที่ 2.22 การเข้ารหัส particle แบบ Priority-based representation

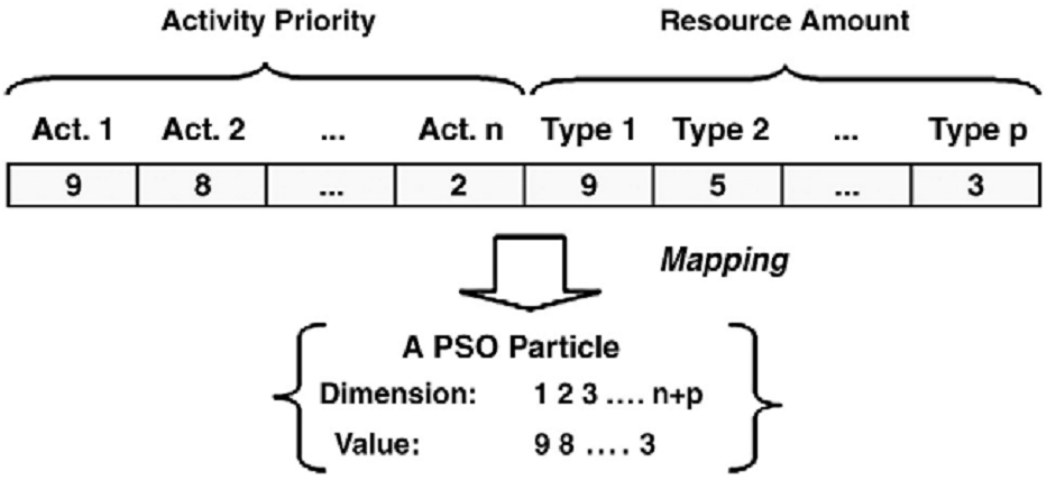
Permutation-based representation เป็นการเข้ารหัสด้วยการจัดเรียงลำดับกิจกรรมที่ต้องเริ่มดำเนินการ ดังนั้นในสายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทน particle หนึ่งใดๆ จะใช้ค่าตำแหน่งแทนลำดับการเริ่มดำเนินการ และค่าของตัวเลขแทนตัวกิจกรรม ดังรูปที่ 2.23 จะได้ว่า particle ที่ 1 ให้เริ่มดำเนินการกิจกรรมที่ 1, 3, 5, 4, 6,…, 18, 20, 19 ตามลำดับ ทั้งนี้ความยาวของสายจะมีเท่ากับจำนวนกิจกรรมทั้งหมดของโครงการคือ N และค่าของตัวเลขจะเป็นได้ตั้งแต่ 1 ถึง N เท่านั้น และต้องเป็นเลขจำนวนเต็มที่ไม่ซ้ำกัน จะเห็นได้ว่าการเข้ารหัสแบบ Permutation-based representation อาจจะทำให้เกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (illegal schedules) ที่ละเมิดเงื่อนไขด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมหรือมีกิจกรรมที่ซ้ำกัน จึงทำให้ต้องปรับแต่งสายของตัวอักษรของ particle ที่ได้จากการค้นหาให้เหมาะสมเสียก่อน อีกประเด็นหนึ่งสำหรับการเข้ารหัสแบบนี้คือจำเป็นต้องแปลงโครงสร้างของเน็ตเวิร์คของกิจกรรมให้เป็นเส้นตรง หรือที่เรียกว่า Topological sorting เสียก่อน

Particle 1:X_1 (t)	1	3	5	4	6	…	18	20	19
Particle 2: X_2 (t)	3	1	5	6	4	…	20	19	18

j	– where j is the index number that represents an activity

รูปที่ 2.23 การเข้ารหัส particle แบบ Permutation-based representation

Priority and resource-based representation เป็นการเข้ารหัสที่ปรับปรุงขึ้นและเสนอโดย (Ming Lu, Lam, and Dai 2008) เนื่องจากการเข้ารหัสแบบ Priority-based representation นั้นไม่จำเป็นต้องปรับแต่งสายของตัวอักษรที่ใช้แทน particle จึงเป็นวิธีที่น่าจะให้ผลที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามยังอาจเพิ่มเติมการเข้ารหัสเพื่อเป็นค่าจำนวนทรัพยากรประเภทต่างๆที่ควรจัดหาไว้ด้วย ถ้าให้ N เป็นจำนวนกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ และให้ K เป็นจำนวนประเภททรัพยากรทั้งหมดที่ใช้ในโครงการ ดังนั้น particle จะมีขนาด N+K มิติ โดยให้ค่าของตัวเลขในส่วนของทรัพยากรแสดงแทนจำนวนทรัพยากรประเภทที่ k ที่ควรจัดหาไว้ ดังรูปที่ 2.24 การเข้ารหัส particle แบบ Priority and resource-based representation จึงทำให้สามารถหาคำตอบแผนงานที่เหมาะสมเป็นทั้งลำดับการดำเนินกิจกรรมและจำนวนทรัพยากรแต่ละประเภทที่ควรจัดหาไว้ ได้ไปพร้อมๆกันในคราวเดียว



รูปที่ 2.24 การเข้ารหัส particle แบบ Priority and resource-based representation

Pseudocode สำหรับ PSO (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005)

Begin;

Generate random population of N solutions (particles);

For each individual i ∈ N: calculate fitness (i);

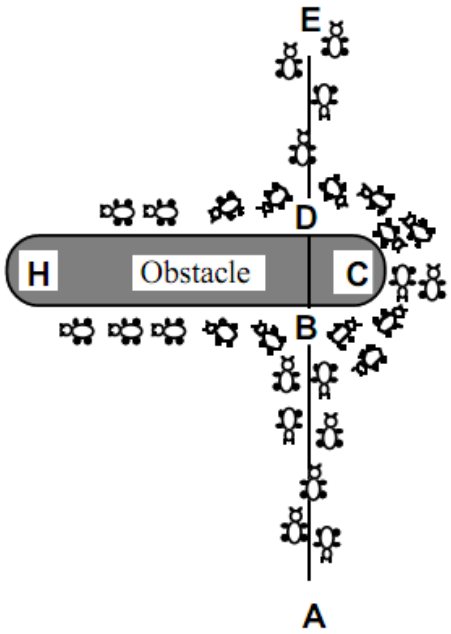
Initialize the value of the weight factor (inertia weight), w;

```
            For each particle;
                Set pLBest as the best position of particle i;
                If fitness (i) is better than pLBest;
                pLBest(i) = fitness (i);
            End For;
        Set pGBest as the best fitness of all particles;
        For each particle;
            Calculate particle velocity according to Equation 2.49;
            Update particle position according to Equation 2.50;
        End For;
        Update the value of the weight factor (inertia weight), w;
        Check if termination = true;
    End;
```

2.4.6 Ant Colony Algorithms

Ant-colony optimization (ACO) เป็นวิธีการหาคำตอบแบบค้นหา ที่เลียนแบบมาจากการค้นหาระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างรังกับแหล่งอาหารของมด (Dorigo, Maniezzo, and Colorni 1996) ด้วยการใช้และติดตามร่องรอยของ pheromone ที่พวกมดทิ้งไว้ระหว่างการเดินทางเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการติดต่อสื่อสารกับมดตัวอื่นๆ โดยมดมักจะเลือกเดินในเส้นทางที่มีร่องรอยของ pheromone เข้มข้นที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.25 การค้นหาระยะทางสั้นที่สุดระหว่างรังกับแหล่งอาหารของพวกมด (Dorigo, Maniezzo, and Colorni 1996)

เมื่อพวกมดออกจากรังไปค้นหาแหล่งอาหาร พวกมันจะสุ่มเดินผ่านสิ่งกีดขวางต่างๆไปในหลายเส้นทางโดยแต่ละตัวจะทิ้งร่องรอยของ pheromone ตามทางที่เดินไปพร้อมกันด้วย เมื่อมีมดตัวหนึ่งเจออาหารและจะขนกลับรัง มันจะเดินกลับโดยเดินตามร่องรอยของ pheromone ซึ่งจะทำให้เส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างรังกับแหล่งอาหารมีโอกาสถูกเลือกใช้มาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของ pheromone มาก และเมื่อมีมดเดินทางในเส้นทางนี้มากก็จะยิ่งสะสมให้มีความเข้มข้นของ pheromone มากยิ่งขึ้นไปอีก ทำให้มดตัวอื่นๆเดินตามกันในเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ในที่สุด

การใช้วิธีการหาคำตอบแบบ ACO นั้นต้องเข้ารหัสคำตอบ เช่นเดียวกับวิธีการหาคำตอบแบบอื่นๆ ซึ่งการเข้ารหัสคำตอบของ ACO นั้นจะให้ เส้นทาง (path) ของ"มด"หนึ่งตัวใช้แทนคำตอบที่เป็นไปได้ 1 คำตอบ ในที่นี้ก็คือ สายตัวอักษร (string of characters) ของลำดับกิจกรรมที่ต้องทำ ถ้าให้โครงการก่อสร้างที่วางแผนมีจำนวนกิจกรรมที่ต้องทำทั้งหมด S กิจกรรม เส้นทางของมดแต่ละตัวจะเป็นสายตัวอักษรความยาว S ตัว แสดงแทนลำดับกิจกรรมต่างๆที่ต้องทำทั้งหมด กิจกรรมลำดับที่ (ตัวแปรที่) i ใดๆ สามารถเป็นตัวเลือกกิจกรรมได้ n_i ตัวเลือก (คือตัวเลือกกิจกรรม successors ที่ทำให้ได้เป็น legal schedule) และมีค่าเป็น L_{ij} มีค่าความเข้มข้นของ pheromone ประจำเส้นทางย่อย i-j เป็น τ_{ij} โดยที่ i มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง S และ j มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_i ดังนั้นเส้นทางของมดหนึ่งเส้นที่ใช้แสดงแทนคำตอบหนึ่งคำตอบจะมีจำนวนตัวแปรทั้งหมด S ค่า ดังรูปที่ 2.26

วิธีการหาคำตอบแบบ ACO เริ่มจากการสร้าง "ตัวมด" รุ่นแรกด้วยการสุ่มค่า จำนวนทั้งหมด m ตัว มดตัวที่ k ($k \in 1, 2, ., m$) แสดงด้วยสายตัวอักษร มดแต่ละตัวจะถูกประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ค่าความเข้มข้นของ pheromone ขึ้นอยู่กับเส้นทางที่มดเลือกเดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางที่ให้ค่าคำตอบที่ดี

$$\tau_{ij}(t) = \rho \cdot \tau_{ij}(t-1) + \Delta\tau_{ij} \qquad \text{สมการที่ (2.53)}$$

โดยที่ให้ t = จำนวนรอบของการค้นหา มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง T

T = จำนวนรุ่นของมด หรือรอบในการค้นหาทั้งหมด

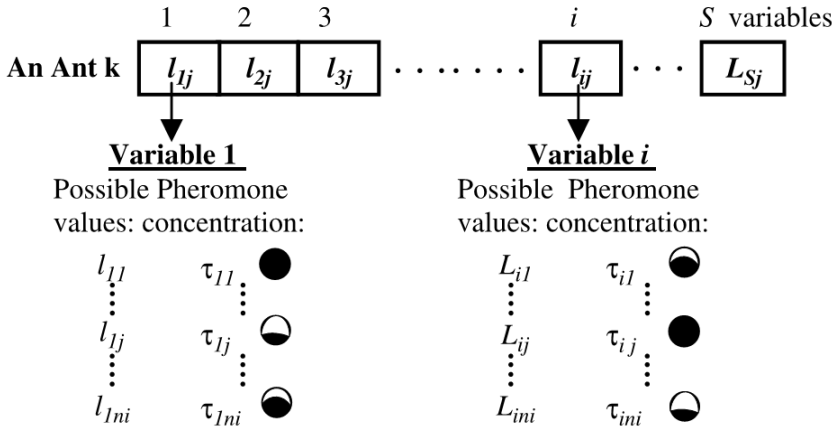
$\tau_{ij}(t)$ = ค่าความเข้มข้นของ pheromone ประจำเส้นทางย่อย i-j ในรุ่นที่ t ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปทุกๆรุ่นของมด

$\tau_{ij}(t-1)$ = ค่าความเข้มข้นของ pheromone ในรุ่นที่แล้ว (t-1)

$\Delta\tau_{ij}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ pheromone

ρ = อัตราการระเหยของ pheromone มีค่าในช่วง (0-1)

จะเห็นว่าค่าความเข้นข้นของ pheromone ประจำเส้นทางเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอโดยขึ้นอยู่กับการระเหย และการความดีของคำตอบที่เลือก (ขึ้นอยู่กับค่าทางเลือก L_{ij}) เหตุที่กำหนดให้ระเหยเนื่องจากเป็นการหลีกเลี่ยงอิทธิพลของค่า pheromone ในรุ่นที่แล้วต่อรุ่นปัจจุบันที่มากเกินไป ซึ่งทำให้มีโอกาสได้คำตอบที่เป็น local optima



รูปที่ 2.26การเข้ารหัส “ตัวมด” เป็นคำตอบ (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005)

อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ pheromone ($\Delta\tau_{ij}$) คำนวณได้จากสมการ

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{m} \begin{cases} R/Fitness_k & \text{if option } l_{ij} \text{ is chosen} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad \text{สมการที่ (2.54)}$$

โดยที่ให้ R = ค่าคงที่ที่กำหนดขึ้น

$fitness_k$ = ค่าความดีของคำตอบหรือมดตัวที่ k ที่ถูกประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สมการนี้ใช้ในกรณีที่เป็นการ Minimization เนื่องจากยิ่งค่า $fitness_k$ ยิ่งน้อยยิ่งให้ค่า $\Delta\tau_{ij}$ มากขึ้น หากเป็นกรณีการ Maximization ให้เปลี่ยนเป็นการใช้ค่า $fitness_k$ โดยตรง

เมื่อปรับปรุงค่าความเข้มข้นของ pheromone แล้ว ในมดรุ่นถัดไปให้สร้างเส้นทางของมดแต่ละตัวจากขนาดค่าความเข้มข้นของ pheromone ของแต่ละเส้นทาง ตัวอย่างเช่น มดตัวที่ k ใดๆ ตัวหนึ่งในรุ่นที่ t จะเลือกเปลี่ยนค่าตัวแปร ขึ้นอยู่กับโอกาสความน่าจะเป็น P_{ij} ที่คำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$\boldsymbol{P_{ij}(k,t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha} \times [\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{l_{ij}}[\tau_{ij}(t)]^{\alpha} \times [\eta_{ij}]^{\beta}}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.55)}$$

โดยที่ให้ $P_{ij}(k,t)$ = ความน่าจะเป็นที่ตัวแปรที่ ij จะเปลี่ยนเป็นค่า L_{ij}

$\tau_{ij}(t)$ = ค่าความเข้มข้นของ pheromone ประจำทางเลือกของ L_{ij}

η_{ij} = ค่า heuristic factor ที่ประเมินความดีของทางเลือก L_{ij}

α และ β = เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดความสำคัญของค่าเทอมความเข้มข้นของ pheromone และค่าเทอม heuristic factor

ดังนั้นในการใช้วิธีการหาคำตอบแบบ ACO จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เหมาะสม ได้แก่ ค่า m, T, ρ, α, β, และ R

Pseudocode สำหรับ ACO (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005)

Begin;

Initialize the pheromone trails and parameters;

Generate population of m solutions (ants);

For each individual ant k∈m: calculate fitness (k);

For each ant determine its best position;

Determine the best global ant;

Update the pheromone trail;

Check if termination = true;

End;

2.4.7 Shuffled Frog Leaping Algorithm

วิธีการหาคำตอบแบบ Shuffled Frog Leaping (SFL) เป็นการหาคำตอบแบบค้นหาที่ผสมรวมระหว่างการค้นหาใน local และ global ซึ่ง SFL จะใช้ประชากรของ “กบ” ที่เป็นตัวแทนของคำตอบที่เป็นไปได้ แบ่งประชากรของกบทั้งหมดออกเป็นกลุ่มๆเรียกว่า memeplexes แต่ละ memeplex จะดำเนินการค้นหาแบบ local ภายในกลุ่มตนเอง และพัฒนาโดยการแลกเปลี่ยนระหว่างกบด้วยกันภายในกลุ่ม จนกระทั่งครบรอบการพัฒนาการที่กำหนดไว้ จะเปิดโอกาสให้แต่ละ memeplexes แลกเปลี่ยนกบระหว่างกันด้วยกระบวนการสับเปลี่ยน (shuffling) ซึ่งการแลกเปลี่ยนระหว่างกบด้วยกันภายในกลุ่มและสับเปลี่ยนระหว่างกลุ่มจะดำเนินการต่อเนื่องไปจนกว่าจะครบจำนวนรอบการค้นหาคำตอบที่กำหนดไว้

ประชากรเริ่มต้นของกบสร้างขึ้นจากการสุ่ม ให้จำนวนประชากรกบทั้งหมดเป็น P ตัว เนื่องจากกบแต่ละตัวใช้แทนคำตอบที่เป็นไปได้หนึ่งคำตอบ กบจึงเป็นสายของตัวอักษรที่แสดงลำดับการดำเนินกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ ความยาวของสายตัวอักษรมีขนาดเท่ากับจำนวนกิจกรรมทั้งหมดของโครงการ ให้เป็น S กิจกรรม กบตัวที่ i ใดๆ จะเป็น $X_i = (x_{i1}, x_{i2},\ldots, x_{iS})$ ซึ่งค่า X_i จะมีลักษณะเป็นค่าตำแหน่งที่อยู่ของกบนั้น (คล้ายกับ PSO ที่แทนค่าตำแหน่งของนก) จากนั้นจึงเรียงลำดับประชากรกบตามความ fitness (ค่าความดีของคำตอบที่ประเมินจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์) และแบ่งประชากรกบออกเป็น memeplexes ให้แต่ละ memeplexes มีกบจำนวน n ตัว จะได้ memeplexes ทั้งหมด m กลุ่ม โดยที่ P = m x n การจัดกบเข้าสู่ memeplexes จะใช้วิธีจัดตามลำดับที่เรียงไว้แล้ว คือให้กบตัวที่หนึ่งไปอยู่ memeplex ที่หนึ่ง กบตัวที่สองไปอยู่ memeplex ที่สอง กบตัวที่ m ไปอยู่ memeplex ที่ m จากนั้นเวียนกลับไปที่หนึ่งใหม่ คือให้กบตัวที่ n+1 ไปอยู่ memeplex ที่หนึ่ง ดังนั้นแต่ละ memeplex จะมีกบที่ดีโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกันเมื่อตอนเริ่มต้น กบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของแต่ละ memeplex จะเรียกว่า X_b และ X_w กบที่ดีที่สุดจากประชากรทั้งหมด (global best frog) เรียกว่า X_g

กระบวนการพัฒนากบจะเกิดขึ้นเป็นรอบๆ โดยแต่ละรอบจะมุ่งไปที่เฉพาะกบที่ไม่ดี (X_w) เท่านั้น ซึ่งจะพัฒนาด้วยการปรับตำแหน่งของกบตัวที่ไม่ดีนั้น ขนาดของการเปลี่ยนตำแหน่งเป็น D_i

$$\boldsymbol{D_i = rand() \cdot (X_b - X_w)} \qquad \textbf{สมการที่ (2.56)}$$

$$\boldsymbol{X_w = X_w + D_i;\ -D_{max} < D_i < D_{max}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.57)}$$

โดยที่ให้ rand() = ตัวเลขสุ่มในช่วง (0, 1)

D_{max} = ขนาดของการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ยอมให้ (เป็นค่าที่กำหนด)

การพัฒนากบตัวที่ไม่ดีนี้จะต้องตรวจสอบด้วยว่าหลังจากการเปลี่ยนตำแหน่งแล้วทำให้ได้ค่าที่ดีขึ้นหรือไม่ หากดีขึ้นก็ให้เปลี่ยนเป็นตำแหน่งใหม่ที่คำนวณได้นั้น หากไม่แล้วให้เปลี่ยน

ตำแหน่งกบด้วยการเปรียบเทียบกับกบ X_g (โดยการเปลี่ยนสมการข้างบนจาก X_b เป็น X_g) ถ้าหากยังไม่ดีขึ้นอีก จะให้สุ่มค่าขึ้นใหม่ที่ดีกว่าแล้วแทนกบตัวที่ไม่ดีตัวนั้น กระบวนการพัฒนากบในแต่ละ memeplex จะดำเนินไปเป็นรอบๆจนครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้ จากนั้นจะสับเปลี่ยนกบระหว่าง memeplex ค่าพารามิเตอร์ของ SFL ที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมได้แก่ P, m, n, D_{max}, และจำนวนรอบของการพัฒนากบและการสับเปลี่ยนกบ

Pseudocode สำหรับ SFL (Elbeltagi, Hegazy, and Grierson 2005)

```
Begin;
    Generate random population of P solutions (frogs);
    For each individual i ∈ P: calculate fitness (i);
    Sort the population P in descending order of their fitness;
        Divide P into m memeplexes;
        For each memeplex;
            Determine the best and worst frogs;
            Improve the worst frog position using Equations (4) or (5);
            Repeat for a specific number of iterations;
        End For;
        Combine the evolved memeplexes;
        Sort the population P in descending order of their fitness;
    Check if termination = true;
End;
```

2.5 สภาพการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างของไทย

2.5.1 การเตรียมการสำรวจ

หลักการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างที่ได้กล่าวไว้ในบทต่างๆก่อนหน้านี้ ได้ครอบคลุมถึงประเด็นสำคัญต่างๆ ได้แก่ เป้าหมาย วิธีการ ปัญหาในการวางแผน เงื่อนไขข้อจำกัด และแนวทางการหาคำตอบ แนวคิดและการวิจัยเพื่อการพัฒนาการวางแผนและควบคุมโครงการยังคงดำเนินอยู่ อุตสาหกรรมก่อสร้างนั้นประกอบไปด้วยโครงการขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ซึ่งขนาดของโครงการก่อสร้างจะมีผลโดยตรงต่อวิธีการวางแผนและควบคุมโครงการที่ใช้ เนื่องจากหากขนาดของโครงการใหญ่ขึ้นจะมีความจำเป็นในการวางแผนและควบคุมโครงการเพิ่มขึ้นตาม

สัดส่วน อย่างไรก็ตามหลักการและการวิจัยในด้านนี้มีแหล่งที่มาจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด จึงมีความน่าสนใจเรียนรู้ว่าการวางแผนและควบคุมโครงการที่ใช้ปฏิบัติอยู่จริงในอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศไทยมีสภาพความก้าวหน้าเป็นอย่างไร โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับหลักการและการวิจัยในระดับนานาชาติ งานโครงการก่อสร้างในประเทศไทยนั้นก็อาจมีสภาพเฉพาะตัวบางส่วนที่แตกต่างออกไป และมีความคล้ายคลึงกันในบางส่วน

ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาสำรวจกระบวนการการวางแผนงานและควบคุมโครงการก่อสร้างในประเทศไทย โดยใช้กรณีตัวอย่างเป็นบริษัทก่อสร้างที่ดำเนินการโครงการขนาดใหญ่ ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการวางแผนและควบคุม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาหลักการวางแผนและควบคุมโครงการที่สอดคล้องเหมาะสมกับสภาพการปฏิบัติงานจริงของบริษัทก่อสร้างในประเทศไทย หรือการปรับปรุงแก้ไขในจุดที่เป็นปัญหาเฉพาะของบริษัทในประเทศไทยต่อไป

2.5.2 วิธีสำรวจ

การศึกษาสำรวจนี้ใช้กรณีตัวอย่างเป็นบริษัทก่อสร้างขนาดใหญ่ในประเทศไทย โดยคัดเลือกจากคุณสมบัติของบริษัทที่ต้องเป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจรับเหมาก่อสร้างหลัก (General contractors) มีมูลค่าของโครงการก่อสร้างมากกว่า 200 ล้านบาทขึ้นไป ได้จำนวนสามบริษัทคือ บริษัท Black and Veatch Company บมจ. Syntec Construction และ บริษัท 27 วิศวกรรม จำกัด ซึ่งลักษณะงานก่อสร้างที่ทั้งสามบริษัทรับดำเนินการมีความหลากหลายได้แก่ สิ่งก่อสร้างโรงไฟฟ้า งานสาธารณูปโภค และอาคารสูงในกรุงเทพฯ การสำรวจใช้รูปแบบการสัมภาษณ์ด้วยแบบสอบถามที่จัดเตรียมไว้ โดยเลือกสัมภาษณ์ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผนงานหรือกลยุทธ์ในการทำงาน มีรายละเอียดดังนี้

1. บริษัท แบล็คแอนด์วิช (ประเทศไทย) จำกัด เป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้างงานอาคาร โรงไฟฟ้า ที่มีทั้งกระบวนการออกแบบและก่อสร้าง โดยสัมภาษณ์กับ คุณสมสวรรค์ เลาหวีรภาพ ที่รับตำแหน่ง วิศวกรวางแผนโครงงาน (Project Planning Engineer) โดยมีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผนและติดตามความก้าวหน้าในการทำงานโครงการก่อสร้าง

2. บริษัท ซินเทคคอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) เป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้างงานอาคารสูง โดยสัมภาษณ์กับคุณวีรพงษ์ ตั้งเบญจาธิกุล ที่ดำรงตำแหน่ง ผู้จัดการโครงการ โดยมีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผนกลยุทธในการทำงานทั้งด้านแผนงานและกระบวนการทำงาน

3. บริษัท 27 วิศวกรรม จำกัด เป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้างงานอาคารสูง โดยสัมภาษณ์กับคุณองอาจ พูลสุข ที่ดำรงตำแหน่ง ผู้จัดการโครงการ โดยมีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผนกลยุทธในการทำงานทั้งด้านแผนงานและกระบวนการทำงาน

แบบสอบถาม (Questionnaire) ที่ใช้ประกอบด้วยคำถามแบบปลายปิดและปลายเปิด ในส่วนคำถามแบบปลายปิดจะใช้คำถามแบบตรวจสอบรายการ (Check list) และคำถามแบบให้ระดับ

คะแนน (Check rate) ส่วนคำถามแบบปลายเปิดจะเป็นการตั้งคำถามด้วยการเปิดโอกาสให้ผู้ตอบสามารถอธิบายคำตอบได้อย่างละเอียดพร้อมการยกตัวอย่างประกอบ และเพื่อการสนทนาแลกเปลี่ยนความเห็นอื่นๆที่เกี่ยวข้องอย่างกว้างขวาง

ประเด็นในการศึกษาที่ปรากฏอยู่ในแบบสอบถามประกอบด้วย

1. ข้อมูลทั่วไปของบริษัทและผู้ให้ข้อมูล

2. ขั้นตอนการวางแผนงานโครงการ

- การใช้โปรแกรม
- การนำเข้าข้อมูล
- การวิเคราะห์ข้อมูล

3. ขั้นตอนการติดตามและควบคุมโครงการ

- วิธีการติดตามข้อมูล
- ผู้รับผิดชอบติดตามข้อมูล
- การติดตามปรับปรุงแผนงาน

4. ปัญหาในการวางแผนและปัญหาที่ทำให้งานล่าช้า

ข้อมูลที่ได้จากคำตอบของแบบสอบถาม ทำให้ทราบถึงขั้นตอนและวิธีในการวางแผนและควบคุมงานโครงการทั่วไป รวมทั้งปัญหาทั่วไปของการวางแผนและควบคุมงาน วิเคราะห์เปรียบเทียบกับหลักการวางแผนและควบคุมโครงการในงานวิจัยระดับนานาชาติ ซึ่งสามารถนำความเข้าใจที่ได้มาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาการวางแผนและควบคุมโครงการที่เหมาะสมกับสภาพการปฏิบัติงานของบริษัทก่อสร้างในประเภทไทยได้ โดยนำมาสร้างเป็นสมการของโมเดลปัญหาการวางแผนที่เหมาะสมต่อไป

2.5.3 ผลการเก็บข้อมูล

ผลที่ได้จากการสัมภาษณ์บริษัทกรณีตัวอย่างด้วยแบบสอบถามแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ข้างล่าง

ตารางที่ 2 ข้อมูลขั้นตอนการวางแผนงาน

รายละเอียด	Black and Veatch	Syntec Construction	27 วิศวกรรม
1. ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมช่วยในการวางแผนงานหรือไม่	มี; Primavera	มี; Primavera, Microsoft Project, Microsoft Excel	มี; Microsoft Project; Microsoft Excel

2. ขั้นตอนการจัดการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินการวางแผนงาน ใช้ข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง	แบบก่อสร้าง; รายการประกอบแบบ; การประชุมหัวหน้างาน	แบบก่อสร้าง; รายการประกอบแบบ; สัญญาก่อสร้าง; BOQ; สภาพหน้างาน	บบก่อสร้าง; รายการประกอบแบบ; สัญญาก่อสร้าง
3. มีมาตรฐานการแบ่งโครงสร้างรายงานออกเป็นส่วนย่อยๆ (WBS) ในขั้นตอนการวางแผนหรือไม่	มี; แบ่งตามสายงาน	มี; แบ่งตาม ระบบ ISO9001	ไม่มี
4. ใช้รหัสของงานกำหนดพื้นที่การทำงานในการวางแผนงานหรือไม่	ไม่มี	มี; ชนิดของงานและพื้นที่	ไม่มี
5. กำหนดตำแหน่งหน้าที่ความรับผิดชอบของบุคลากรของการวางแผนงาน ในแต่ละหมวดงานหรือไม่	มี; ตามหมวดงานหลัก	มี; ตามหมวดงานหลัก	มี; ตามหมวดงานหลัก
6. การประมาณระยะเวลาของแต่ละกิจกรรมในโครงการใช้ข้อมูลด้านใดบ้าง	สถิติข้อมูลโครงการที่ผ่านมา	สถิติข้อมูลโครงการที่ผ่านมา	สถิติข้อมูลโครงการที่ผ่านมา
7. กำหนดความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมอย่างไรบ้าง	ส่วนมาก FS	ส่วนมาก FS	ส่วนมาก FS
8. ในการแผนงานมีการจัดสรรทรัพยากรลงในแต่ละกิจกรรมหรือไม่	มี; หัวหน้างานจะเป็นคนกำหนดจำนวน	ไม่มี	ไม่มี
9. ในการจัดสรรทรัพยากรมีการปรับระดับการใช้ทรัพยากร (Resource leveling) หรือไม่	มี; Trial and Error	ไม่มี	ไม่มี
10. ในการวางแผนงานมีการแบ่งแยกต้นทุนของแต่ละกิจกรรมหรือไม่	ไม่มี	มี; ตาม Budget	มี; ตาม Budget
11. การวางแผนงานมีการคำนึงถึง Cash Flow ของโครงการหรือไม่	ไม่มี	มี; ใช้ S-curve เป็นตัววางแผน	ไม่มี

12. จัดเตรียมแผนงานหลายๆชุด (Scenarios) โดยกำหนดทางเลือกสำหรับวิธีการก่อสร้างของแต่ละกิจกรรมไว้หลายๆวิธี เพื่อนำแผนงานเหล่านี้มาเปรียบเทียบและคัดเลือกแผนที่ดีที่สุดหรือไม่	ไม่มี; ไม่สามารถทำได้ทัน	ไม่มี	ไม่มี

ตารางที่ 3 ข้อมูลขั้นตอนการติดตามและควบคุม

รายละเอียด	Black and Veatch	Syntec Construction	บริษัท 27 วิศวกรรม
13. ในการติดตามข้อมูลการทำงานมีรูปแบบและวิธีการอย่างไร	ส่งแบบฟอร์มให้หัวหน้างานอัพเดตทุกเดือน	หัวหน้างานสรุปทุกสัปดาห์ ค่าแรงสรุปทุกเดือน	หัวหน้างาน
14. ผู้ให้ข้อมูลผลงานคือใคร	วิศวกรหัวหน้าส่วนงาน	หัวหน้างาน	หัวหน้างาน
15. ติดตามและปรับปรุงความก้าวหน้าในกำหนดเวลาที่วางไว้หรือไม่	มี; โดยการเขียน Flow Chart แสดงการทำงาน	มี; ประชุมหัวหน้างานทุกวัน ประชุมไซต์ทุกสัปดาห์	มี; ประชุมไซต์ทุกสัปดาห์
16. ปัจจัยใดที่ส่งผลกับการปรับปรุงแผนงานหลักมีอะไรบ้าง	ปรับปรุงแผนงานหลักแต่ระยะเวลาตามสัญญาคงเดิม	แก้ไขจากผู้ควบคุมและเจ้าของงาน	ปริมาณคนงาน
17. หากแผนงานมีความล่าช้า จะมีวิธีการปรับแก้แผนงานอย่างไร	ประชุมและปรึกษากับผู้ที่เกี่ยวข้องและเสนอวิธีแก้	เพิ่มกำลังคน เครื่องจักร เวลาการทำงาน	เพิ่มแรงงานจากผู้รับเหมาช่วง

ลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ทำให้เกิดความล่าช้าของโครงการ 3 ประเด็นหลัก ได้แก่

1. ทีมงานโครงการ ประกอบด้วย เจ้าของงาน ผู้ควบคุมงาน ผู้รับเหมาหลัก ผู้รับเหมาย่อย ผู้ออกแบบ

2. ปัจจัยภายนอก เช่น สภาพแวดล้อมที่หน้างาน สภาพอากาศ สภาพเศรษฐกิจและการเมือง

3. ปัจจัยภายใน เช่น นโยบายผู้บริหาร หัวหน้างาน คนงาน ปริมาณเงินทุน

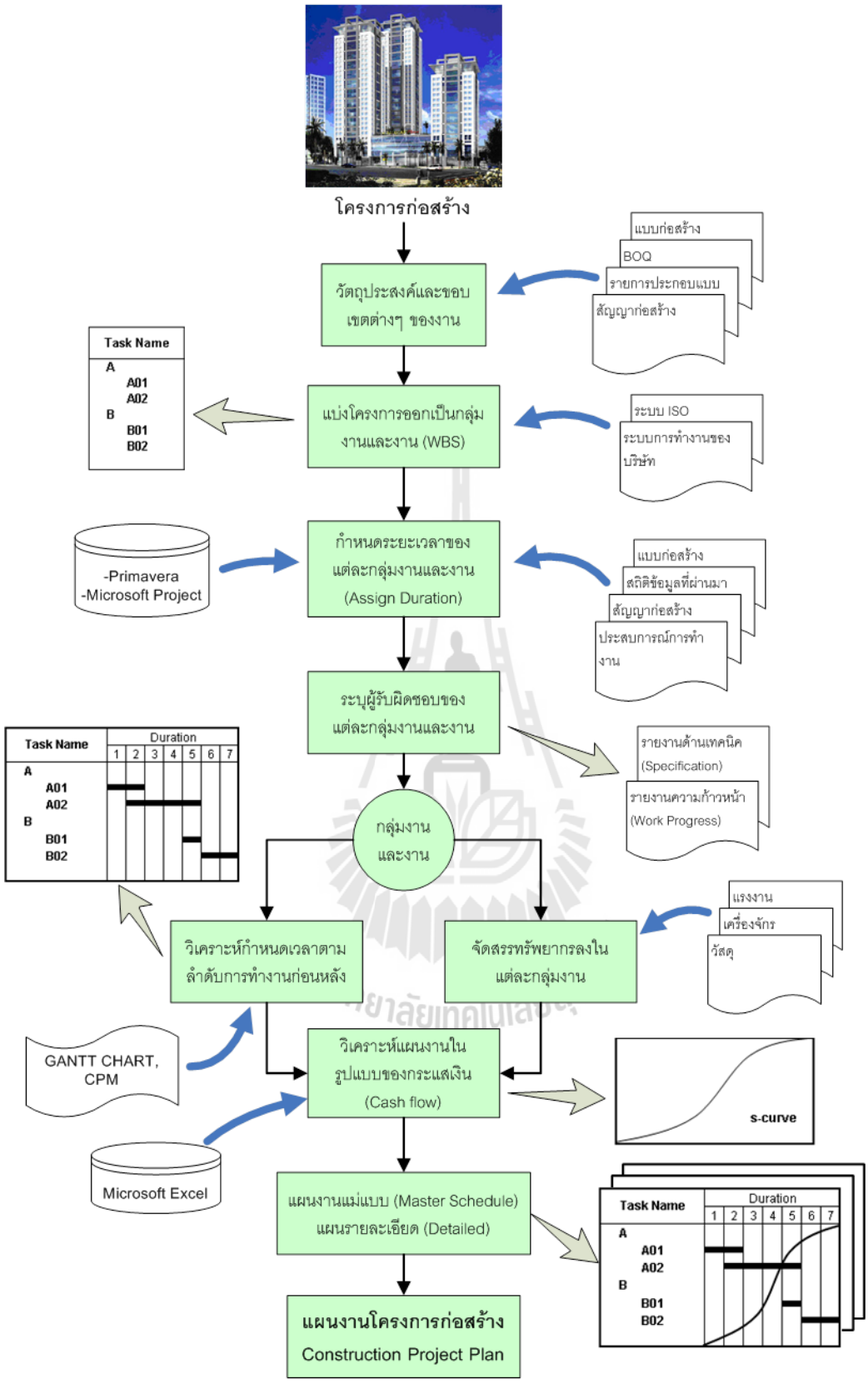
พบว่าบริษัท Syntec Construction ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ 2, 1, 3 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากบริษัท 27 วิศวกรรมที่ให้ความสำคัญกับปัจจัยที่ 3, 1, 2 เรียงลำดับ

กระบวนการและข้อมูลที่ใช้ในการวางแผนงานโดยสรุปแยกตามบริษัท

บริษัท Black and Veatch ใช้แหล่งข้อมูลในการวางแผนงาน ได้แก่ แบบก่อสร้าง รายการประกอบแบบและการประชุมหัวหน้างาน ในการวางแผนยังได้พิจารณาเรื่องระยะเวลาและการใช้ทรัพยากรโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อชั่วโมงของทรัพยากร แต่ไม่พิจารณากระแสเงินสดส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดค่าใช้จ่ายในแต่ละเดือนได้อย่างถูกต้อง ในการพิจารณาเรื่องระยะเวลาได้คำนึงถึงระยะเวลาตามสัญญาเพียงอย่างเดียวโดยใช้ข้อมูลจากสถิติของโครงการที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

บริษัท Syntec Construction และบริษัท 27 วิศวกรรม ใช้แหล่งข้อมูลในการวางแผนงาน ได้แก่ สัญญาก่อสร้าง แบบก่อสร้าง และรายการปริมาณงาน (BOQ) ในการวางแผนงานยังได้พิจารณาเรื่องระยะเวลาและการใช้กระแสเงินสด แต่ไม่พิจารณาการใช้ทรัพยากรส่งผลให้จำนวนทรัพยากรไม่เพียงพอ งานเกิดความล่าช้าและค่าใช้จ่ายโครงการสูงขึ้น ในการพิจารณาเรื่องระยะเวลาได้คำนึงถึงระยะเวลาตามสัญญาโดยใช้ประสบการณ์ในการทำงานเป็นตัวกำหนดระยะเวลาของแต่ละกิจกรรม

ขั้นตอนการวางแผนจะเริ่มตั้งแต่การกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตต่างๆ ของงานโครงการ วิธีการดำเนินงานต่างๆ เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมาย ซึ่งใช้แหล่งข้อมูลนำเข้าจากแบบก่อสร้าง รายการปริมาณงาน (BOQ) รายการประกอบแบบ และสัญญาก่อสร้าง โดยการแบ่งเนื้องานทั้งโครงการออกเป็นโครงสร้างของหมวดงานและงานย่อย (Work Breakdown Structure: WBS) ในขั้นตอนนี้ บริษัทมีมาตรฐานวิธีการแบ่งเป็นของแต่ละบริษัทและเทียบเคียงจากแผนงานของโครงการเดิมที่ผ่านมา จากนั้นกำหนดระยะเวลาที่จะต้องใช้ของแต่ละกิจกรรม ตามขนาดเนื้องานจากแบบก่อสร้าง และความยากง่ายด้วยสถิติและประสบการณ์ทำงานที่ผ่านมา นำข้อมูลเบื้องต้นของแผนงานที่ได้เหล่านี้มาป้อนนำเข้าลงในโปรแกรมสำเร็จรูปช่วยวางแผน ที่พบคือ Primavera และ Microsoft Project จากนั้นกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆด้วยประสบการณ์ของทีมงานบริหารโครงการ แล้วจึงกำหนดหมอบหมายผู้รับผิดชอบและการใช้ทรัพยากรต่างๆ ของแต่ละหมวดงาน แผนงานที่ได้จะใช้เป็น Master schedule เพื่อให้ประสานกันภายในทีมงานและเพื่อติดตามและควบคุมความก้าวหน้าของโครงการในระหว่างดำเนินการ รูปภาพข้างล่างแสดงกระบวนการทั่วไปโดยสรุป



รูปที่ 2.27 กระบวนการทั่วไปของการวางแผนโครงการของบริษัทก่อสร้างในประเทศไทย

2.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้ให้สัมภาษณ์ได้ให้ความเห็นจากมุมมองแต่ละท่านต่อปัญหาในการวางแผนงาน ได้แก่ ปัญหาระบบมาตรฐานที่ใช้ในการวางแผน ปัญหาการสื่อสารหรือความเข้าใจไม่ตรงกันในช่วงการติดตามความก้าวหน้างาน และปัญหาจำนวนแรงงานไม่เพียงพอในระหว่างดำเนินงาน โดยประเด็นด้านจำนวนแรงงานไม่เพียงพอได้รับทราบข้อมูลจากบริษัท 27 วิศวกรรม ที่เห็นว่าส่งผลให้โครงการล้าช้ากว่าแผนงาน การขาดแคลนแรงงานในโครงการก่อสร้างเป็นผลมาจากแรงงานส่วนใหญ่มาจากภาคเกษตรกรรม เมื่อถึงฤดูกาลเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว แรงงานกลุ่มนี้จะหยุดงานหรือลาออก เพื่อกลับไปทำการเกษตร ทำให้จำนวนแรงงานในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีจำนวนลดลงและเกิดการขาดแคลนในที่สุด ซึ่งหากผู้วางแผนไม่ได้เตรียมการไว้ในกรณีที่จำนวนแรงงานมีการเปลี่ยนแปลงผันผวน ก็จะทำให้งานล่าช้าและต้องจ่ายค่าทำงานล่วงเวลา การกำหนดระยะเวลาของแต่ละกิจกรรมนั้นได้จากประสบการณ์ของผู้วางแผนหรือจากสถิติที่มี โดยไม่ได้นำจำนวนแรงงานที่มาใช้ประกอบการคำนวณเพื่อกำหนดระยะเวลากิจกรรมที่เหมาะสมด้วย

การติดตามความก้าวหน้าและควบคุมโครงการ พบว่ามีการรายงานความก้าวหน้าทุกอาทิตย์และทุกเดือนขึ้นอยู่กับความสำคัญของงาน ส่วนปัญหาความล่าช้าของงานที่เกิดขึ้นนั้นจะประชุมกันเพื่อหาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมและสามารถทำได้ เพื่อให้ความก้าวหน้ากลับเป็นไปตามแผน

ขั้นตอนการวางแผนโครงการจะคำนึงถึงกำหนดเวลาตามในสัญญาก่อสร้างเป็นสำคัญ โดยไม่ได้คำนึงถึงการจัดสรรใช้ทรัพยากร ค่าใช้จ่าย และกระแสเงินสดของโครงการอย่างจริงจัง ทำให้แผนงานที่ได้นั้นมุ่งไปที่เป้าหมายทางด้านเวลาเท่านั้น พบว่าโปรแกรมที่ใช้ช่วยวางแผนคือ Microsoft Project และ Primavera และใช้โปรแกม Microsoft Excel สำหรับการรายงานผลความก้าวหน้า ส่วนเป้าหมายด้านกระแสเงินสดของโครงการจะถูกพิจารณาแยกส่วนออกจากแผนงาน โดยให้ฝ่ายบริหารการเงินเป็นผู้รับผิดชอบ การวางแผนงานของบริษัทก่อสร้างที่ได้ให้สัมภาษณ์นั้นทุกบริษัทมีความพึงพอใจต่อกระบวนการวางแผนงานของบริษัทตนเอง เนื่องจากได้ปรับปรุงกระบวนการและวิธีการทำงานมาโดยตลอดจนทำให้รูปแบบการทำงานมีความเหมาะสมกับทีมงานผู้วางแผนเอง

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมคือ โปรแกรมช่วยการบริหารโครงการไม่จำเป็นต้องมีความสามารถที่หลากหลายครอบคลุมตลอดทุกกระบวนการ เนื่องจากทำให้ต้องการข้อมูลนำเข้าจำนวนมากและเพิ่มความซับซ้อน ทำให้ผู้บริหารโครงการไม่สามารถใช้ได้อย่างสะดวก การออกแบบให้เป็นโปรแกรมเฉพาะด้านที่แยกกันที่สามารถช่วยงานได้เฉพาะในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการบริหารโครงการ เพื่อให้โปรแกรมนั้นใช้ได้ง่าย เรียนรู้ได้เร็ว จะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริหารโครงการได้เหมาะสมกับความต้องการ

2.6 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนงานก่อสร้าง เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization models) ที่ผ่านมาที่ได้ถูกนำมาทบทวนในการวิจัยนี้สามารถสรุปเป็นประเด็นหลักต่างๆในการสร้างโมเดลปัญหา ได้ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนงานก่อสร้างที่ผ่านมา

Study	Decision variables	Objective function	Constraints	Sloving method	Special characteristic
(Chan, Chua, and Kannan 1996)	Scheduling priority + start time delay of activities	Difference between resource availability and utilization	Precedent relationship constraints	GA	
(Hegazy 1999)	Scheduling priority	Multi-objective function: project finish time + resource allocation moments (Mx and My)	Precedent relationship constraints + resource availability	GA	Using MS Project
(S-S Leu and C-H Yang 1999)	Phase1: activity duration Phase2: Scheduling priority	Phase1: Multi-objective function: project finish time + project direct cost Phase2: resource leveling index	Phase1: Precedent relationship constraints + resource availability Phase2: Precedent relationship constraints	GA	Two-phased optimization
(S-S Leu, C-H Yang, and J-C Huang 2000)	Activitiy start time	Difference between resource availability and utilization	Precedent relationship constraints	GA	
(Feng, L Liu, and Burns 2000)	Activity execution methods	Total project cost	Precedent relationship constraints + Project finish time	GA	Stochastically distributed time and cost
(SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001)	Activity durations (under normal/crash mode)	Total project direct cost	Precedent relationship constraints + Project finish time	GA	Fuzzy activity durations; Own force/Subcontracting
(Hegazy and Ersahin 2001)	Activity execution methods + start time delay of	Multi-objective function: total project cost + resource allocation moments (Mx) + bonus/penalty	Precedent relationship constraints + resource availability + project finish deadline	GA	Using MS Project

	activities	for project finish time + total financing cost			
(Merkle, Middendorf, and Schmeck 2002)	Activity start time	Project finish time	Precedent relationship constraints + resource availability	Ant colony optimizatio n	
(Elazouni and Gab-Allah 2004)	Float of activity	Shifting time of the last critical activity	Precedent relationship constraints + credit limit for the negative cash flow	Integer programmi ng	Financial-based constraints
(Elazouni and Fikry Gomaa Metwally 2005)	Activitiy start time	Project profit	Precedent relationship constraints + credit limit for the negative cash flow	GA	
(Chassiakos and Sakellaropoulos 2005)	Activity execution mode (normal/crash)	Multi-objective function: project cost + project finish time + penalty/bonus	Precedent relationship constraints	Linearing/ Integer programmi ng	Generalized activity relationships
(Zheng and Ng 2005)	Activity execution methods	Multi-objective function: total project cost + project finish time	Precedent relationship constraints	GA	Fuzzy activity time-cost relationship
(H. Zhang et al. 2005)	Scheduling priority	Project finish time	Precedent relationship constraints + resource availability	Particle swarm optimizatio n	
(Hong Zhang, Tam, and Heng Li 2006)	Activity execution methods	Project finish time	Precedent relationship constraints + resource availability	Particle swarm optimizatio n	
(Elazouni and Fikry G. Metwally 2007)	Activity duration + activity start time	Multi-objective function: Project profit + bonus/penalty for project completion + resource allocation moments	Precedent relationship constraints + resource availability + project finish deadline + credit limit for the negative cash flow	GA	
(Eshtehardian, Afshar, and Abbasnia 2008)	Activity execution methods	Total project cost	Precedent relationship constraints	GA	Fuzzy activity time-cost relationship
(Pan, Hsaio, and KY Chen 2008)	Scheduling priority	Multi-objective function: Project finish time + resource allocation moments	Precedent relationship constraints + resource availability + project finish deadline	Tabu search algorithm	

(S-S Liu and Wang 2008)	Resource requirement + activity start time	Project profit	Precedent relationship constraints + resource availability + credit limit for the negative cash flow + project finish time	Constraint Programming	
(PH Chen and Weng 2009)	Phase1: Activity execution methods Phase2: Scheduling priority	Phase1: Total project cost Phase2: Project finish time	Phase1: Precedent relationship constraints Phase2: Precedent relationship constraints + resource availability	GA	Two-phased optimization; Overlap and interruption activity relationships

2.6.1 บทวิจารณ์ลักษณะโมเดลปัญหา

โมเดลปัญหา Stochastic TCT และ Fuzzy TCT เป็นโมเดลที่สร้างขึ้นเพื่อจัดการกับประเด็นความไม่แน่นอนของค่าระยะเวลาและค่าต้นทุนของกิจกรรมที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญของโมเดล ความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมก่อสร้างต่างๆนั้นเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ว่าเป็นอยู่จริง ดังนั้นโมเดลปัญหา Stochastic TCT และ Fuzzy TCT ที่พิจารณาค่าระยะเวลาและค่าต้นทุนของกิจกรรมตามความไม่แน่นอนของพวกมัน จึงเป็นสิ่งที่สมเหตุสมผล แต่อย่างไรก็ตามโมเดลเหล่านี้ก็ต้องสมมติค่าความไม่แน่นอนของแต่ละกิจกรรมว่ามีมากน้อยเพียงใด ซึ่งเป็นค่าที่ไม่อาจตรวจวัดได้ และตัวอย่างในงานวิจัยเหล่านี้ก็สมมติค่าความไม่แน่นอนเหล่านี้ขึ้นเอง จึงเป็นเหตุให้โมเดลเหล่านี้ขาดความน่าเชื่อถือ อีกทั้งกิจกรรมเหล่านี้เป็นกิจกรรมที่ยังไม่ได้เริ่มดำเนินการในขณะที่วางแผน หากพิจารณาหลักการทั่วไปของการวางแผนแล้ว อาจกล่าวได้ว่าการจัดการกับประเด็นความไม่แน่นอนของกิจกรรมนั้นเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น เนื่องจากแผนงานคือเป้าหมายที่ต้องการ ไม่ใช่ผลงานจริง ดังนั้นแผนงานย่อมไม่ตรงกับผลงานจริงทุกประการ หากแต่เมื่อกำหนดแผนงานขึ้นตามที่ต้องการแล้ว จะต้องนำแผนงานไปควบคุมผลการดำเนินงานจริงให้เป็นไปตามแผนงานให้มากที่สุด ซึ่งหากไม่เป็นไปตามแผนงานแล้วก็สามารถปรับปรุงแผนงานได้ การพยายามสร้างแผนงานที่เท่ากับผลงานจริงด้วยการคำนึงถึงผลของความไม่แน่นอนของการดำเนินงานจริงจึงเป็นสิ่งที่ไม่สมเหตุผลและไม่จำเป็น

การนำโมเดลปัญหา TCT ไปใช้นั้นผู้วางแผนจำเป็นต้องกำหนดทางเลือกของวิธีดำเนินการของแต่ละกิจกรรม ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วอาจมีกิจกรรมเพียงไม่กี่ประเภทที่สามารถมีทางเลือกได้หลายทาง กิจกรรมก่อสร้างต่างๆทั่วไปมักมีวิธีดำเนินการที่แน่นอน เช่น งานคอนกรีต งานไม้ งานเหล็ก ทางเลือกของวิธีดำเนินการที่อาจเป็นได้ก็เป็นลักษณะที่เลือกทำงานก่อสร้างในที่ (onsite construction) หรืองานก่อสร้างสำเร็จรูป (offsite construction) ซึ่งก็จะต้องถูกกำหนดตั้งแต่แบบ

ก่อสร้าง จึงอาจเรียกได้ว่าเป็นทางเลือกที่ต้องตัดสินใจตั้งแต่ก่อนเริ่มวางแผนโครงการ ดังนั้นการกำหนดทางเลือกวิธีดำเนินการของแต่ละกิจกรรม จึงอาจเป็นไปไม่ได้จริงในทางปฏิบัติ

อย่างไรก็ตาม ทางเลือกของวิธีดำเนินการ ที่เป็นไปได้อาจอยู่ในลักษณะของการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรที่ใช้ (resource combination) เช่น ส่วนผสมที่มีจำนวนคนงานและเครื่องจักรแตกต่างกันไป ซึ่งการกำหนดส่วนผสมของทรัพยากรลักษณะนี้ยังส่งผลต่อต้นทุนทางตรงของกิจกรรม ในทางที่ยิ่งใช้ทรัพยากรมากยิ่งมีต้นทุนทางตรงสูงขึ้น และควรจะทำให้ระยะเวลาของกิจกรรมลดลง จึงเป็นไปตามหลักการของโมเดลปัญหา TCT ทั้งนี้ต้นทุนทางตรงส่วนที่เป็นค่าวัสดุควรจะเท่าเดิมและเท่ากันในทุกๆทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากร

จึงอาจกล่าวได้ว่าการ tradeoff ระหว่างเวลาและต้นทุนของโครงการ จะเป็นเฉพาะต้นทุนส่วนที่เป็นค่าทรัพยากรดำเนินงาน (work resources ได้แก่ แรงงานและเครื่องจักร) เท่านั้น ต้นทุนส่วนอื่นๆได้แก่ ค่าวัสดุ ค่าต้นทุนทางอ้อม และค่าดำเนินการ จะไม่มีส่วนในการ Tradeoff นี้ เนื่องจากไม่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับระยะเวลาของกิจกรรม และกับระยะเวลาของโครงการ

$$D \propto \frac{1}{C_{wr}} \qquad \textbf{สมการที่ (2.58)}$$

$$C_{wr} \propto WR \qquad \textbf{สมการที่ (2.59)}$$

ดังนั้นจึงเสมือนกับโมเดลปัญหา TCT เป็นการ tradeoff ระหว่างเวลากับ จำนวนทรัพยากรดำเนินงานที่ใช้

$$D \propto \frac{1}{WR} \qquad \textbf{สมการที่ (2.60)}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวแปรสำคัญของแผนงานทั้ง 3 ตัวแปรคือ C_{wr}, WR, D จึงมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างใกล้ชิด ดังนั้นโมเดลปัญหา TCT จึงควรพิจารณาถึงจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน และความจำกัดของจำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ด้วย

สำหรับโมเดลปัญหา RCPSP ซึ่งแบ่งออกได้เป็น Resource allocation และ Resource leveling นั้นมีจุดร่วมกันบางประการ คือใช้ตัวแปรตัดสินใจเป็นการกำหนดหาวันเริ่มของกิจกรรมต่างๆ (Activity's start time) แต่สำหรับจุดที่ต่างกันก็มีลักษณะในทางที่เป็นคู่ตรงข้ามกันเท่านั้นคือ ปัญหา Resource allocation ต้องการ Minimize ระยะเวลาโครงการ โดยกำหนดให้จำนวนทรัพยากรที่มีอยู่เป็นค่าจำกัดคงที่ ในขณะที่ปัญหา Resource leveling ต้องการ Minimize ความผันผวนของระดับการใช้ทรัพยากร (ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องให้จำนวนความต้องการใช้ทรัพยากรต่ำที่สุด) โดยกำหนดให้ระยะเวลาโครงการเป็นค่าจำกัดคงที่

ซึ่งหากพิจารณาหลักการวางแผนทั่วไปแล้วจะเห็นได้ว่า ข้อมูลเบื้องต้นเมื่อเริ่มการวางแผนงานคือ ระยะเวลาของดำเนินงานโครงการที่มีอยู่ตามสัญญา ซึ่งเป็นระยะเวลาทั้งหมดที่สัญญากำหนดให้ และต้องดำเนินโครงการให้แล้วเสร็จไม่เกินกว่านี้ จึงเสมือนกับว่าข้อมูลระยะเวลาของโครงการควรเป็นค่าที่ถูกจำกัดไว้ให้คงที่ (อาจวางแผนด้วยระยะเวลาน้อยกว่าที่กำหนดไว้ในสัญญาเพื่อเป็นส่วนป้องกันความเสี่ยงที่อาจมีผลงานจริงล่าช้ากว่าแผนงาน) ส่วนจำนวนทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ เป็นหน้าที่ที่ผู้บริหารโครงการต้องจัดหามาให้เพียงพอกับความต้องการใช้ ซึ่งไม่ได้เป็นค่าที่จำกัดตั้งแต่ตอนเริ่มวางแผนงาน แต่ในทางปฏิบัติ เมื่อจัดหาทรัพยากรได้ตามจำนวนที่ต้องการแล้วจะต้องบริหารจัดการให้การใช้ทรัพยากรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (มีความผันผวนของระดับการใช้ต่ำที่สุด) ดังนั้นโมเดลปัญหา Resource leveling จึงมีลักษณะที่สอดคล้องกับขั้นตอนการวางแผนมากกว่าและสมเหตุสมผลกว่าในทางปฏิบัติ

โมเดลปัญหากระแสเงินสดและวงเงินเครดิต (Cashflow and credit limit) เป็นโมเดลที่พิจารณากระแสเงินสดของโครงการที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาต่างๆของโครงการ โดยจะต้องถูกจำกัดให้ไม่เกินกว่าวงเงินเครดิตที่มีอยู่ กระแสเงินสดจัดเป็นทรัพยากรของโครงการประเภทหนึ่งที่สำคัญและต้องอยู่ภายในข้อจำกัดวงเงินเครดิตที่มีอยู่ โมเดลนี้จึงมีแนวคิดและลักษณะคล้ายคลึงกับโมเดลปัญหา Resource allocation อย่างไรก็ตาม การบริหารกระแสเงินสดควรพิจารณาที่ระดับบริษัทมากกว่าจะเป็นที่ระดับโครงการ และนอกจากนี้หากบริษัทมีเงินทุนหมุนเวียนอยู่บ้างอาจทำให้ความต้องการกู้เงินน้อยลงหรือไม่จำเป็นเลย โมเดลปัญหานี้มีความน่าสนใจแต่การคำนวณกระแสเงินสดก็ขึ้นอยู่กับสมมติฐานหลายประการ เช่น ส่วนประกอบของประเภทต้นทุน ระยะเวลาเครดิตของต้นทุนประเภทต่างๆ การส่งมอบงาน และเงินงวดงาน เป็นต้น จึงอาจทำให้ความน่าเชื่อถือของผลคำตอบที่ได้ลดลง

โมเดลปัญหาที่รวมเอาเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม (Generalized activity relationships and constraints) เป็นโมเดลที่ถูกสร้างขึ้นให้สามารถจัดการกับเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาต่างๆของกิจกรรมที่อาจต้องใช้ในการวางแผน โดยความสามารถนี้มีอยู่ในโปรแกรมช่วยวางแผนทั่วไปอยู่แล้ว หากแต่โมเดลปัญหาที่งานวิจัยต่างๆที่ผ่านมานำเสนอมักพิจารณาให้มีเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบปกติคือ แบบ Finish-to-start จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่สามารถทำให้โมเดลปัญหา Optimization สามารถจัดการกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายและเงื่อนไขด้านเวลาแบบต่างๆที่อาจถูกกำหนดขึ้น อย่างไรก็ตาม แผนงานที่ดีไม่ควรมีความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่หลากหลายและซับซ้อน เพราะจะทำให้เข้าใจยากและไม่สะดวกในการนำแผนงานไปใช้ปฏิบัติจริง หากแต่ควรวางแผนให้เรียบง่ายที่สุด ในบางกรณีอาจทดแทนการใช้ความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่ซับซ้อน ด้วยการปรับเปลี่ยนการแบ่งกิจกรรมออกมาใหม่ หรือการเปลี่ยนคู่ความสัมพันธ์ให้ง่ายลง

โมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการ (Integrated model) ด้วยการรวมลักษณะโมเดลปัญหาต่างประเภทเข้าด้วยกัน เพื่อให้ประเด็นปัจจัยด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนโครงการก่อสร้างได้รับการพิจารณาไปพร้อมๆกันอย่างรอบด้าน โมเดลปัญหาแบบบูรณาการจึงน่าจะให้ผล

คำตอบที่สมเหตุสมผล สอดคล้องกับปัจจัยสำคัญต่างๆดีที่สุด อย่างไรก็ตามต้องแลกมาด้วยขนาดโมเดลปัญหาที่ใหญ่กว่า ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลนำเข้าที่ต้องการมากกว่า สมมติฐานที่ใช้ในการกำหนดค่าข้อมูลนำเข้าที่มากกว่า และอาจรวมถึงระยะเวลาการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดที่มากกว่าด้วย หรือในบางกรณีที่ปัจจัยด้านต่างๆที่พิจารณาเกิดความขัดแย้งกันเองอาจทำให้ไม่สามารถได้คำตอบที่ดีได้ ดังนั้นการนำโมเดลปัญหาแบบบูรณาการไปใช้จึงควรคำนึงถึงความเป็นไปได้จริงในทางปฏิบัติ

2.6.2 บทวิจารณ์วิธีการหาคำตอบ

วิธีการหาคำตอบของโมเดลปัญหาการวางแผนงานได้เริ่มต้นมาจากวิธีแบบ 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 ได้ถูกเสนอขึ้นมาหลากหลายต่างๆกัน ตั้งแต่การค้นหาแบบสุ่มเดาอย่างไร้ทิศทางโดยที่เน้นการใช้จำนวนรอบมากๆในการค้นหา และพัฒนาจนได้เป็นการค้นหาแบบมีกลยุทธ์ที่ช่วยให้การค้นหาคำตอบที่ดีได้เร็วยิ่งขึ้น วิธีแบบ searching algorithms นั้นมีจุดเด่นที่ไม่มีข้อจำกัดด้านขนาดของโมเดลปัญหา สามารถใช้หาคำตอบของโมเดลปัญหาขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนที่ใกล้เคียงกับโจทย์ปัญหาจริงได้มาก อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถรับประกันว่าคำตอบที่ได้เป็น optimum solution ถึงแม้ว่าจะเป็นคำตอบที่ดี ซึ่ง

สามารถแก้ไขข้อบกพร่องนี้ด้วยการเพิ่มเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบที่จะช่วยให้ได้คำตอบที่ดียิ่งๆขึ้นจนเป็นที่พอใจ

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

2.6.3 บทวิจารณ์สภาพการวางแผนและควบคุมของไทย

ภาพรวมของการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างของไทย จากการสำรวจพบว่าบริษัทก่อสร้างต่างๆมักเลือกทำงานก่อสร้างประเภทที่ตนเองมีความชำนาญ ลักษณะโครงการก่อสร้างของแต่ละบริษัทจึงคล้ายคลึงกับโครงการก่อสร้างที่ตนเองเคยทำมา ซึ่งช่วยให้การวางแผนและควบคุมโครงการเป็นไปอย่างสะดวกและคุ้นเคย ในขณะที่บริษัทก่อสร้างสัญชาติไทยมักจะวางแผนโครงการอย่างหยาบๆ และไม่ซับซ้อน ด้วยโปรแกรมสำนักงาน Spreadsheet และควบคุมต้นทุนของโครงการอย่างใกล้ชิด ความรับผิดชอบนี้จะเป็นของวิศวกรโครงการ โดยรายงานต่อสำนักงานใหญ่อย่างสม่ำเสมอ สำหรับบริษัทก่อสร้างต่างชาติ (สาขาประเทศไทย) จะให้ความสำคัญกับการวางแผนและควบคุมโครงการอย่างมาก โดยจะมีวิศวกรประจำฝ่ายการวางแผนและควบคุมโครงการที่หน้าที่รับผิดชอบโดยตรง วางแผนอย่างเป็นรูปแบบที่ละเอียด และใช้โปรแกรมช่วยวางแผนเฉพาะที่ซับซ้อน งานก่อสร้างที่บริษัทก่อสร้างต่างชาติรับทำมักเป็นงานก่อสร้างเฉพาะทางที่มีเนื้องานและเทคนิคที่ซับซ้อน เช่น งานโรงกลั่น งานโรงไฟฟ้า ที่มีมาร์จิ้นสูง ส่วนบริษัทสัญชาติไทยมักเลือกงานก่อสร้างทั่วไปที่มีลักษณะค่อนข้างซ้ำหรือเทคนิคไม่ซับซ้อน เช่น งานอาคารสูง

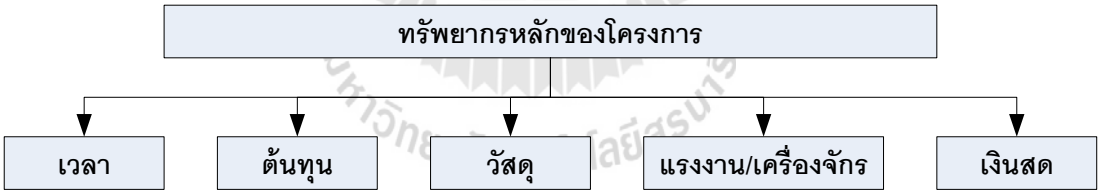
การบริหารทรัพยากรเป็นประเด็นปัญหาสำคัญของบริษัทก่อสร้างทั่วไป ที่นอกเหนือจากด้านเวลาและต้นทุน พบว่าแรงงานก่อสร้างที่มีฝีมือของไทยมีปริมาณที่ผันผวนในระหว่างปี เนื่องจากแรงงานก่อสร้างที่มีอยู่บางส่วนยังคงทำการเกษตรตามฤดูกาล จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องวางแผนหรือปรับแผนเพื่อแก้ไขความผันผวนนี้ นอกจากนี้โดยทั่วไปแล้วบริษัทก่อสร้างใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ทั้งเฉพาะหรือไม่เฉพาะทางในการวางแผนโครงการ โดยไม่มีการวางแผนงานด้วยการสร้างโมเดลปัญหาและการ Optimization ผู้มีหน้าที่วางแผนและควบคุมโครงการมักเป็นวิศวกรที่มีประสบการณ์และมีความรู้ระดับปริญญาตรีและโท

บทที่ 3 โมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการการบริหารทรัพยากรโครงการ

3.1 แนวคิดและหลักการ

การทบทวบหลักการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้างทำให้เห็นได้ว่า การวางแผนงานก่อสร้างเป็นภาระที่ต้องอาศัยการคิดคำนวณประมาณการปัจจัยด้านต่าง ๆจำนวนมาก ซึ่งปัจจัยต่าง ๆเหล่านี้มีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่หลากหลายรูปแบบ และสามารถนำมาสร้างเป็นโมเดลปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน ส่วนการควบคุมโครงการเป็นภาระที่ต้องใช้ความพยายามสูงในการเก็บรวบรวมข้อมูลผลการดำเนินงานจริงและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแผนงานฐานที่จัดเตรียมไว้ จนนำไปสู่มาตรการแก้ไขผลความแตกต่างที่เกิดขึ้น ซึ่งมาตรการแก้ไขที่นำมาใช้จะทำให้ต้องปรับปรุงแผนงานกลับไปให้ได้ดังแผนงานฐานเดิม หรือเป็นการวางแผนซ้ำอีกรอบเช่นนี้ไปเรื่อย ๆจนกระทั่งจบโครงการ

การวางแผนงานโครงการจึงเป็นส่วนงานที่น่าสนใจและที่เป็นจุดเน้นของการวิจัยนี้ โดยเฉพาะการพัฒนาเทคนิคการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนให้มีประสิทธิภาพและใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง โมเดลปัญหาการวางแผนที่มีในงานวิจัยต่าง ๆที่ผ่านมามีอยู่หลากหลายรูปแบบ แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนของปัจจัยต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามโมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการควรจะเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากได้พิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆที่มีผลต่อโครงการอย่างรอบด้านและอย่างรอบคอบ



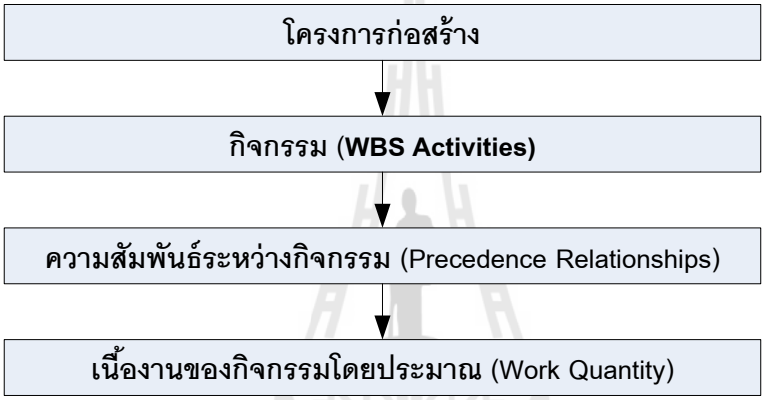
รูปที่ 3.1 ประเภททั่วไปของทรัพยากรหลักของโครงการ

เป้าหมายทั่วไปของการวางแผนโครงการก็คือการกำหนดจัดสรรใช้ทรัพยากรทั้งหมดของโครงการเพื่อทำให้โครงการแล้วเสร็จสมบูรณ์และให้เกิดประโยชน์สูงสุด คำว่าทรัพยากรมักใช้หมายความถึงเฉพาะแต่แรงงาน/เครื่องจักร (ทรัพยากรดำเนินงาน) แต่ความจริงแล้วทุกสิ่งสามารถมองให้อยู่ในรูปของทรัพยากรได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็น เวลา ต้นทุน วัสดุ แรงงาน/เครื่องจักร เงินสด และทรัพยากรต่าง ๆเหล่านี้มีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่อย่างซับซ้อน เช่น การใช้ต้นทุนมากขึ้นควรทำให้ระยะเวลาโครงการน้อยลง การใช้ระยะเวลาโครงการมากขึ้นอาจทำให้ต้นทุนลดลงหรือมากขึ้นได้ การใช้แรงงานมากควรทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นและระยะเวลาน้อยลง เป็นต้น

โมเดลปัญหาการวางแผนงานแต่ละรูปแบบเลือกพิจารณาเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรแต่ละคู่ เช่น โมเดลปัญหาการแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน เลือกพิจารณา

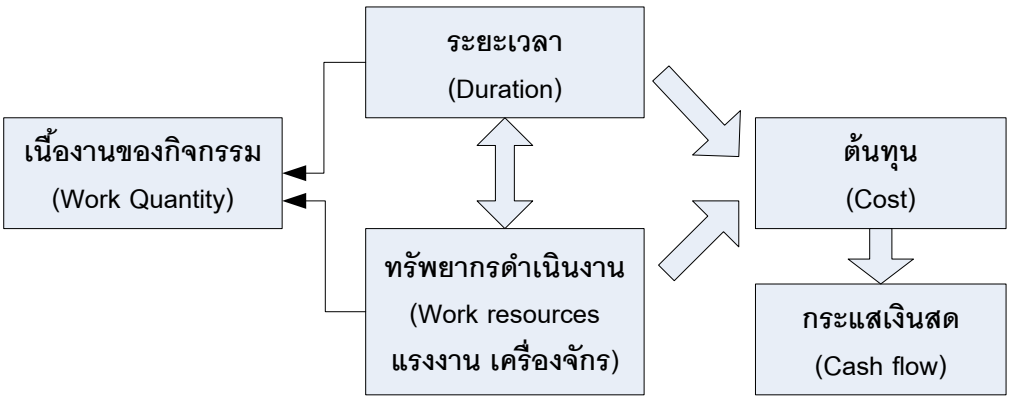
ความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรเวลากับต้นทุนของโครงการ โมเดลปัญหากระแสเงินสด เลือกพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรเวลากับกระแสเงินสด การเลือกพิจารณาเฉพาะคู่ความสัมพันธ์เสมือนกับเป็นการมองข้ามความสัมพันธ์ของทรัพยากรอื่นๆที่เหลือ ทั้งที่ทรัพยากรต่างๆมีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กันทั้งหมด จึงทำให้โมเดลปัญหาการวางแผนแต่ละรูปแบบไม่มีความสมบูรณ์ โมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการที่รวมเอาโมเดลปัญหาการวางแผนหลากหลายรูปแบบเข้าไว้ด้วยกันจึงควรเป็นโมเดลปัญหาที่สมเหตุผลที่สุด

โมเดลปัญหา TCT และ RCPSP สามารถบูรณาการรวมกันได้ จากขั้นตอนการวางแผนโครงการที่เริ่มต้นจากการกำหนดแบ่งกิจกรรมก่อสร้างต่างๆด้วย WBS และการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเหล่านั้น และจากการกำหนดแบ่งกิจกรรมนี้เองที่ทำให้สามารถประมาณเนื้องานของแต่ละกิจกรรมตามที่ปรากฏในแบบก่อสร้างได้



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนเริ่มต้นของการวางแผนโครงการ

จากปริมาณเนื้องานของแต่ละกิจกรรมนี้เองที่ผู้วางแผนต้องจัดสรรทรัพยากรประเภทต่างๆ ให้แก่กิจกรรมอย่างเหมาะสม ทรัพยากรหลัก (Common resources) เบื้องต้นที่ถูกประมาณจัดสรรให้กับกิจกรรมควรจะเป็น ระยะเวลา (Duration) และทรัพยากรดำเนินงาน (Work resources เช่น แรงงาน เครื่องจักร) ซึ่งทรัพยากรทั้งสองกลุ่มนี้ไม่มีลำดับการจัดสรรที่แน่นอน หากแต่ทรัพยากรทั้งสองกลุ่มนี้กลับมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ (ทรัพยากรวัสดุก็ต้องถูกจัดสรรให้กับกิจกรรมตามปริมาณเนื้องานเช่นกัน แต่ทรัพยากรวัสดุมีลักษณะที่เป็นจำนวนคงที่ ไม่แปรผันกับทรัพยากรประเภทอื่นๆ)



รูปที่ 3.3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักประเภทต่างๆ

การจัดสรรทรัพยากรหลัก (Common resources) ทั้งสองกลุ่มนี้เองที่ทำให้เกิดเป็นต้นทุน (Cost) ของกิจกรรม (ต้นทุนดังกล่าวนี้ไม่ใช่ต้นทุนทั้งหมดของกิจกรรม แต่เป็นต้นทุนส่วนที่มีความแปรผันกับระยะเวลาและทรัพยากรดำเนินงาน ไม่รวมต้นทุนค่าวัสดุและอื่นๆที่ไม่แปรผันกับทรัพยากรอื่นๆ) และต้นทุนส่วนนี้เองที่ประกอบกับเงื่อนไขด้านการเงินต่างๆที่ส่งผลต่อกระแสเงินสดออกและเข้าทำให้เกิดมีความสัมพันธ์กับกระแสเงินสดของโครงการ

จากความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักกลุ่มต่างๆดังแสดงในรูปภาพข้างบน ชี้ให้เห็นว่าโมเดลปัญหา TCT ที่พิจารณาเฉพาะคู่ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับต้นทุน แท้จริงแล้วเวลาและต้นทุนยังต้องสัมพันธ์กับทรัพยากรดำเนินงานอีกด้วย ซึ่งถูกแยกพิจารณาในโมเดลปัญหา RCPSP ในแง่ที่เป็นการจัดสรรทรัพยากร (ดำเนินงาน) ไม่เกินกว่าจำนวนที่มีอยู่ (Resource allocation) และการปรับสมดุลระดับการจัดสรรทรัพยากร (ดำเนินงาน) ให้ราบเรียบ (Resource leveling) ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงกระแสเงินสดของโครงการ ความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักกลุ่มต่างๆสามารถนำมาสร้างเป็นโมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการ การ optimization โมเดลปัญหาแบบใหม่นี้จะเป็นการหาแผนงานคำตอบที่สมเหตุสมผลและพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างรอบด้าน

หากพิจารณาต่อไป การจัดสรรทรัพยากรหลักกลุ่มต่างๆเหล่านี้ ควรมีลำดับเริ่มต้นจากการจัดสรรทรัพยากรดำเนินงาน (แรงงาน/เครื่องจักร) ซึ่งจำนวนที่จัดสรรจะส่งผลต่อระยะเวลาของกิจกรรมนั้น ในทิศทางที่ยิ่งจำนวนทรัพยากรดำเนินงานมากยิ่งทำให้ระยะเวลาของกิจกรรมลดลง แม้มั่นใจได้ว่าความสัมพันธ์นี้มีอยู่จริง แต่ไม่อาจระบุได้แน่ชัดว่าความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนนี้เป็นแบบใดและอาจไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งในทางปฏิบัติผู้วางแผนต้องเป็นผู้กำหนดจำนวนที่สัมพันธ์กันนี้

ลำดับต่อไปคือผลของการจัดสรรทรัพยากรดำเนินงานและระยะเวลาที่ทำให้เกิดเป็นต้นทุนของกิจกรรม โดยที่ต้นทุนของกิจกรรมทั้งหมดควรเป็นต้นทุนทางตรง (Direct cost) เท่านั้น ประกอบด้วย ค่าวัสดุ ค่าแรงงาน/เครื่องจักร ค่าวัสดุเป็นต้นทุนที่ไม่แปรผันกับทรัพยากรอื่นๆแต่ขึ้นกับปริมาณเนื้องานของกิจกรรมเท่านั้น ต้นทุนของกิจกรรมที่นำมาพิจารณาจึงเป็นเฉพาะต้นทุนค่าแรงงาน/เครื่องจักร ซึ่งจะต้องแปรผันโดยตรงกับจำนวนทรัพยากรดำเนินงานที่ได้จัดสรรไปแล้ว ผลรวมของต้นทุนของกิจกรรมทั้งหมดจะเป็นต้นทุนทางตรงของโครงการ ต้นทุนส่วนอื่นๆของ

โครงการ ได้แก่ ต้นทุนทางอ้อม ค่าดำเนินการที่สำนักงานใหญ่ จะแปรผันตามระยะเวลาของโครงการ

ลำดับสุดท้าย จากต้นทุนของกิจกรรมและของโครงการที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปคำนวณหากระแสเงินสดออกและเข้าของโครงการตามช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งกระแสเงินสดของโครงการนอกจากจะขึ้นกับต้นทุนที่เกิดขึ้นแล้วยังขึ้นกับเงื่อนไขทางการเงินต่างๆอีก ได้แก่ ระยะเวลาเครดิตของค่าใช้จ่ายประเภทต่างๆ การคิดเงินงวดงานและระยะเวลาการเบิกจ่าย เงินประกันผลงาน เงินเบิกล่วงหน้า อัตราดอกเบี้ยของเงินกู้ (เบิกเกินบัญชี) และวงเงินเครดิตที่เข้าถึงได้ ความเชื่อมโยงของทรัพยากรหลักกลุ่มต่างๆของโครงการที่อธิบายข้างต้นมาเหล่านี้ จะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์และเป็นโมเดลปัญหาการวางแผนงานแบบบูรณาการที่เหมาะสมแบบใหม่ได้ ซึ่งจะเรียกว่า Integrated Common Resource Project Scheduling Problem (ICRPSP)

ทรัพยากรหลัก (Common resources) กลุ่มต่างๆก็มีขอบเขตจำกัดของแต่ละกลุ่มอยู่ ระยะเวลาของโครงการถูกกำหนดไว้ก่อนในสัญญาก่อสร้าง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ให้สำหรับดำเนินการก่อสร้างจนแล้วเสร็จสมบูรณ์ หากเกินกว่านี้ก็มักปรับเงิน ต้นทุนของโครงการก็ถูกกำหนดด้วยงบประมาณของการก่อสร้างที่กำหนดมาจากราคาโครงการที่ชนะการประมูล ส่วนทรัพยากรดำเนินงานถูกจำกัดด้วยจำนวนแรงงานและเครื่องจักรที่มีอยู่ในโครงการหรือที่จัดเตรียมไว้ได้ และกระแสเงินสดของโครงการต้องถูกจำกัดด้วยวงเงินเครดิตจากแหล่งเงินทุนที่โครงการสามารถเข้าถึงได้ ด้วยข้อจำกัดของทรัพยากรหลักต่างๆเหล่านี้เองที่นำมาใช้ในการสร้างโมเดลปัญหาแบบใหม่ ICRPSP ขึ้น

3.2 สมการของโมเดลปัญหา ICRPSP

ส่วนประกอบหลักของโมเดลปัญหา ICRPSP แบ่งเป็น 3 ส่วนเหมือนกับโมเดลปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยทั่วไป (Optimization problems) คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint functions) ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของโมเดลที่สร้างขึ้นมีดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ กำหนดให้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มเวลาเริ่มของกิจกรรม (Activity's start time) และกลุ่มการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource combinations) กลุ่มเวลาเริ่มของกิจกรรมจะเป็นค่าคำตอบที่ใช้กำหนดเวลาของแผนงาน มีค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งเวลาเริ่มของกิจกรรมเหล่านี้จะเป็นไปตามเงื่อนไขของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนด เสมือนกับเป็นการปรับเลื่อนกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆเป็นลำดับภายในระยะเวลาโฟลทที่กิจกรรมนั้นมีอยู่ การคำนวณ CPM จะทำให้ได้ระยะเวลาของโครงการทั้งหมด และการกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อระดับการจัดสรรทรัพยากรและกระแสเงินสดอีกด้วย

Decision variables 1: S_i = เวลาเลื่อน (Shifting time) ของกิจกรรมที่ i

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

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

$\boldsymbol{S_i}$ = เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ส่วนตัวแปรตัดสินใจกลุ่มการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานนั้น เป็นการกำหนดให้กิจกรรมก่อสร้างต่างๆ สามารถมีทางเลือกส่วนผสมต่างๆกันได้ เช่น กิจกรรม A ใดๆมีทางเลือกการใช้ส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานเป็น

ทางเลือกที่ 1 จำนวนทรัพยากรประเภทที่ 1 (WR_1) เท่ากับ 5 หน่วย
จำนวนทรัพยากรประเภทที่ 2 (WR_2) เท่ากับ 10 หน่วย จึงทำให้มี
ระยะเวลา (D) เท่ากับ 7 วัน จึงทำให้มี
ต้นทุน (ทางตรงไม่รวมวัสดุ) (C_{rw}) เท่ากับ 100,000 บาท

ทางเลือกที่ 2 จำนวนทรัพยากรประเภทที่ 1 (WR_1) เท่ากับ 8 หน่วย
จำนวนทรัพยากรประเภทที่ 2 (WR_2) เท่ากับ 15 หน่วย จึงทำให้มี
ระยะเวลา (D) เท่ากับ 5 วัน จึงทำให้มี
ต้นทุน (ทางตรงไม่รวมวัสดุ) (C_{rw}) เท่ากับ 190,000 บาท

ทางเลือกที่ 3 .... เป็นต้น

ซึ่งจะเห็นว่าการกำหนดทางเลือกต่างๆให้กับกิจกรรมใดๆ ต้องกำหนดเตรียมไว้ก่อนหน้าด้วยเทคนิคการประมาณอัตราผลผลิต เวลาและต้นทุน ซึ่งอาจได้จากสถิติหรือประสบการณ์ของผู้วางแผน ความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลัก (Common resources) ทั้งสามกลุ่ม (WR, D, C_{rw}) ที่ซับซ้อนไม่ได้ถูกแสดงรายละเอียดที่มาอย่างชัดเจนในการวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตามทิศทางความสัมพันธ์ที่สมเหตุสมผลจำเป็นต้องคงรักษาไว้ ดังเช่นในตัวอย่างนี้ ทางเลือกที่ 1 เป็นทางเลือกที่ใช้ทรัพยากรดำเนินงานน้อยกว่าทางเลือกที่ 2 ดังนั้นระยะเวลาของทางเลือกที่ 1 ต้องมากกว่าทางเลือกที่ 2 และต้นทุนของทางเลือกที่ 1 ต้องน้อยกว่าทางเลือกที่ 2 จึงจะถือว่ามีทิศทางความสัมพันธ์ที่สมเหตุสมผล เป็นต้น

ตัวแปรตัดสินใจกลุ่มนี้จะกำหนดให้เป็นค่าแบบ Binary โดยหากทางเลือกใดมีค่าเป็น 1 แสดงว่าได้ถูกเลือกใช้ และค่าที่เป็น 0 คือการไม่ถูกเลือก

Decision variables 2: $\boldsymbol{x_{ij}}$ = ตัวแปร binary ที่ใช้เลือกทางเลือกที่ j ของรูปแบบส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานของกิจกรรมที่ i

โดยที่ให้ $\sum_j x_{ij} = 1;\ \forall i$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ กำหนดให้เป็นแบบ Multi-objective ซึ่งเป็นการบูรณาการเป้าหมายด้านการบริหารทรัพยากรหลัก (Common resources) หลายอันของโครงการเข้าด้วยกัน ประกอบด้วย ต้นทุนทั้งหมดของโครงการ (Total project cost: TC) และระดับการจัดสรรทรัพยากร (Resource fluctuation) โดยเป็นการหาค่าน้อยที่สุด (Minimization) ต้นทุนทั้งหมดของโครงการแบ่งออกเป็น ต้นทุนทางตรงค่าวัสดุ (C_m) ต้นทุนทางตรงค่าทรัพยากรดำเนินงาน (C_{wr}) ต้นทุนทางอ้อมและต้นทุนค่าดำเนินการที่สำนักงานใหญ่ (IC) และต้นทุนอีกส่วนหนึ่งที่เป็นผลกระทบมาจากกระแสเงินสดของโครงการคือ ต้นทุนทางการเงิน (FC) ที่เสียไปในรูปของดอกเบี้ยของเงินลงทุน ได้สมการต้นทุนทั้งหมดของโครงการ

$$TC = C_m + C_{wr} + IC + FC \qquad \text{สมการที่ (3.2)}$$

ส่วนค่าดัชนีที่ใช้วัดระดับการจัดสรรทรัพยากรที่นำมาใช้คือ RRH, RID โดยปรับปรุงจาก (El-Rayes and Jun 2009)

Objective function:

$$Minimize\ (w_1 RRH + w_2 RID + w_3 TC) \qquad \text{สมการที่ (3.3)}$$

โดยที่ w_1, w_2, และ w_3 คือค่าถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญและเพื่อการปรับขนาดสเกลของตัวเลข ของวัตถุประสงค์ย่อยต่างๆทั้ง 3 พจน์

ฟังก์ชันข้อจำกัด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม และกลุ่มขีดจำกัดของทรัพยากรหลัก ดังนี้

Subject to 1: กลุ่มเงื่อนไขความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบ Finish-to-Start (FS) ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณค่าเวลาต่างๆของกิจกรรม ด้วย CPM

FS: $ST_i \geq FT_h; \forall h$ **สมการที่ (3.4)**

$FT_i \geq ST_i + D_i$ **สมการที่ (3.5)**

Subject to 2: กลุ่มขีดจำกัดของทรัพยากรหลักได้แก่ เวลา ทรัพยากรดำเนินงาน และวงเงินเครดิต

เวลา $Max(FT_i) \leq T$ **สมการที่ (3.6)**

ทรัพยากรดำเนินงาน $$MRD_k \leq R_k$$ **สมการที่ (3.7)**

วงเงินเครดิต $$Max\,(F_t) \leq CL$$ **สมการที่ (3.8)**

โดยที่ ST_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i (ที่ปรับเลื่อนแล้ว)

FT_i = เวลาแล้วเสร็จของกิจกรรมที่ i

h = กิจกรรม predecessors ของกิจกรรมที่ i

T = ระยะเวลาของโครงการที่กำหนดในสัญญาก่อสร้าง

D_i = ระยะเวลาของกิจกรรมที่ i

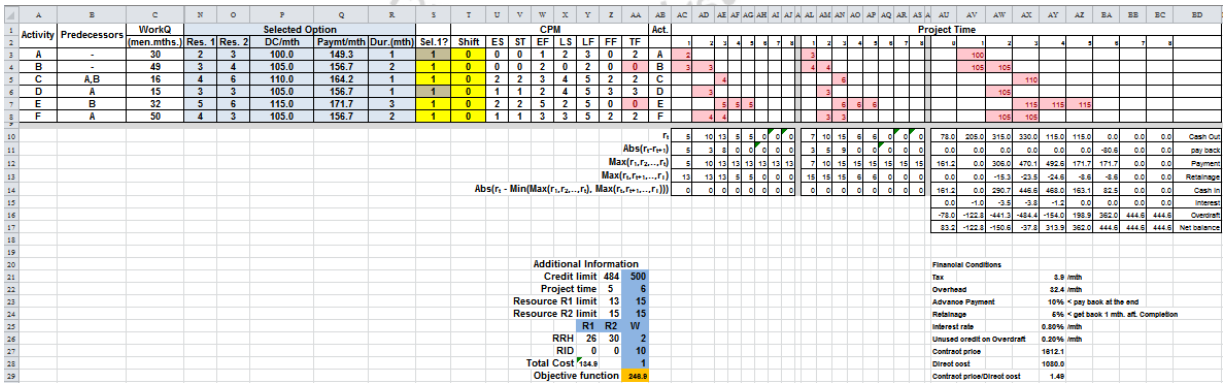
R_k = จำนวนทรัพยากรดำเนินงานประเภทที่ k ที่มีอยู่

F_t = ยอดเงินเบิกเกินบัญชีที่รอบเวลาที่ t

CL = วงเงินเครดิตของโครงการ

3.3 การสร้างโมเดลด้วย Spreadsheet

โมเดลปัญหาที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel™ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปประเภท Spreadsheet ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยตัวโมเดลปัญหาจะถูกบันทึกเป็นไฟล์หนึ่งไฟล์ ที่ประกอบด้วยแผ่นงาน (Sheet) แผ่นเดียวที่ใช้ป้อนบันทึกสูตรของสมการต่าง ๆทั้งหมดของโมเดล และจัดวางอย่างเป็นระเบียบเพื่อความสะดวกในการป้อนข้อมูลนำเข้า (input) และแสดงข้อมูลผลลัพธ์ (output) ให้เข้าใจได้ง่าย แผ่นคำนวณที่ใช้พื้นที่เป็นตัวโมเดลทั้งหมดแสดงในรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.4 โมเดลปัญหา ICRPSP ที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel

ในระหว่างการพัฒนาโมเดลได้ใช้ข้อมูลโครงการก่อสร้างที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Liu and Wang (2008) ที่ก็ได้อ้างอิงโจทย์ข้อมูลโครงการก่อสร้างมาจากงานวิจัยของ Elazouni and

Metwally (2005) ซึ่งเป็นโจทย์ปัญหาที่มีขนาดเล็กกระทัดรัดเหมาะสำหรับการทดสอบความถูกต้องในการสร้างโมเดล

ส่วนประกอบของโมเดลบน Excel แบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ข้อมูลนำเข้า ตัวแปรตัดสินใจ การคำนวณแผนงานโครงการ การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ข้อมูลนำเข้า

ส่วนข้อมูลนำเข้าคือพื้นที่สำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งาน เป็นตัวโจทย์ปัญหาแผนงานโครงการก่อสร้างที่ต้องการหาคำตอบ โมเดลปัญหาแบบบูรณาการเป็นโมเดลที่ซับซ้อนเนื่องจากพิจารณาปัจจัยหลายด้านพร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องการข้อมูลนำเข้าที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ซึ่งต้องได้มาจากการจัดเตรียมของผู้วางแผน ทั้งนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ 1.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง 2.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านเงื่อนไขทางการเงิน 3.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านขีดจำกัดของทรัพยากรหลักของโครงการ รายละเอียดข้อมูลนำเข้าในแต่ละกลุ่มมีดังนี้

1.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง มีข้อมูลที่ต้องนำเข้าได้แก่ รายชื่อกิจกรรม ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ปริมาณเนื้องาน จำนวนทรัพยากรแต่ละประเภทที่ใช้ ต้นทุนทางตรง เงินงวดงาน และระยะเวลาของกิจกรรม ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดทำแผนงานโครงการก่อสร้าง และยังได้กำหนดให้กิจกรรมก่อสร้างบางกิจกรรมมีทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานจำนวน 2 ทางเลือก

จำนวนกิจกรรมของแต่ละโครงการที่แตกต่างกันไปเป็นตัวกำหนดขนาดของโมเดลปัญหา หากมีจำนวนกิจกรรมมากจะทำให้โมเดลปัญหามีขนาดใหญ่ ซึ่งรายชื่อกิจกรรมเหล่านี้ได้มาจากการแบ่งแยกย่อยทำโครงสร้างกระจายงานย่อย (WBS)

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นข้อมูลที่แสดงแทนด้วย Predecessor(s) ของแต่ละกิจกรรม โดยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมกับ predecessor กำหนดให้มีค่าตั้งต้นเป็นแบบ Finish-to-Start (FS)

ปริมาณเนื้องานของกิจกรรมเป็นตัวเลขที่ได้จากขอบเขตของกิจกรรมตามที่กำหนดแบ่งออกมา โดยกำหนดให้มีหน่วยพื้นฐานเดียวกันทุกกิจกรรมคือ man.months ซึ่งเป็นการแปลงหน่วยเนื้องานจริงๆที่อาจแตกต่างกันไปในแต่ละกิจกรรม ให้กลายเป็นหน่วยเดียวกัน ทั้งนี้ต้องนำปริมาณเนื้องานจริงมาพิจารณาประกอบกับความยากง่ายและอัตราผลผลิตของงานนั้นๆ

ในแต่ละทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงาน (option) จะกำหนดให้มี จำนวนทรัพยากรแต่ละประเภทที่ใช้ (กำหนดให้มี 2 ประเภท) ต้นทุนทางตรง เงินงวดงาน และระยะเวลาของกิจกรรม ในทางปฏิบัติจะเป็นตัวเลขที่ได้จากการประมาณให้เหมาะสมตามปริมาณเนื้องานและสภาพที่หน้างาน และให้มีความสอดคล้องกันในแต่ละกิจกรรม ซึ่งโมเดลที่สร้างขึ้นนี้มีการพิจารณาระยะเวลากิจกรรมเหล่านี้แบบเป็นค่าที่รู้ได้แน่นอน (deterministic values) ที่กำหนดขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลหลักสำหรับการวางแผน

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Activity	Predecessors	WorkQ	Option 1					Option 2				
2			(men.mths.)	Res. 1	Res. 2	DC/mth	Paymt/mth	Dur.(mth)	Res. 1	Res. 2	DC/mth	Paymt/mth	Dur.(mth)
3	A	-	30	2	3	100	149.3	1	0	0	0	0	0
4	B	-	49	3	4	105	156.7	2	5	8	250	156.7	1
5	C	A,B	16	4	6	110	164.2	1	3	5	90	164.2	2
6	D	A	15	3	3	105	156.7	1	0	0	0	0	0
7	E	B	32	5	6	115	171.7	3	4	4	192.5	171.7	2
8	F	A	50	4	3	105	156.7	2	3	2	63.3	156.7	3

รูปที่ 3.5 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้าง

ดังนั้นผู้วางแผนสามารถกำหนดทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานของกิจกรรมต่างๆตามที่เป็นไปได้จริง จากนั้นโมเดลนี้จะหาทางเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดให้เป็นคำตอบ โดยไม่จำเป็นที่ทุกกิจกรรมต้องมีทางเลือกเสมอไป อย่างไรก็ตามโมเดลที่สร้างขึ้นนี้จำกัดให้สามารถป้อนจำนวนทางเลือกส่วนผสมได้สูงสุด 2 ทางเลือก ในแต่ละทางเลือกให้มีทรัพยากรได้สูงสุด 2 ประเภท ทั้งนี้เป็นโจทย์ปัญหาที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Liu and Wang (2008) และ Elazouni and Metwally (2005) เพื่อให้ขนาดของโมเดลปัญหาที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม ซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของโจทย์ปัญหา

2.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านเงื่อนไขทางการเงิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อกระแสเงินสดออกและเข้าของโครงการ โดยมีความสัมพันธ์เบื้องต้นกับต้นทุนทางตรงของกิจกรรม ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ภาษี ค่าดำเนินการที่สำนักงานใหญ่ เงินเบิกล่วงหน้า เงินประกันผลงาน อัตราดอกเบี้ยเงินเบิกเกินบัญชี อัตราดอกเบี้ยวงเงินเครดิตที่ไม่ได้ใช้ มูลค่าโครงการ ต้นทุนทางตรงรวม และอัตราส่วนมูลค่าโครงการต่อต้นทุนทางตรง ปัจจัยต่างๆเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณหากระแสเงินสดของโครงการ ในทางปฏิบัติปัจจัยต่างๆเหล่านี้สามารถหาได้จากเงื่อนไขของสัญญาก่อสร้างที่ทำกับเจ้าของงาน สัญญาว่าจ้างหรือซื้อของกับผู้รับเหมาช่วงและร้านค้า และสัญญากู้เงินกับแหล่งเงินทุนของโครงการ

	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA
23	**Financial Conditions**						
24	**Tax**	**3.9**	**/mth**				
25	**Overhead**	**32.4**	**/mth**				
26	**Advance Payment**	**10%**	**< pay back at the end**				
27	**Retainage**	**5%**	**< get back 1 mth. aft. Completion**				
28	**Interest rate**	**0.80%**	**/mth**				
29	**Unused credit on Overdraft**	**0.20%**	**/mth**				
30	**Contract price**	**1612.1**					
31	**Direct cost**	**1080.0**					
32	**Contract price/Direct cost**	**1.49**					

รูปที่ 3.6 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านเงื่อนไขทางการเงิน

3.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านขีดจำกัดของทรัพยากรหลักของโครงการ เป็นข้อมูลนำเข้ากลุ่มสุดท้ายที่ใช้เป็นขอบเขตของจำนวนทรัพยากรหลักต่างๆได้แก่ เวลา ทรัพยากรดำเนินงาน และ

วงเงินเครดิต (ขีดจำกัดด้านต้นทุนทางตรง รวมอยู่ในกลุ่มข้อมูลนำเข้าที่ 2) ขอบเขตของจำนวนทรัพยากรหลักเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ในการกำหนดพื้นที่เป็นไปได้ของการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด เป็นข้อมูลที่นำไปใช้กับฟังก์ชั่นข้อจำกัดของโมเดลปัญหา

	W	X	Y	Z	AA
16	**Additional Information**				
17				**Credit limit**	**500**
18				**Resource limit**	**12**
19				**Contract time**	**5**

รูปที่ 3.7 กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านขีดจำกัดของทรัพยากรหลักของโครงการ

3.3.2 ตัวแปรตัดสินใจ

ส่วนตัวแปรตัดสินใจของโมเดลนี้ถูกกำหนดให้ประกอบด้วย 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวแปรเวลาเลื่อน (Shifting time) ของกิจกรรมใดๆ (คอลัมน์ Shift ดังแสดงในรูปข้างล่าง) มีค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งจะเป็นค่าคำตอบที่ใช้ปรับเลื่อนกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆ (Activity's start time) ภายในระยะเวลาโฟลทที่กิจกรรมนั้นมีอยู่ โดยที่เวลาเริ่มของกิจกรรมยังจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่กำหนดด้วย

	A	N	O	P	Q	R	S	T
1	**Activity**	**Selected Option**						
2		**Res. 1**	**Res. 2**	**DC/mth**	**Paymt/mth**	**Dur.(mth)**	**Sel.1?**	**Shift**
3	**A**	**2**	**3**	**100**	**149.3**	**1**	**1**	**0**
4	**B**	**3**	**4**	**105**	**156.7**	**2**	**1**	**0**
5	**C**	**4**	**6**	**110**	**164.2**	**1**	**1**	**0**
6	**D**	**3**	**3**	**105**	**156.7**	**1**	**1**	**0**
7	**E**	**5**	**6**	**115**	**171.7**	**3**	**1**	**0**
8	**F**	**4**	**3**	**105**	**156.7**	**2**	**1**	**0**

รูปที่ 3.8 ส่วนตัวแปรตัดสินใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และกลุ่มการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource combinations) ตัวแปรตัดสินใจกลุ่มนี้จะกำหนดให้เป็นค่าแบบ Binary (คอลัมน์ Sel.1? ย่อมาจากคำว่า Select Option 1? ดังแสดงในรูปข้างบน) โดยหากค่าในคอลัมน์นี้เท่ากับ 1 หมายถึงทางเลือก Option 1 ได้ถูกเลือกใช้ แต่หากมีค่าเท่ากับ 0 จะหมายถึงทางเลือก Option 2 ได้ถูกเลือกใช้ โดยที่ชุดข้อมูลของทางเลือกที่ถูกเลือกจะประกอบไปด้วย จำนวนทรัพยากรดำเนินงานแต่ละประเภท ต้นทุนทางตรงเงินงวดงาน และระยะเวลาของกิจกรรม ซึ่งค่าข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปคำนวณเป็นแผนงานและนำไปประเมินค่าต่อไป คำตอบที่แสดงการเลือกทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานทางเลือกใดแสดงว่าทางเลือกนั้นเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดกับแผนงานโครงการ

3.3.3 การคำนวณแผนงานโครงการ

การคำนวณแผนงานโครงการ แบ่งเป็นส่วนการคำนวณค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง 3 ส่วน ได้แก่ 1.ส่วนค่าเวลาของกิจกรรม 2.ส่วนค่าระดับการจัดสรรทรัพยากรดำเนินงาน และ 3.ส่วนค่ากระแสเงินสด มีรายละเอียดดังนี้

1.ส่วนค่าเวลาของกิจกรรม แบ่งเป็นส่วนแสดงค่าเวลาที่สำคัญของกิจกรรม 6 ค่าได้แก่ ES, EF, LS, LF, TF, และ FF นอกจากนี้ยังมีค่าเวลาที่เพิ่มขึ้นมาอีก 1 ค่าคือ ST (Start time) ซึ่งเป็นเวลาเริ่มของกิจกรรมที่เลื่อนมาจาก ES ดังสมการที่ (3.1) รวมทั้งยังมีส่วนแสดงบาร์ชาร์ตตามค่าเวลาอย่างเร็วที่คำนวณได้ การคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมเป็นพื้นฐานของการทำแผนงานโครงการก่อสร้าง ด้วยการใช้วิธีคำนวณแบบ CPM (Critical Path Method) จากสมการเงื่อนไขความสัมพันธ์เชิงเวลาในสมการที่ (1.4) ถึง (1.9) ส่วนการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมนี้จะเป็นการแสดงผลการคำนวณที่อ้างอิงจากข้อมูลนำเข้าและชุดคำตอบที่เป็นไปได้

Activity	CPM								Act.	Project Time																							
	Shift	ES	ST	EF	LS	LF	FF	TF		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
A	0	0	0	1	2	3	0	2	A	2								3									100								
B	0	0	0	2	0	2	0	0	B	3	3							4	4								105	105							
C	0	2	2	3	4	5	2	2	C			4								6									110						
D	0	1	1	2	4	5	3	3	D		3								3									105						
E	0	2	2	5	2	5	0	0	E			5	5	5						6	6	6							115	115	115				
F	0	1	1	3	3	5	2	2	F		4	4							3	3								105	105						
r_t										5	10	13	5	5	0	0	0	7	10	15	6	6	0	0	0	78.0	205.0	315.0	330.0	115.0	115.0	0.0	0.0	0.0	Cash Out
$Abs(r_t-r_{t+1})$										5	3	8	0	0	0	0	0	3	5	9	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-80.6	0.0	0.0	pay back
$Max(r_1,r_2,..,r_t)$										5	10	13	13	13	13	13	13	7	10	15	15	15	15	15	15	161.2	0.0	306.0	470.1	492.6	171.7	171.7	0.0	0.0	Payment
$Max(r_t,r_{t+1},..,r_T)$										13	13	13	5	5	0	0	0	15	15	15	6	6	0	0	0	0.0	0.0	-15.3	-23.5	-24.6	-8.6	-8.6	0.0	0.0	Retainage
$Abs(r_t - Min(Max(r_1,r_2,..,r_t), Max(r_t,r_{t+1},..,r_T)))$										0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	161.2	0.0	290.7	446.6	468.0	163.1	82.5	0.0	0.0	Cash In
																										0.0	-1.0	-3.5	-3.8	-1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	Interest
																										-78.0	-122.8	-441.3	-484.4	-154.0	198.9	362.0	444.6	444.6	Overdraft
																										83.2	-122.8	-150.6	-37.8	313.9	362.0	444.6	444.6	444.6	Net balance

รูปที่ 3.9 ส่วนการคำนวณแผนงานโครงการ

ส่วนแสดงบาร์ชาร์ต จะนำค่าเวลา ST และ EF ที่คำนวณได้มาแสดงบาร์ของแต่ละกิจกรรมโดยการอ้างอิงกับวันที่ของโครงการ (Project date) พร้อมทั้งแสดงค่าจำนวนทรัพยากรที่ต้องใช้ต่อวันด้วยอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปข้างบน

2.ส่วนค่าระดับการจัดสรรทรัพยากรดำเนินงาน แบ่งเป็นส่วนแสดงค่าระดับการจัดสรรทรัพยากรดำเนินงานแต่ละประเภทแยกจากกัน ในกรณีนี้คือ R1 และ R2 และระดับการจัดสรรของแต่ละประเภทนี้ยังนำไปคำนวณต่อไปเป็นลำดับเพื่อหาค่าดัชนีความผันผวน MRD, RRH, และ RID ในที่สุดนั่นเอง

3.ส่วนค่ากระแสเงินสด เป็นการคำนวณกระแสเงินสดตามเงื่อนไขทางการเงินที่ป้อนข้อมูลนำเข้าไว้แล้ว กระแสเงินสดของโครงการจะถูกคำนวณเป็นลำดับขั้น เริ่มจากกระแสเงินสดออกที่แปรผันโดยตรงกับต้นทุนทางตรงของกิจกรรม จากนั้นเป็นกระแสเงินสดเข้าที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขต่างๆที่กำหนด และสุดท้ายจึงนำผลกระแสเงินสดออกและเข้ามารวมกันเป็นกระแสเงินสดรวมของโครงการตามช่วงเวลาต่างๆ พร้อมกับการคิดดอกเบี้ยที่อัตราดอกเบี้ยต่างๆที่กำหนด

3.3.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้เป็นแบบ Multi-objective ดังสมการที่ (3.3) ประกอบไปด้วยค่า RRH, RID, และ TC โดยที่กลุ่มค่าดัชนีความผันผวนของทรัพยากรมักมีพื้นฐานการคำนวณอ้างอิงจากค่า r_t หรือค่าผลรวมความต้องการใช้ทรัพยากรต่อหน่วยเวลา การสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Multi-objective กำหนดให้ใช้ผลรวมแบบถ่วงน้ำหนัก โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนักแต่ละค่า ($\boldsymbol{w_1}$, $\boldsymbol{w_2}$, และ $\boldsymbol{w_3}$) จะกำหนดใช้ตามความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย ซึ่งหากต้องการให้วัตถุประสงค์ย่อยใดมีความสำคัญมากกว่าอันที่เหลือจะต้องกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อยนั้นมีค่ามากๆ หรือในทางกลับกันด้วย เพราะจะทำให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัตถุประสงค์ย่อยนั้นมีนัยยะสำคัญมากขึ้น

นอกจากนี้ยังใช้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อการปรับขนาดสเกลตัวเลขของค่าวัตถุประสงค์ย่อยต่างๆ ให้สมดุลกัน เช่น ค่า TC จะมีขนาดตัวเลขในหลักร้อย (เป็นการทอนหน่วยจาก $\$10^4$ เป็น หลักร้อย) ซึ่งมากกว่าค่า RRH และ RID ที่มีขนาดตัวเลขใกล้เคียงกันในหลักสิบเท่านั้น ดังนั้นค่าถ่วงน้ำหนัก $\boldsymbol{w_1}$, $\boldsymbol{w_2}$, และ $\boldsymbol{w_3}$ ในเบื้องต้นเพื่อการปรับขนาดสเกลของตัวเลขเท่านั้นควรเป็น 2, 10, และ 1 ตามลำดับ โดยยังไม่ได้ปรับการถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญ

การ Optimization ของโมเดลปัญหาที่สร้างขึ้นนี้ จะเป็นการ Minimization ของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

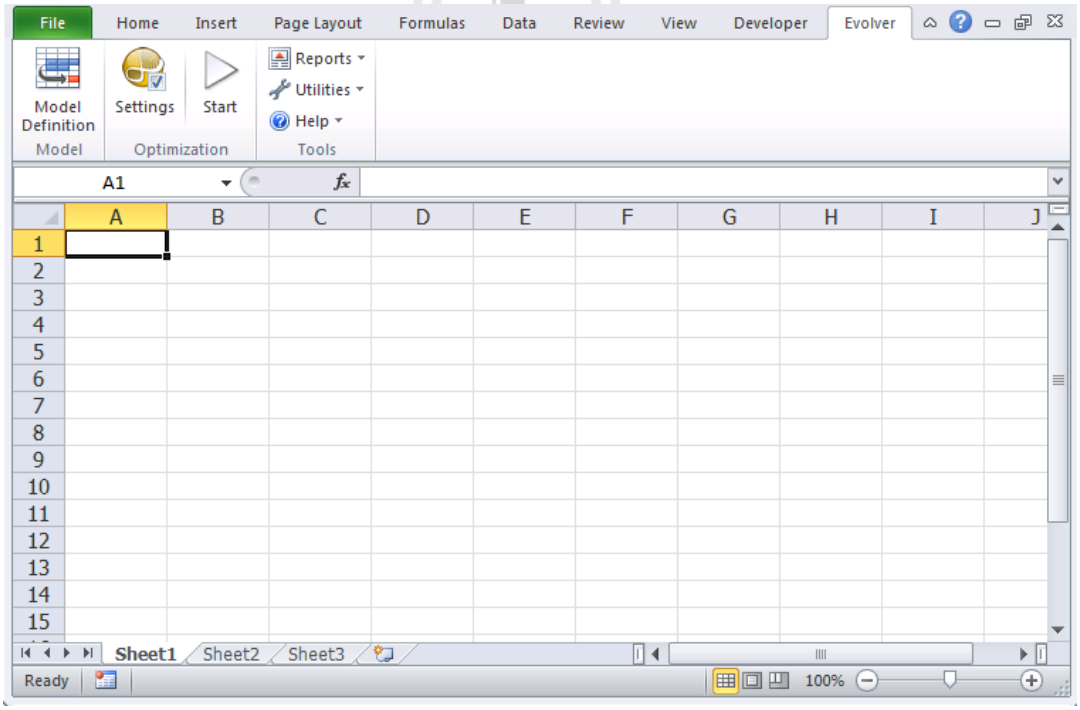
	V	W	X	Y	Z	AA
25				R1	R2	W
26			RRH	26	30	2
27			RID	0	0	10
28		Total Cost		134.9		1
29		Objective function				246.9

รูปที่ 3.10 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

3.4 วิธีการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ

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

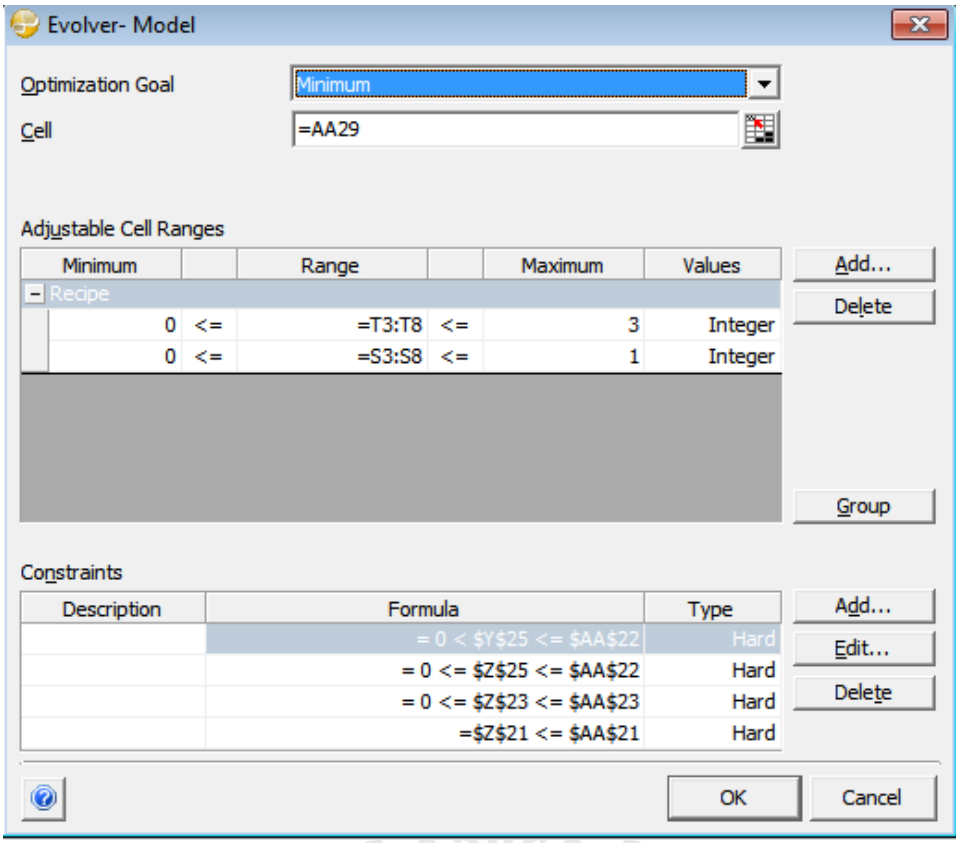
รูปที่ 3.11 หน้าต่างแสดงโปรแกรม Evolver ของ Palisade Corp.



รูปที่ 3.12 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว

ขั้นตอนการใช้งาน Evolver คล้ายคลึงกับโปรแกรม Solver คือเริ่มจากการกำหนดส่วนประกอบหลักของโมเดลซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปรตัดสินใจ และฟังก์ชันข้อจำกัด หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าของโมเดลทั้ง 3 ส่วนนี้แสดงดังในรูปข้างล่าง

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถกำหนดได้ว่าเป็น Optimization แบบการMinimization หรือ Maximization และโดยการกำหนดเซลที่จะใช้คำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.13 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของโมเดล

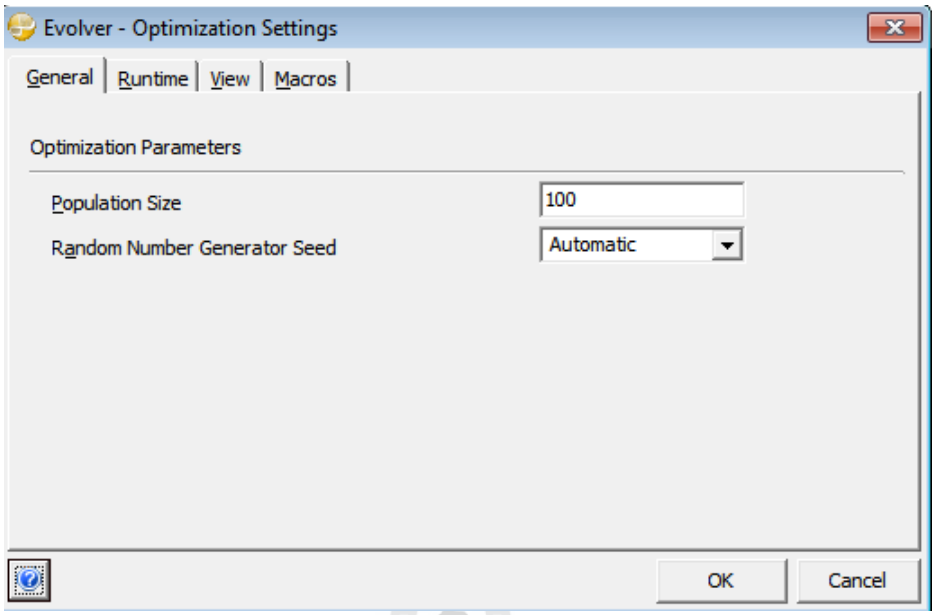
ตัวแปรตัดสินใจกำหนดให้เป็นกลุ่มเซลที่เรียกว่า Adjustable Cell Ranges ซึ่งโปรแกรม Evolver จะบังคับให้กำหนดขอบเขตบนและล่างของค่าตัวแปรตัดสินใจต่าง ๆทั้งหมดด้วย นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของค่าตัวแปรเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริงก็ได้

ฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถป้อนข้อมูลแบ่งเป็นชุด ๆตามต้องการได้ โดยอ้างอิงไปที่กลุ่มเซลที่มีสูตรฟังก์ชันข้อจำกัดที่ต้องการ จากนั้นกำหนดขอบเขตบนและล่างที่เหมาะสม ทั้งนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นแบบ Soft หรือ Hard constraints ก็ได้

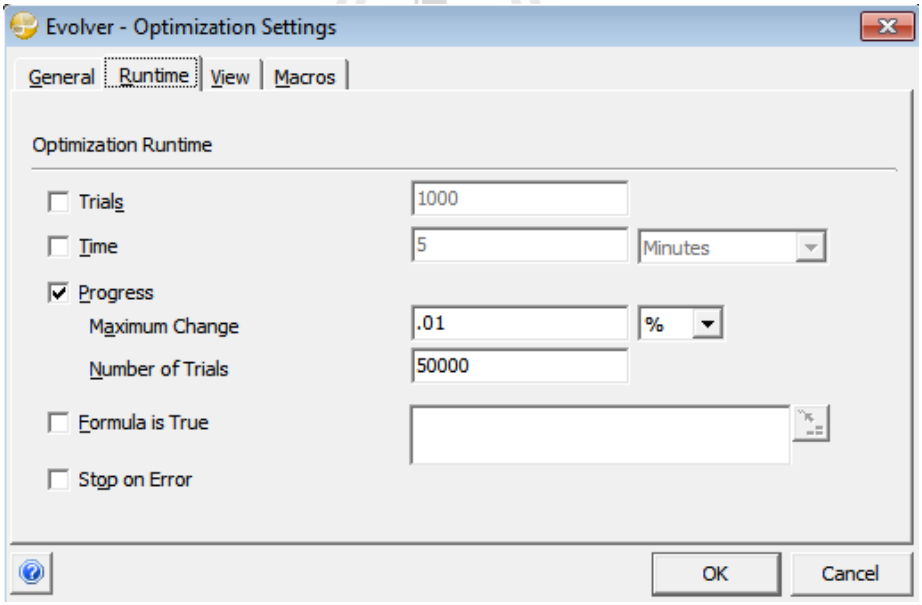
หลังจากที่ได้กำหนดส่วนประกอบหลักของโมเดลเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GAs ที่จะใช้ในการหาคำตอบ ได้แก่ ค่า Population size, Random seed, Crossover rate, Mutation rate และเงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime)

ค่า Population Size จะเป็นตัวกำหนดความหลากหลายของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ในแต่ละรุ่นประชากร ค่า Random Number Generator Seed เป็นวิธีการหาตัวเลขสุ่มที่ต้องใช้ในการหาคำตอบ ค่า Crossover rate และ Mutation rate เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมปฏิบัติการทางพันธุกรรม ในกระบวนการวิวัฒนาการของ GAs รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถบังคับความพยายามในการค้นหาคำตอบให้เป็นไปตามต้องการได้อีกด้วย

เงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) สามารถเลือกใช้ได้หลายลักษณะได้แก่ การกำหนดจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ที่ถูกพิจารณา (Trials) การกำหนดระยะเวลาของการค้นหา หรือการกำหนดเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงของคำตอบที่ดีขึ้นภายในจำนวน Trials ที่กำหนด



รูปที่ 3.14 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size ของ GAs



รูปที่ 3.15 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการจบ Runtime

จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GAs ที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการหาคำตอบของโมเดลต่อไป ได้ค่าที่เหมาะสมดังนี้ Population Size = 100; Random Number Generator Seed = Automatic; Crossover rate = 0.5; Mutation rate = 0.1

เงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) ที่เหมาะสมกำหนดให้ใช้เป็นเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงที่ดีขึ้นของคำตอบ = 0.01% ภายในจำนวน Trials = 20,000 (อย่างไรก็ตามภายหลัง เมื่อทดสอบกับขีดจำกัดของ Constraints ของโมเดล ได้ปรับจำนวน Trials เป็น = 50,000 เนื่องจากต้องการให้เกิดความพยายามในการหาคำตอบมากขึ้น)

3.5 การทดสอบ

โมเดลที่สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบกับโจทย์ปัญหาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Liu and Wang (2008) ที่ก็ได้อ้างอิงโจทย์ข้อมูลโครงการก่อสร้างมาจากงานวิจัยของ Elazouni and Metwally (2005) ทั้งนี้เพื่อการอ้างอิงเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพที่ชัดเจน ความจำเป็นอีกประการคือข้อมูลโครงการก่อสร้างที่สำรวจเก็บได้จากบริษัทก่อสร้างในประเทศ (เป็นทั้งบริษัทก่อสร้างสัญชาติไทยและสัญชาติต่างประเทศ) มักไม่ครบถ้วนตามที่ต้องการ หรือบริษัทไม่อนุญาติให้ข้อมูลแก่คณะวิจัย โดยเฉพาะข้อมูลโครงการที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนและกระแสเงินสด อย่างไรก็ตามจากการสำรวจพบว่าบริษัทก่อสร้างสัญชาติต่างประเทศจัดเตรียมข้อมูลโครงการสำหรับการวางแผนอย่างละเอียด ซึ่งสามารถนำมาใช้กับโมเดลปัญหาได้

โจทย์ปัญหาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Liu and Wang (2008) จึงเป็นข้อมูลโครงการก่อสร้างที่ถูกเลือกใช้ในการวิจัยนี้ โดยต้องปรับปรุงเพิ่มเติมข้อมูลบางส่วนให้เหมาะสมกับความต้องการของโมเดลปัญหา ICRPSP ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ดังต่อไปนี้

1. โครงการก่อสร้างประกอบด้วยกิจกรรมทั้งหมด 10 กิจกรรม เพิ่มเติมกิจกรรมใหม่อีก 4 กิจกรรมจากเดิมที่มี 6 กิจกรรม ทั้งนี้เพื่อให้โมเดลปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นและซับซ้อนขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากโจทย์ปัญหาเดิมของ Liu and Wang (2008) มีความเรียบง่ายเกินไป มีความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม กิจกรรมเดิมทั้ง 6 กิจกรรมกำหนดให้มีข้อมูลอื่นๆ ดังเดิม

2. ให้มีทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานของแต่ละกิจกรรมไม่เกิน 2 ทางเลือก

3. ให้มีทรัพยากรดำเนินงานทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ Resource 1 และ 2

4. ให้มีเงื่อนไขทางการเงินและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระแสเงินสดเหมือนเดิม

ดังแสดงตารางในรูปที่ 3.16 ถึง 3.18 ข้างล่าง

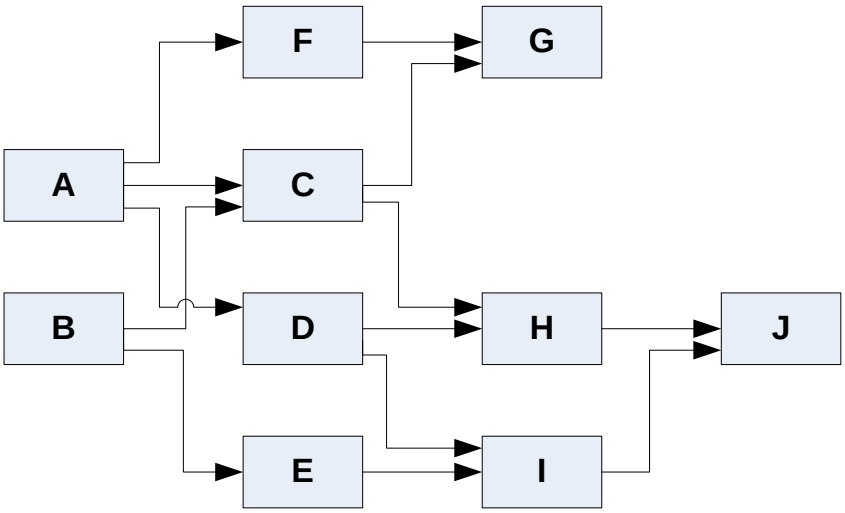
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Activity	Predecessors			Option 1 (Normal mode)				
				Res. 1	Res. 2	DC/mth	Paymt/mth	Dur.(mth)
A	-			2	3	100.0	149.3	1
B	-			3	4	105.0	156.7	2
C	A	B		3	5	45.0	82.1	2
D	A			3	3	105.0	156.7	1
E	B			5	6	115.0	171.7	3
F	A			3	2	63.3	104.5	3
G	C	F		5	4	55.0	99.5	6
H	C	D		3	4	97.0	134.3	4
I	D	E		6	4	95.0	141.8	3
J	H	I		5	6	110.0	164.2	2
Activity	Successors			Option 2 (Crashing mode)				
				Res. 1	Res. 2	DC/mth	Paymt/mth	Dur.(mth)
A	C	D	F	2	3	100.0	149.3	1
B	C	E		5	8	250.0	313.5	1
C	G	H		4	6	110.0	164.2	1
D	H	I		3	3	105.0	156.7	1
E	I			4	4	192.5	257.5	2
F	G			4	3	105.0	156.7	2
G	-			7	6	100.0	149.3	4
H	J			5	5	120.0	179.1	3
I	J			5	3	140.0	212.7	2
J	-			7	7	235.0	328.4	1

รูปที่ 3.16 ตารางข้อมูลโจทย์ปัญหาโครงการตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

Financial Conditions		
Tax	3.9	/mth
Overhead	32.4	/mth
Advance Payment	10%	< pay back at the end
Retainage	5%	< get back 1 mth. aft. Completion
Interest rate	0.80%	/mth
Unused credit on Overdraft	0.20%	/mth
Contract price	3500.4	
Direct cost	2345.0	
Contract price/Direct cost	1.49	

รูปที่ 3.17 ตารางข้อมูลโจทย์ด้านเงื่อนไขทางการเงิน



รูปที่ 3.18 แผนภาพเน็ตเวิร์คของกิจกรรมของโครงการก่อสร้าง

การทดสอบโมเดล ICRPSP แบ่งออกเป็น 5 ประเด็น ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพและขีดจำกัดของโมเดลในด้านต่างๆอย่างครอบคลุม ซึ่งใน 5 ประเด็นนี้จะเกี่ยวข้องกับข้อมูลนำเข้ากลุ่มที่เป็นฟังก์ชันข้อจำกัดที่เป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อคำตอบของโมเดล และรวมถึงปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อคำตอบของโมเดลโดยตรง ได้แก่

1. ผลของคำตอบเริ่มต้น (Initial solution) เนื่องจากวิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms (GAs) ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ เป็นการค้นหาคำตอบแบบสุ่มด้วยหลักการ Stochastic search โดยเริ่มสุ่มคำตอบอื่นๆ จากคำตอบเริ่มต้น ดังนั้นวิธีการหาคำตอบแบบ GAs จึงต้องกำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นก่อนเริ่มค้นหาทุกครั้ง และทำให้คำตอบเริ่มต้นที่กำหนดอาจส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหาในแต่ละครั้ง (Runtime) ประเด็นการทดสอบนี้จึงจะทำให้เข้าใจว่าควรใช้ค่าคำตอบเริ่มต้นอย่างไรเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด โดยจะกำหนดค่าคำตอบเริ่มต้นหลายๆชุดคำตอบที่ต่างกันเพื่อทดสอบทีละชุดแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบนี้ยังสามารถนำมาใช้กับการทดสอบในประเด็นถัดไปที่เหลือได้

2. ผลของข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญาของโครงการ (Contract time) โมเดล ICRPSP เป็นโมเดลปัญหาแบบบูรณาการที่ผสมรวมโมเดลปัญหาการวางแผนหลายรูปแบบเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้ฟังก์ชันข้อจำกัดที่ต้องใช้ประกอบด้วยหลายกลุ่ม ซึ่งได้แก่ ระยะเวลาสัญญาของโครงการ ทรัพยากรดำเนินงาน และวงเงินเครดิต การทดสอบในประเด็นนี้จะทำให้เห็นว่าข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญาของโครงการส่งผลอย่างไรต่อคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ โดยจะกำหนดค่าระยะเวลาเป็นหลายๆค่าเพื่อทดสอบทีละค่าแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน คือกำหนดให้ทดสอบกับค่าระยะเวลาสัญญาของโครงการที่ 8, 9, 10, 11, 12, และ 13 เดือน ทั้งนี้การกำหนดค่าที่ใช้ทดสอบเหล่านี้เป็นผลมาจากการทดสอบในประเด็นที่ 1 ทำให้เห็นว่าคำตอบแผนงานจะต้องการใช้ระยะเวลาโครงการอยู่ระหว่าง 10 ถึง 13 เดือน การกำหนดค่าระยะเวลาที่ใช้ทดสอบจึงเป็นการบีบข้อจำกัดไปในทิศทางที่แคบลงเรื่อยๆ เพื่อดูผลคำตอบที่จะได้

3. ผลของข้อจำกัดด้านจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource limit) เป็นการทดสอบกับข้อจำกัดของโมเดลอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งโมเดล ICRPSP ที่สร้างขึ้นนี้กำหนดให้มีทรัพยากรดำเนินงานได้ 2 ประเภท (R1 และ R2) โดยจะกำหนดค่าจำนวนทรัพยากรดำเนินงานเป็นหลายๆ ค่าเพื่อทดสอบทีละค่าแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน คล้ายกับประเด็นทดสอบที่ 2 ดังนี้ จำนวนทรัพยากรดำเนินงาน R1 และ R2 เท่ากันเท่ากับ 8, 9, และ 10 หน่วย ช่วงค่าที่ทดสอบนี้ได้มาจากการสังเกตผลคำตอบของการทดสอบประเด็นที่ 1 นั่นเอง

4. ผลของข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิต (Credit limit) วงเงินเครดิตก็เป็นข้อจำกัดของโมเดลอีกกลุ่มหนึ่งในจำนวนสามกลุ่มที่มีอยู่ โดยจะกำหนดค่าวงเงินเครดิตเป็น 150, 160, 165, 175, 200, 225, 250, และ 275 เพื่อทดสอบทีละค่าแล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน

5. ผลของการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective function weighting) เนื่องจากโมเดล ICRPSP เป็นโมเดลปัญหาแบบ Multi-objective ที่เกิดจากวัตถุประสงค์ย่อยหลายวัตถุประสงค์รวมเข้าด้วยกัน ได้แก่ ด้านความผันผวนของระดับการใช้ทรัพยากร และด้านต้นทุนรวม โดยคำนวณเป็นค่าดัชนีสำหรับแต่ละวัตถุประสงค์ย่อยดังกล่าว คือ RRH, RID, และ TC การรวมวัตถุประสงค์ย่อยเหล่านี้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักความสำคัญและหาผลรวม (Weighted sum) การกำหนดค่าน้ำหนักถ่วงที่แตกต่างกันในแต่ละวัตถุประสงค์ย่อย ควรจะส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ โดยปกติแล้วหากวัตถุประสงค์ย่อยใดได้ค่าที่ดีก็จะทำให้วัตถุประสงค์ย่อยที่เหลือได้ค่าที่แย่ลง จากสมการที่ 3.3 จะกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ สำหรับวัตถุประสงค์ย่อย $RRH : RID : TC$ ตามลำดับเป็น 2:10:10, 2:10:8, 2:10:6, 2:10:4, 2:10:2, 2:10:1, 2:10:0.500, 2:10:0.250, 2:10:0.167, 2:10:0.125, 2:10:0.100, และ2:10:0.010 ทั้งนี้เป็นการปรับเฉพาะค่า w_3 จากมากไปน้อยในสัดส่วนที่เทียบกับค่า $w_1 : w_2$ ทั้งนี้เพื่อให้การทดสอบครอบคลุมช่วงที่ค่าน้ำหนักที่เป็นไปได้ ทำการทดสอบทีละค่าแล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 5 ข้างล่างนี้สรุปประเด็นการทดสอบโมเดล ICRPSP ทั้งหมดที่ออกแบบไว้ โดยจัดเรียงแบ่งตามกลุ่มประเด็นหลักทั้ง 5 ประเด็น

ตารางที่ 5 ประเด็นการทดสอบโมเดล ICRPSP

ประเด็นทดสอบที่	รายละเอียด	จำนวน Runtime
1. Initial solution		40
1.1 สุ่มคำตอบอย่างง่าย ครั้งที่ 1	โดยการสุ่มเลือกทางเลือกของกิจกรรมต่างๆและให้ค่าเวลาเลื่อนทั้งหมดเป็นศูนย์ (ได้เป็นแผนงานอย่างเร็ว)	10
1.2 สุ่มคำตอบอย่างง่าย ครั้งที่ 2	โดยการสุ่มเลือกทางเลือกของกิจกรรมต่างๆและให้ค่าเวลาเลื่อนทั้งหมดเป็นศูนย์ (ได้เป็นแผนงานอย่างเร็ว) โดยให้ได้ Total score เพิ่มมากขึ้น	10

1.3 สุ่มคำตอบอย่างซับซ้อนครั้งที่ 1	โดยการสุ่มเลือกทางเลือกของกิจกรรมต่างๆ และให้ค่าเวลาเลื่อนทั้งหมดเป็น 1 (ไม่ใช่แผนงานอย่างเร็ว) โดยให้ได้ Total score เพิ่มมากขึ้น	10
1.4 ใช้คำตอบที่ดีที่สุด	โดยใช้คำตอบที่ดีที่สุดที่พบจากการทดสอบทั้ง 3 ชุด	10
2. Contract time		70
2.1.1 ไม่เกิน 8 กับคำตอบเริ่มต้นที่สุ่ม	ใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่ม (สุ่มเลือกทางเลือกของกิจกรรมต่างๆ และให้ค่าเวลาเลื่อนทั้งหมดเป็นศูนย์) โดยไม่ให้มีระยะเวลาโครงการเกินกว่า 8 เดือนที่กำหนด	5
2.1.2 ไม่เกิน 8 กับคำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุด	ใช้คำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุด ที่ได้จาก 2.1.1	5
2.2.1 ไม่เกิน 9 กับคำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุด	ใช้คำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุด ที่ได้จาก 2.1.1 ซึ่งมีระยะเวลาโครงการเท่ากับ 8 เดือน ซึ่งไม่เกิน 9 เดือน	5
2.2.2 ไม่เกิน 9 กับคำตอบเริ่มต้นที่สุ่ม	ใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่มโดยไม่ให้มีระยะเวลาโครงการเกินกว่า 9 เดือนที่กำหนด	5
2.3 ไม่เกิน 10	ใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน (เป็นชุดคำตอบเริ่มต้นที่ใช้กับ 1.1)	20
2.4 ไม่เกิน 11	ใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน (เป็นชุดคำตอบเริ่มต้นที่ใช้กับ 1.1)	10
2.5 ไม่เกิน 12	ใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน (เป็นชุดคำตอบเริ่มต้นที่ใช้กับ 1.1)	10
2.6 ไม่เกิน 13	ใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน (เป็นชุดคำตอบเริ่มต้นที่ใช้กับ 1.1)	10
3. Work resource limit		75
3.1.1 ไม่เกิน 8 กับระยะเวลาไม่เกิน 13	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 8 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 13 และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	10
3.1.2 ไม่เกิน 8 กับระยะเวลาไม่เกิน 15	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 8 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	10
3.1.3 ไม่เกิน 8 กับระยะเวลาไม่เกิน 15 กับคำตอบเริ่มต้นที่สุ่ม	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 8 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 และใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่ม	10
3.2.1 ไม่เกิน 9 กับระยะเวลาไม่เกิน 13	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 9 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 13 และใช้คำตอบเริ่มต้น	10

	มาตรฐาน	
3.2.2 ไม่เกิน 9 กับ ระยะเวลาไม่เกิน 15	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 9 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	10
3.2.3 ไม่เกิน 9 กับ ระยะเวลาไม่เกิน 15 กับ คำตอบเริ่มต้นที่สุ่มที่ 1	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 9 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 และใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่ม	5
3.2.4 ไม่เกิน 9 กับ ระยะเวลาไม่เกิน 15 กับ คำตอบเริ่มต้นที่สุ่มที่ 2	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 9 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 และใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่ม	5
3.2.5 ไม่เกิน 9 กับ ระยะเวลาไม่เกิน 15 กับ คำตอบเริ่มต้นที่สุ่มที่ 2 และเพิ่มจำนวน trials	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 9 พร้อมกับการสร้างขีดจำกัดด้านระยะเวลาของโครงการไม่เกิน 15 ใช้คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายที่สุ่มชุดเดียวกับ 3.2.4 และปรับเพิ่มจำนวน trials เพื่อสิ้นสุดการค้นหาคำตอบ เป็น 50,000	5
3.3 ไม่เกิน 10	ทรัพยากรประเภท R1, R2 แต่ละประเภทไม่เกิน 10 และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	10
4. Credit limit		90
4.1 ไม่เกิน 150	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$150x10^3$ และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	20
4.2 ไม่เกิน 160	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$160x10^3$	10
4.3 ไม่เกิน 165	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$165x10^3$	10
4.4 ไม่เกิน 175	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$175x10^3$	10
4.5 ไม่เกิน 200	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$200x10^3$	10
4.6 ไม่เกิน 225	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$225x10^3$	10
4.7 ไม่เกิน 250	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$250x10^3$	10
4.8 ไม่เกิน 275	กำหนดให้วงเงินเครดิตไม่เกินกว่า $\$275x10^3$	10
5. Multi-objective function weighting		110
5.1 2:10:2	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:2 และใช้คำตอบเริ่มต้นมาตรฐาน	10

5.2 2:10:4	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:4	10
5.3 2:10:6	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:6	10
5.4 2:10:8	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:8	10
5.5 2:10:10	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:10	10
5.6 2:10:0.500	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.500	10
5.7 2:10:0.250	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.250	10
5.8 2:10:0.167	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.167	10
5.9 2:10:0.125	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.125	10
5.10 2:10:0.100	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.100	10
5.11 2:10:0.010	กำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนัก $w_1 : w_2 : w_3$ = 2:10:0.010	10

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ เริ่มจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาใส่ลงในแผ่นคำนวณที่เป็นพื้นที่ของโมเดลปัญหาในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงเรียกโปรแกรม Evolver เพื่อกำหนดกลุ่มเซลต่างๆที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของโมเดล พร้อมทั้งการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของ GAs ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดให้คำตอบเริ่มต้น (Initial solution) ซึ่งโปรแกรมจะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยเปรียบเทียบการปรับปรุงจากคำตอบเริ่มต้นนี้ โปรแกรมจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบแต่ละครั้ง (runtime) ระหว่าง 5-10 นาที โดยจะการสิ้นสุดการค้นหาเมื่อมีสถานะตรงกับเงื่อนไขการสิ้นสุดที่กำหนดไว้ (เป็นเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงที่ดีขึ้นของคำตอบ = 0.01% ภายในจำนวน Trials = 20,000 อย่างไรก็ตามภายหลัง เมื่อทดสอบกับขีดจำกัดของ Constraints ของโมเดล ได้ปรับจำนวน Trials เป็น = 50,000)

ชุดทดสอบแต่ละชุดจะถูกทดสอบซ้ำหลายๆครั้ง (runtime) จำนวน 5 หรือ 10 ครั้งตามที่เหมาะสม ทั้งนี้พิจารณาจากคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งว่าเหมือนเดิมหรือต่างจากครั้งก่อนหน้าอย่างไร เนื่องจากวิธีการหาคำตอบแบบ GAs ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณและอาจไม่เหมือนกันในแต่ละครั้ง (runtime) จึงจำเป็นต้องทำซ้ำหลายครั้งเพื่อให้มั่นใจกับคำตอบที่ได้

3.6 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดทั้ง 5 ประเด็นแสดงเป็นตารางในภาคผนวก 2 ในที่นี้จะสรุปผลการทดสอบในรูปแบบกราฟเพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละประเด็นดังต่อไปนี้ เพื่อความสะดวกในการอ่านให้เข้าใจได้ง่ายจึงอธิบายผลการวิเคราะห์เป็นข้อๆ

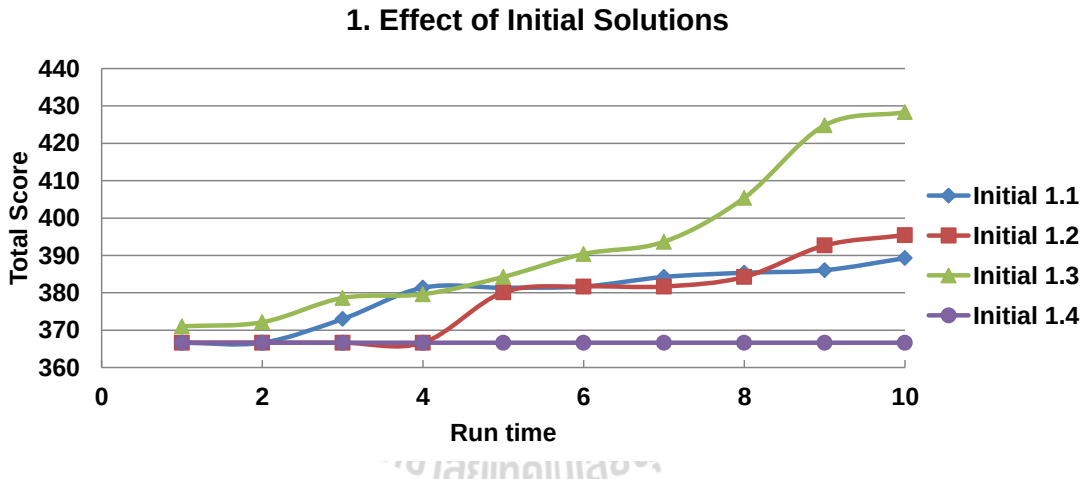
3.6.1 ประเด็นที่ 1 ผลของคำตอบเริ่มต้น (Initial Solutions)

- จากกราฟผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าคำตอบเริ่มต้นที่กำหนดมีผลต่อค่า Total Score (คือค่า Weighted sum ของ Multi-objective function) ที่ได้จากคำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาแต่ละครั้ง โดยจะเห็นว่า

- คำตอบเริ่มต้นอย่างง่ายชุดที่ 1 และ 2 (Initial 1.1 และ 1.2) (ดูตารางที่ 5 ประกอบ) ได้ผลค่า Total Score ที่ดีใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ย

- ในขณะที่คำตอบเริ่มต้นอย่างซับซ้อน (Initial 1.3) กลับให้ผลค่า Total Score ที่แย่กว่าโดยเฉลี่ย

- และคำตอบเริ่มต้นที่กำหนดขึ้นด้วยคำตอบที่ดีที่สุด (Initial 1.4) นั้นไม่สามารถหาคำตอบที่ดีขึ้นกว่าคำตอบเริ่มต้นได้ โดยให้ผลค่า Total Score ที่ดีที่สุดเท่ากับของคำตอบเริ่มต้นทุกครั้ง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่ใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบที่ Optimum



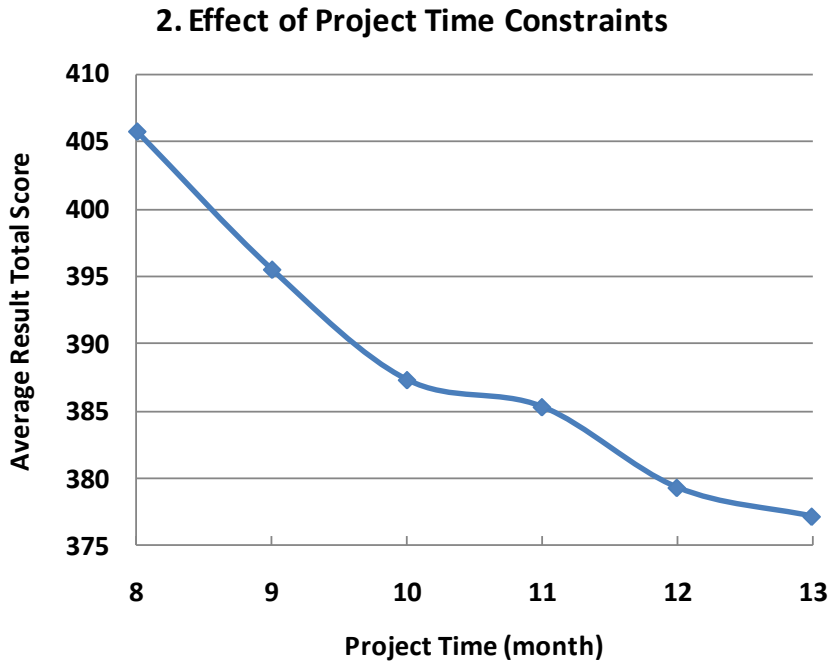
รูปที่ 3.19 แผนภาพ Effect of Initial Solutions ที่มีต่อค่า Total Score

- ดังนั้นการกำหนดคำตอบเริ่มต้นอย่างง่าย หรือแผนงานอย่างเร็ว ช่วยให้การค้นหาคำตอบมีอิสระเพียงพอสำหรับการได้คำตอบที่ดีที่สุด การทดลองในประเด็นต่อๆไปจึงใช้การกำหนดคำตอบเริ่มต้นเป็นแผนงานอย่างเร็วนี้เอง

- การทดลองประเด็นที่ 1 นี้กำหนดค่าที่เป็นฟังก์ชันข้อจำกัดไว้อย่างเกินความต้องการเพื่อให้เกิดสภาพเสมือนไม่มีขอบเขตจำกัดในการหาคำตอบ ได้แก่ วงเงินเครดิต = 600, ระยะเวลาสัญญา = 15, และ MRD = 30 ในขณะที่คำตอบที่ดีที่สุดที่พบมีค่า Max. OD. = 245, PT = 13, และ MRD R1 = 10, MRD R2 = 10

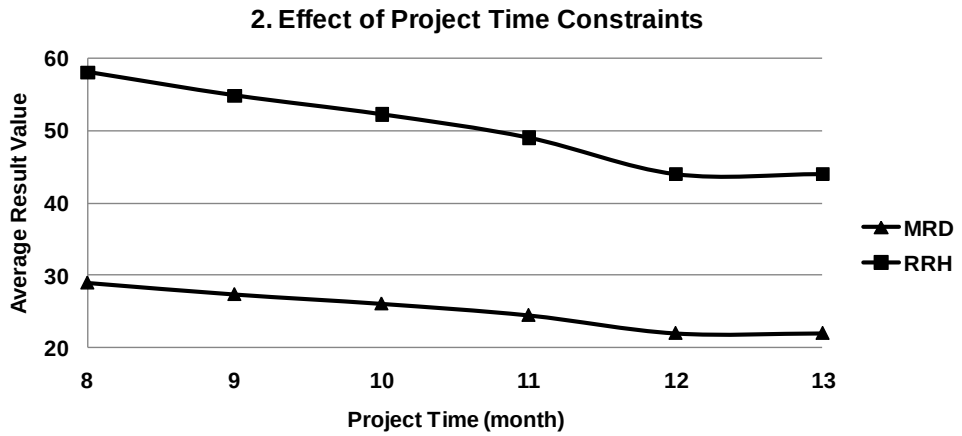
3.6.2 ประเด็นที่ 2 ผลของข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญาของโครงการ (Contract time)

- จากกราฟผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลาสัญญาของโครงการ มีผลต่อค่า Total Score (คือค่า Weighted sum ของ Multi-objective function) โดยเฉลี่ยที่ได้จากคำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาแต่ละครั้ง
- โดยจะเห็นได้ว่า หากระยะเวลาสัญญาของโครงการมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Total Score โดยเฉลี่ยลดลง
- โดยที่ความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในค่าช่วงหนึ่งเท่านั้น (ที่ขึ้นกับโจทย์) สำหรับโจทย์ของการทดลองนี้ได้ว่า หากระยะเวลาสัญญามากกว่า 13 จะไม่ส่งผลต่อค่า Total Score และหากต่ำกว่า 8 จะไม่สามารถหาคำตอบได้
- ซึ่งค่า Total Score ที่ใช้ในการทดลองเป็นค่าที่สะท้อนต้นทุนรวมและประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากรของโครงการ ดังนั้นจึงหมายถึงว่าหากระยะเวลาสัญญาของโครงการมากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนรวมของโครงการลดลง และประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากรของโครงการดีขึ้น ซึ่งเป็นไปในทางที่ต้องการนั่นเอง



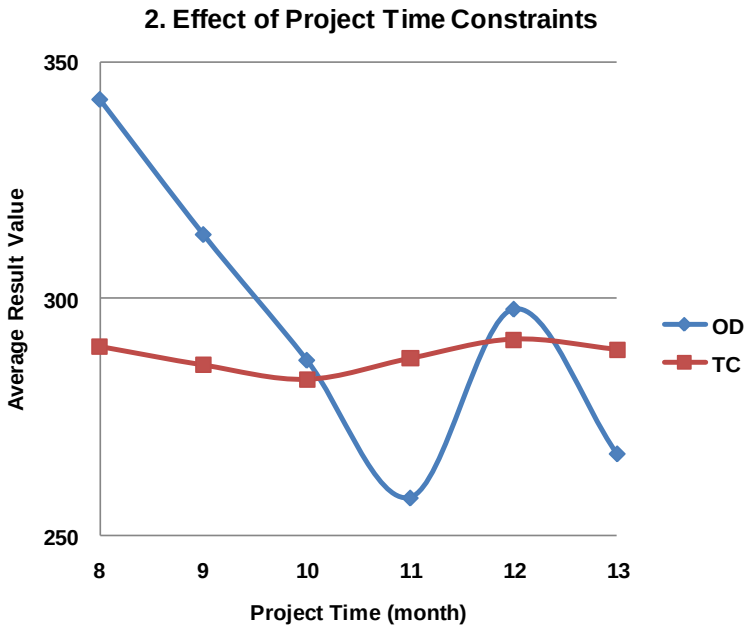
รูปที่ 3.20 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า Total Score

- เมื่อพิจารณาแยกส่วน จะเห็นว่าหากระยะเวลาสัญญาของโครงการมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า MRD (เป็นค่าผลรวมของ R1 และ R2) และ RRH (เป็นค่าผลรวมของ R1 และ R2) โดยเฉลี่ยลดลง ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากรของโครงการดีขึ้น



รูปที่ 3.21 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า MRD และ RRH

- ในขณะที่ หากระยะเวลาสัญญาของโครงการมากขึ้นจะส่งผลให้ ค่า Total Cost แท้จริงแล้ว โดยเฉลี่ยลดลงและเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่า ค่า Total Cost นั้นสัมพันธ์กับระยะเวลาสัญญา ทั้งแปรผันตามและแปรผกผัน เนื่องจากส่วนประกอบที่เป็นต้นทุนทางอ้อมจะแปรผันตาม แต่ต้นทุนทางตรงจะแปรผกผัน แต่เนื่องจากต้นทุนทางตรงมีขนาดมากกว่าจึงทำให้ trend ของกราฟนั้นมี Total Cost ต่ำลง
- ระยะเวลาสัญญาของโครงการดูจะไม่มีความสัมพันธ์กับค่า Max. Overdraft



รูปที่ 3.22 แผนภาพ Effect of Project Time Constraints ที่มีต่อค่า Max.OD.,และ Total Cost

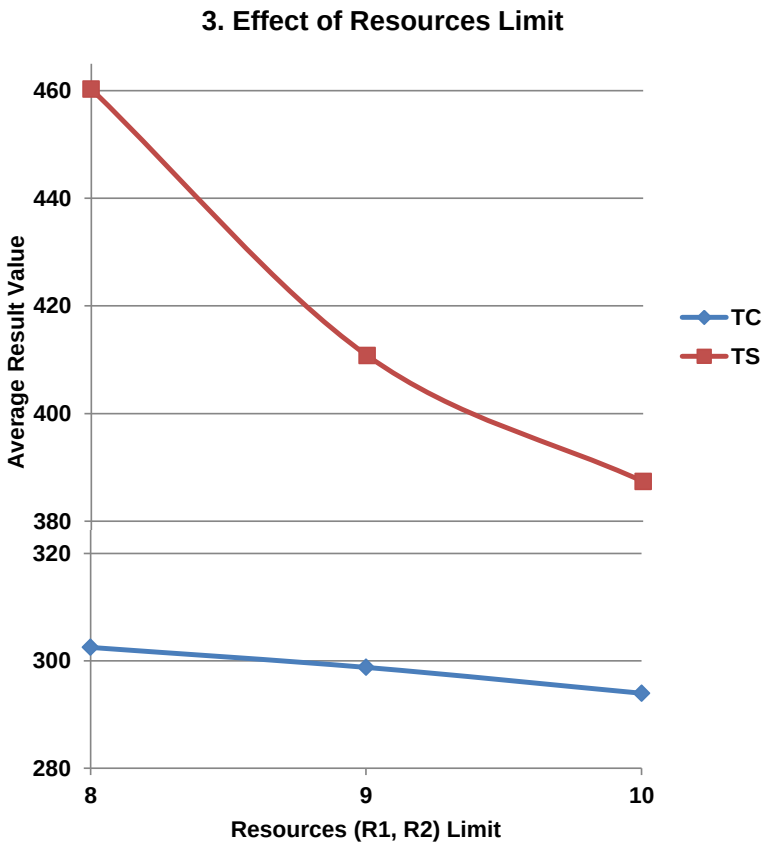
- นอกจากนี้ยังมีผลการทดลองที่สังเกตุผลของคำตอบเริ่มต้นร่วมกับระยะเวลาสัญญาของโครงการ (ประเด็นที่ 2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.2) ได้ผลการทดลองที่ยืนยันว่าคำตอบเริ่มต้นมีผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการค้นหา โดยที่หากเริ่มต้นด้วยคำตอบเริ่มต้นที่

เป็นคำตอบที่ดีอยู่แล้ว จะทำให้ไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้นและสุดท้ายอาจได้คำตอบที่แย่กว่าการเริ่มต้นจากคำตอบเริ่มต้นที่สุ่มแบบอย่างง่าย ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเริ่มคำตอบเริ่มต้นด้วยคำตอบที่ดีจะทำให้การค้นหาติดกับอยู่ในหุบเหวของ Local Optima และไม่สามารถออกจากหุบเหวไปเจอคำตอบที่ดีกว่าได้

3.6.3 ประเด็นที่ 3 ผลของข้อจำกัดด้านจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource limit)

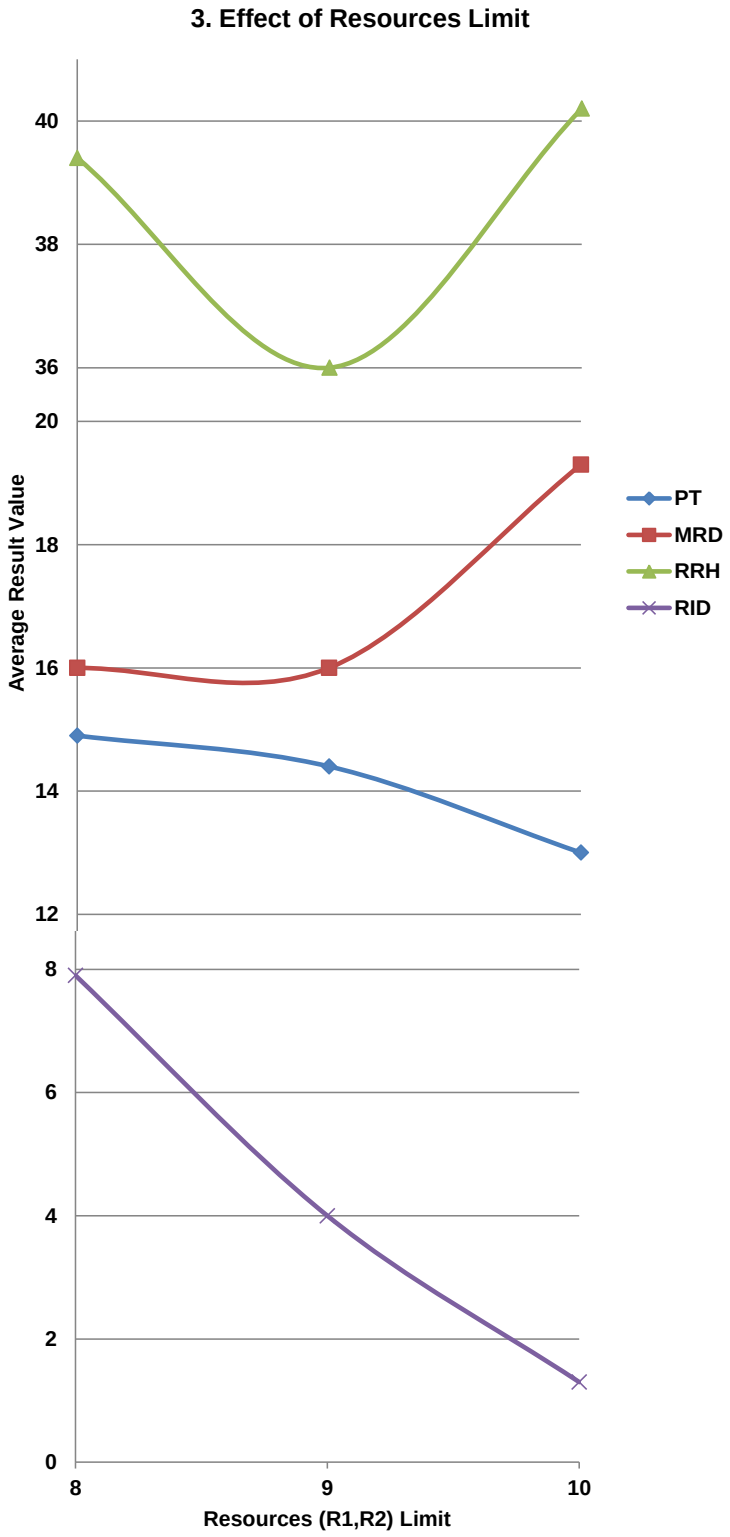
- ผลการทดลองด้านจำนวนทรัพยากร พบว่ามีผลกระทบอยู่ในช่วงค่าแคบๆ คือหากกำหนดค่าจำนวนทรัพยากรต่ำกว่า 10 จะทำให้หาคำตอบได้ยาก อาจได้คำตอบบ้างไม่ได้บ้าง และหากกำหนดค่ามากกว่า 10 ขึ้นไปจะหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เหมือนกัน แต่ใช้จำนวนทรัพยากรเท่ากันเท่ากับ 10
- จากกราฟผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า จำนวนทรัพยากร มีผลต่อค่า Total Score โดยเฉลี่ยที่ได้จากคำตอบที่ดีที่สุดของการค้นหาแต่ละครั้ง
- โดยจะเห็นว่า หากจำนวนทรัพยากรมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Total Score โดยเฉลี่ยลดลง อธิบายได้ว่าการกำหนดจำนวนทรัพยากรน้อยเกินไปทำให้หาคำตอบได้ยาก การกำหนดจำนวนทรัพยากรที่พอเหมาะทำให้มีความยืดหยุ่นในการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ และการกำหนดจำนวนทรัพยากรที่มากเกินความต้องการจะไม่เกิดผลกระทบใด
- หากพิจารณาที่ค่า Total Cost จะเห็นได้ว่าหากจำนวนทรัพยากรมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Total Cost โดยเฉลี่ยลดลงเช่นกัน เหตุผลอธิบายได้เช่นเดียวกันกรณีของค่า Total Score

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.23 แผนภาพ Effect of Resources R1, R2 ที่มีต่อค่า Total Cost และ Total Score

- ส่วนกลุ่มค่าดัชนีความผันผวนของการจัดสรรทรัพยากร MRD, RRH, RID ได้รับผลกระทบโดยตรงต่อจำนวนทรัพยากรที่จำกัด โดยที่หากจำนวนทรัพยากรมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า MRD โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามด้วย
- ที่น่าสนใจคือจำนวนทรัพยากรที่น้อยเกินไปทำให้หาคำตอบที่ดีได้ยากจึงทำให้ค่า RID มีค่าสูง เมื่อจำนวนทรัพยากรมากขึ้นได้คำตอบที่ดีขึ้น ค่า RID โดยเฉลี่ยจึงต่ำลงหรือหมายถึงดีขึ้น ส่งผลอย่างมากต่อค่า Total Score เนื่องจากเป็นค่าที่ถ่วงน้ำหนักมาก
- ส่วนค่า RRH โดยเฉลี่ยมีการปรับลงและขึ้นในช่วงแคบๆ ซึ่งน่าจะอธิบายได้ด้วยจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ที่มีอยู่
- ประเด็นสุดท้าย คือค่า Project Time ที่ปรับลดลงโดยเฉลี่ย เมื่อมีจำนวนทรัพยากรมากขึ้น ซึ่งสมเหตุสมผลกัน



รูปที่ 3.24 แผนภาพ Effect of Resources R1, R2 ที่มีต่อค่า Project Time, MRD, RRH, และ RID

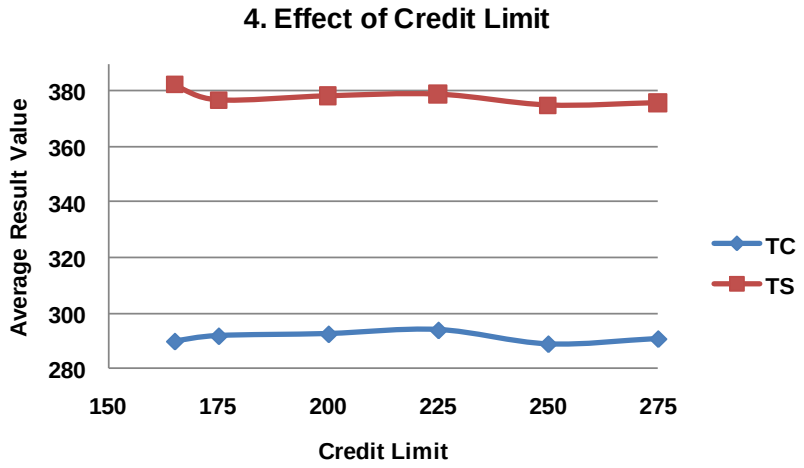
- การทดลองประเด็นที่ 3.1.1, 3.1.2, และ 3.1.3 ที่กำหนดจำนวนทรัพยากรไว้ให้เท่ากับ 8 นั้น ทำให้ได้ผลคำตอบบ้างและไม่ได้คำตอบบ้าง ซึ่งการทดลองเหล่านี้เป็นการทดลองแบบหลายปัจจัยพร้อมกัน
- กล่าวคือประเด็นที่ 3.1.1 หากกำหนดจำนวนทรัพยากร = 8 และระยะเวลาสัญญา = 13 จะทำให้ไม่มีคำตอบ
- แต่หากเพิ่มระยะเวลาสัญญาเป็น = 15 จะทำให้ได้คำตอบบ้างไม่ได้บ้าง
- ส่วนประเด็นที่ 3.1.3 กำหนดจำนวนทรัพยากร = 8 และระยะเวลาสัญญา = 15 พร้อมกับสุ่มคำตอบเริ่มต้นแบบอย่างง่ายใหม่ และเพิ่มจำนวน Trials ในการค้นหา เป็น 50,000 trials จะทำให้ได้คำตอบและเป็นคำตอบที่ดี
- ในทำนองเดียวกัน การทดลองประเด็นที่ 3.2.1 ถึง 3.2.5 กำหนดจำนวนทรัพยากรไว้ให้เท่ากับ 9 นั้น ทำให้ได้ผลคำตอบบ้างและไม่ได้คำตอบบ้าง ซึ่งการทดลองเหล่านี้เป็นการทดลองแบบหลายปัจจัยพร้อมกัน โดยที่
- ประเด็นที่ 3.2.1 กำหนดจำนวนทรัพยากร = 9 และระยะเวลาสัญญา = 13 ได้ผลว่าไม่มีคำตอบ อธิบายได้ในทำนองเดียวกันว่าเป็นการกำหนดข้อจำกัดที่บีบคั้นเกินกว่าจะมีอิสระในการค้นหาคำตอบได้
- ประเด็นที่ 3.2.2 จึงขยายค่าระยะเวลาสัญญา = 15 ทำให้ได้ผลคำตอบบ้างไม่ได้บ้าง
- การทดลองในประเด็นถัดมาคือ ประเด็นที่ 3.2.3 และ 3.2.4 จึงทดลองปรับเปลี่ยนคำตอบเริ่มต้นเป็นแบบอย่างง่ายที่สุ่มขึ้นมาใหม่ครั้งที่ 1 และ 2 ที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งพบว่าสามารถหาคำตอบได้ และได้คำตอบที่ดีที่สุดที่เท่ากันทั้งสองประเด็น
- ประเด็นที่ 3.2.5 ได้ปรับเพิ่มจำนวน Trials ของการค้นหาให้มากขึ้นเป็น 50,000 trials พบว่าทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดบ่อยขึ้น จึงแสดงให้เห็นว่าคำตอบเริ่มต้น จำนวน Trials สำหรับค้นหา เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้
- จากการทดลองประเด็นที่ 3.1.1 ถึง 3.2.5 ทำให้เห็นว่าข้อจำกัดจำนวนทรัพยากรที่ 8 และ 9 นั้นได้สร้างข้อจำกัดอย่างมากในการค้นหาคำตอบ (เกือบจะไม่มีคำตอบที่เป็นไปได้) แต่การปรับแต่งค่าจำนวน Trials และ คำตอบเริ่มต้น จะมีส่วนช่วยให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีในพื้นที่ข้อจำกัดที่แคบได้

3.6.4 ประเด็นที่ 4 ผลของข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิต (Credit limit)

- จากกราฟผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิตมีผลต่อค่า Total Score โดยเฉลี่ยในช่วงแคบๆ มีขนาดของผลกระทบไม่มากนัก โดยจากการพิจารณา

คำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ในแต่ละครั้งพบว่า มีคำตอบที่ได้หลากหลายมาก แต่โดยเฉลี่ยแล้วให้ค่า Total Score ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

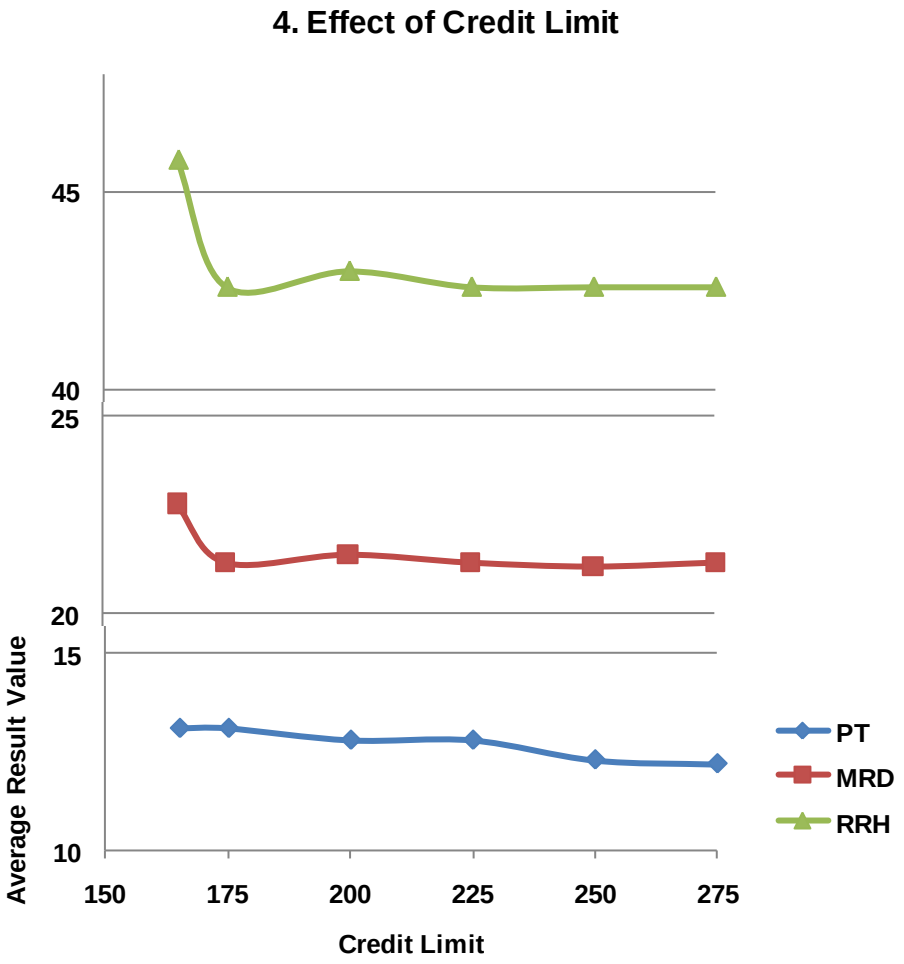
- ลักษณะผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าวงเงินเครดิตที่มีต่อค่า Total Cost คล้ายกับของ Total Score คือ มีขนาดของผลกระทบโดยเฉลี่ยในช่วงแคบๆไม่มากนัก



รูปที่ 3.25 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Total Cost และ Total Score

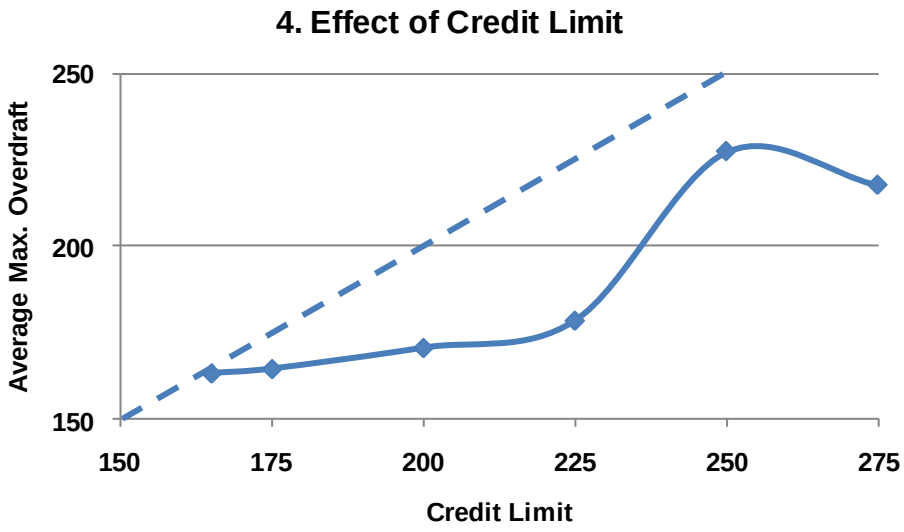
- ส่วนกลุ่มค่าดัชนีความผันผวนของการจัดสรรทรัพยากร MRD และ RRH ได้รับผลกระทบต่อค่าวงเงินเครดิตที่เพิ่มขึ้น ในลักษณะที่คล้ายกันคือทำให้ค่า MRD และ RRH ลดลงโดยเฉลี่ย แต่ทั้งนี้เกิดขึ้นในช่วงแคบๆที่วงเงินเครดิตมีอยู่น้อยจนเกือบจะไม่มีคำตอบที่เป็นไปได้ ซึ่งทำให้หาคำตอบที่ดีได้ยากและทำให้ได้ค่า MRD และ RRH ที่สูง อย่างไรก็ตามเมื่อค่าวงเงินเครดิตมีอย่างเพียงพอแล้ว การเพิ่มค่าขึ้นของวงเงินเครดิตต่อไปก็ไม่มีผลกระทบกับการจัดสรรทรัพยากรมากนัก

- ส่วนค่า Project Time ก็ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของค่าวงเงินเครดิต โดยที่ทำให้ค่า Project Time โดยเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยในช่วง 13 ถึง 12 อธิบายได้ว่าเมื่อวงเงินเครดิตมีอยู่อย่างจำกัด (น้อย) ทำให้ต้องเลือกทางเลือกการดำเนินกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลานานกว่าเพื่อชะลอกระแสเงินออก อย่างไรก็ตามด้วยการใช้ Multi-objective Function จึงทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากจะพิจารณาผลกระทบของหลายปัจจัยร่วมกัน



รูปที่ 3.26 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Project Time, MRD และ RRH

- ผลการทดลองในประเด็นข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิตพบว่า จำนวนวงเงินเครดิตมีผลต่อค่า Max.Overdraft ของคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ โดยที่จำนวนวงเงินเครดิตที่ต่ำเกินไป คือที่ต่ำกว่า 165 จะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้เลย (ประเด็นทดสอบที่ 4.1 และ 4.2 ที่กำหนดให้วงเงินเครดิต = 150 และ 160 ตามลำดับ)
- และจากกราฟข้างล่าง หากวงเงินเครดิตสูงเกินความต้องการ คือสูงกว่า 250 (จนถึง 600) ก็ไม่ส่งผลต่อค่า Max.Overdraft ของคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้

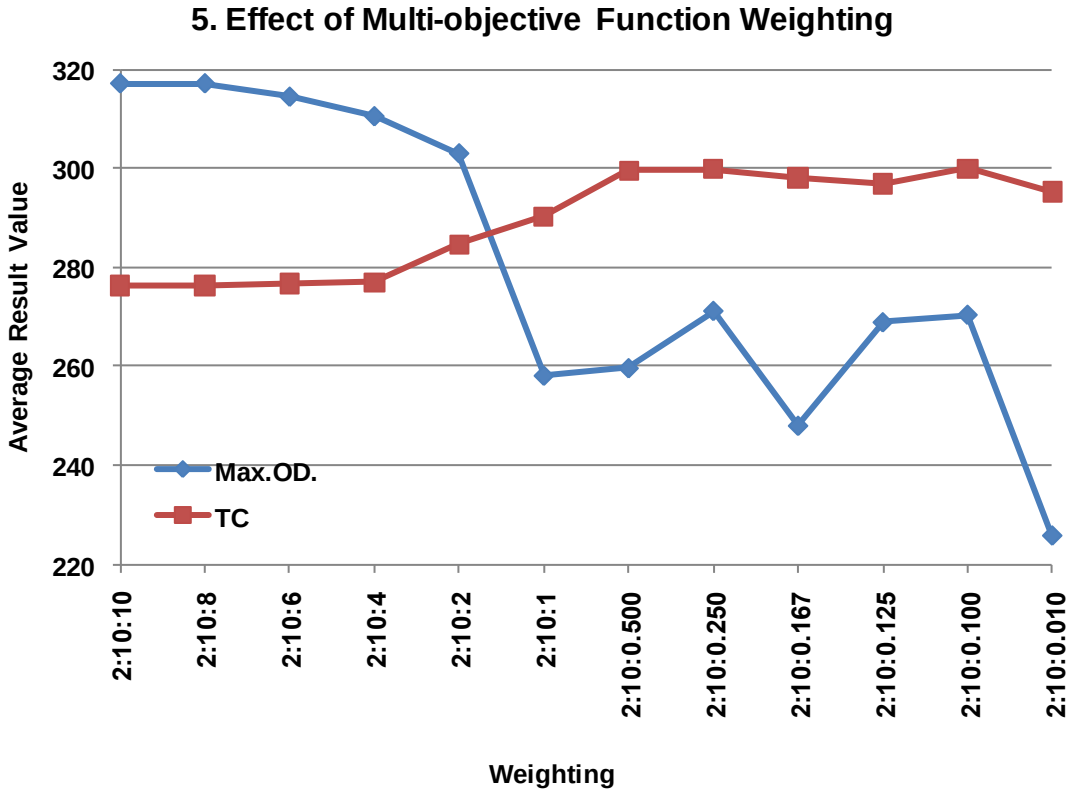


รูปที่ 3.27 แผนภาพ Effect of Credit Limit ที่มีต่อค่า Max.Overdraft

3.6.5 ประเด็นที่ 5 ผลของการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective function weighting)

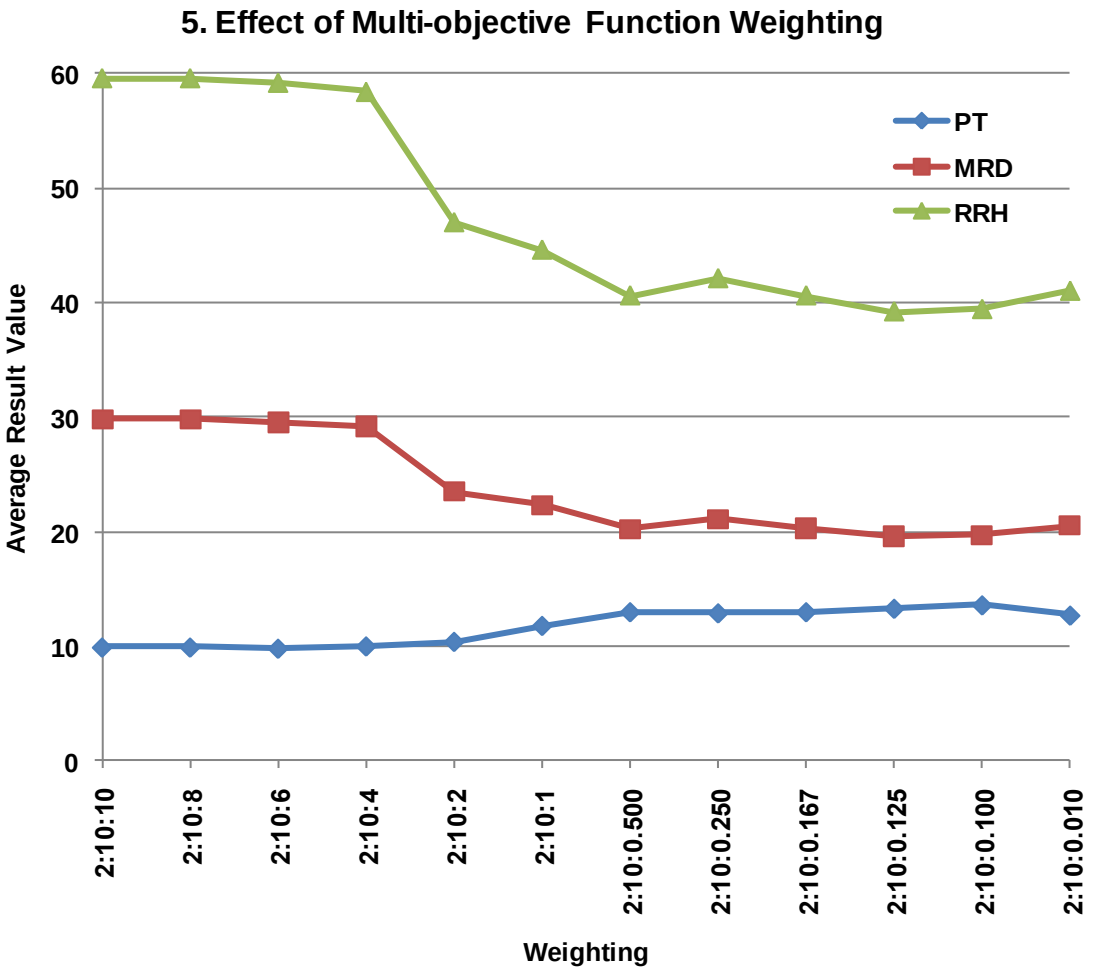
- จากกราฟผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ย่อยมีผลต่อค่า Total Cost, Max. Overdraft, Project Time, MRD, และ RRH โดยเฉลี่ย แต่มีขนาดของผลกระทบไม่มากนัก บางกรณียังคงได้คำตอบที่ดีที่สุดคำตอบเดิม
- ทั้งนี้ไม่ได้พิจารณาค่า Total Score เนื่องจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละประเด็นทดลองทำให้ค่า Total Score ที่ได้ไม่อยู่บนพื้นฐานเดียวกันที่จะเปรียบเทียบกันได้
- เมื่อพิจารณาแยกส่วน จะเห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อย Total Cost จะส่งผลโดยตรงต่อค่า Total Cost โดยเฉลี่ยจากคำตอบที่ได้ โดยที่หากค่าถ่วงน้ำหนักนี้มีค่าความสำคัญ (เมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์ย่อยอื่นๆ) น้อยกว่าจะทำให้ได้คำตอบที่มีค่า Total Cost โดยเฉลี่ยมากขึ้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงแคบๆ จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่า ช่วงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนคือประเด็น 2:10:4 ไปจนถึง 2:10:0.500 ส่วนช่วงนอกจากนี้จะได้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ที่คงที่ในแนวขนาน ทั้งนี้น่าจะขึ้นกับโจทย์ด้วย
- ในทางตรงข้าม หากค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อย Total Cost มีความสำคัญน้อยลงจะทำให้ค่า Max. Overdraft โดยเฉลี่ยที่ได้จากคำตอบมีค่าลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่า จากการวิเคราะห์ในประเด็นการทดสอบก่อนหน้า พบว่าค่า Max.Overdraft มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับค่า MRD, RRH ซึ่งการลดความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย

Total Cost จะเสมือนกับเพิ่มความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย MRD และ RRH ดังนั้น จึงทำให้ได้ค่า Max.Overdraft ลดลงหรือได้ผลที่ดีขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 3.28 แผนภาพ Effect of Multi-objective function weighting ที่มีต่อค่า Max. Overdraft และ Total Cost

- และ หากค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อย Total Cost มีความสำคัญน้อยลง จะเสมือนกับเพิ่มความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย MRD และ RRH ดังนั้นจึงทำให้เห็นผลกระทบต่อค่า MRD และ RRH ค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือ ทำให้ได้ค่า MRD และ RRH ลดลงโดยเฉลี่ยหรือได้ผลที่มีประสิทธิภาพการจัดสรรทรัพยากรดีขึ้นนั่นเอง
- ส่วนความสัมพันธ์กับค่า Project Time นั้นพบว่าหากค่าถ่วงน้ำหนักของวัตถุประสงค์ย่อย Total Cost มีความสำคัญน้อยลงจะทำให้ค่า Project Time เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย ทั้งนี้อธิบายได้ว่า Project Time กับค่า MRD, RRH น่าจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างกันอยู่ เมื่อค่า MRD, RRH ลดลงทำให้ค่า Project Time เพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.29 แผนภาพ Effect of Multi-objective function weighting ที่มีต่อค่า Project Time, MRD, และ RRH

3.7 สรุปผลการพัฒนา

การสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการการบริหารทรัพยากรโครงการ (Integrated Common Resource Project Scheduling Problem: ICRPSP) ขึ้นมาในการวิจัยนี้ เพื่อที่จะได้เครื่องมือใหม่ ที่สามารถวางแผนงานโครงการก่อสร้างอย่างสมบูรณ์รอบด้าน พิจารณาปัจจัยสำคัญต่างๆที่เกี่ยวข้องไปพร้อมกันในคราวเดียว ซึ่งจะทำให้ได้แผนงานที่ประสิทธิภาพดี สมเหตุสมผล สอดคล้องกับสภาพข้อจำกัดจริงของทรัพยากรหลักต่างๆของโครงการ อันได้แก่ เวลา ต้นทุน วัสดุ แรงงาน/เครื่องจักร และเงินสด ซึ่งโมเดลปัญหาการวางแผนงานในงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาไม่ได้พิจารณาทรัพยากรหลักของโครงการเหล่านี้อย่างรอบด้านในคราวเดียวกัน ดังนั้นแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากโมเดล ICRPSP นี้จึงให้แผนงานที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

ขั้นตอนการพัฒนาโมเดล ICRPSP นั้นได้จัดทำขึ้นเป็นลำดับ โดยเริ่มจากการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของโมเดลปัญหาสำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด ทั้งนี้สมการที่สร้างขึ้นจะสะท้อนเงื่อนไข ข้อจำกัด และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของทรัพยากรหลักต่างๆ รวมทั้งสมการที่ใช้ใน

การวัดประสิทธิภาพของแผนงานคำตอบ ที่ใช้ดัชนีหลายอันประกอบกันในการชี้วัดประสิทธิภาพ หลังจากได้สมการแล้วจึงการโปรแกรมลงใน Spreadsheet ที่เลือกใช้คือ Microsoft Excel ได้ผลเป็นไฟล์ที่ใช้คำนวณค่าของโมเดลปัญหาและเพื่อการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครื่องมือสำเร็จรูปคือ Evolver™ ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของโมเดล ICRPSP

การทดสอบโมเดล ICRPSP ที่สร้างขึ้นแล้ว ได้ทดสอบกับโจทย์ของโครงการก่อสร้างตัวอย่างที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยอื่นที่เป็นที่ยอมรับ โดยออกแบบการทดสอบออกเป็น 5 ประเด็น เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อแผนงานคำตอบที่ดีที่สุด ได้แก่ ผลของคำตอบเริ่มต้น ผลของข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญา ผลของข้อจำกัดด้านจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน ผลของข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิต และผลของการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้ผลสรุปดังนี้

คำตอบเริ่มต้นส่งผลต่อแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นหาได้ โดยคำตอบเริ่มต้นควรกำหนดให้เป็นแผนงานอย่างเร็วหรืออย่างง่ายที่มีความยืดหยุ่นในการหาคำตอบที่ดีต่อไป และไม่ควรใช้คำตอบเริ่มต้นเป็นแผนงานที่ดีอยู่แล้ว หรือแผนงานที่ซับซ้อน เพราะจะทำให้ไม่มีความยืดหยุ่นในการหาคำตอบที่ดีกว่าต่อไป และจะทำให้การค้นหาติดกับของใน Local optima

ข้อจำกัดด้านระยะเวลาสัญญา ส่งผลแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นหาได้ โดยที่สัมพันธ์กับโจทย์ปัญหา ซึ่งในแต่ละโจทย์ปัญหาจะมีแผนงานอย่างเร็ว (Earliest start) ที่ให้ค่าระยะเวลาของโครงการอย่างเร็วอยู่แล้ว หากกำหนดค่าระยะเวลาสัญญาน้อยกว่าค่าระยะเวลาของโครงการอย่างเร็ว มากเกินไปจะทำให้ไม่มีคำตอบ แต่หากกำหนดค่าระยะเวลาสัญญามากกว่าค่าระยะเวลาของโครงการอย่างเร็ว มากเกินไปก็จะไม่ส่งผลต่อคำตอบที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้พบว่า ค่าระยะเวลาของโครงการอย่างเร็วเท่ากับ 10 เดือน แต่ค่าระยะเวลาของโครงการของคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับ 13 เดือน จึงแสดงว่าแผนงานที่ดีควรยืดระยะเวลาโครงการจากอย่างเร็วออกไปอีก 3 เดือน

ข้อจำกัดด้านจำนวนทรัพยากรดำเนินงาน ส่งผลแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นหาได้ หากกำหนดค่าจำนวนทรัพยากรต่ำเกินไปจะทำให้ไม่มีคำตอบหรือหาคำตอบที่ดีได้ยาก (ไม่ยืดหยุ่น) อย่างไรก็ตามหากจำนวนทรัพยากรมากเกินความต้องการจะไม่เกิดผลกระทบใด โดยในช่วงที่มีความอ่อนไหว จำนวนทรัพยากรที่มากกว่าจะให้แผนงานคำตอบที่ดีกว่า เนื่องจากทำให้ Total Cost, Project Time, RID ลดลง

ข้อจำกัดด้านวงเงินเครดิต ส่งผลแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นหาได้ โดยจากการพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ในแต่ละครั้งพบว่า มีคำตอบที่ได้หลากหลายไม่ซ้ำกัน โดยที่จำนวนวงเงินเครดิตที่ต่ำเกินไปจะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้เลย และหากจำนวนวงเงินเครดิตสูงเกินความต้องการก็จะไม่ส่งผลต่อแผนงานคำตอบที่ค้นหาได้ นอกจากนี้จำนวนวงเงินเครดิตยังมีผลต่อค่า Max.Overdraft ของคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ โดยหากวงเงินเครดิตมากขึ้นจะทำให้ค่า Max.Overdraft ของคำตอบเพิ่มมากขึ้น (แต่ Total Score ไม่เปลี่ยนแปลงมากนั้น) ทั้งนี้เกิดขึ้นในช่วงที่มีความอ่อนไหว

ค่าถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ส่งผลต่อแผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นหาได้ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งหากพ้นช่วงที่มีความอ่อนไหวแล้วค่าถ่วงน้ำหนักจะไม่มีผลต่อแผนงานคำตอบที่ค้นหาได้ โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนักที่มากหรือให้ความสำคัญมากกับวัถตุประสงค์ย่อยใด จะได้คำตอบที่ให้ค่าวัตถุประสงค์ย่อยนั้นดีขึ้น แต่กลับต้องแลกด้วยค่าวัตถุประสงค์ย่อยที่เหลือแย่ลง

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าโมเดล ICRPSP ที่สร้างขึ้นเพื่อบูรณาการปัจจัยของทรัพยากรหลักทั้งหมดของโครงการ สามารถได้รับผลกระทบจากค่าปัจจัยของทรัพยากรหลักทั้งหมดของโครงการ โดยทำให้ได้แผนงานคำตอบของโมเดลดีหรือไม่ดี และมีคำตอบหรือไม่มีคำตอบได้ ดังนั้นโมเดลนี้จึงสามารถเป็นเครื่องมือช่วยนักวางแผนตัดสินใจกำหนดค่าปัจจัยของทรัพยากรหลักทั้งหมดของโครงการที่เหมาะสมหรือตามจำนวนที่มีอยู่ เพื่อให้ได้แผนงานคำตอบที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพดีขึ้นได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ที่ต้องการพัฒนาเทคนิคการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้าง (Construction scheduling problems) ที่สามารถบูรณาการเงื่อนไขด้านทรัพยากรหลักของโครงการก่อสร้าง (Common project resources) ได้แก่ เวลา ต้นทุน วัสดุ แรงงาน/เครื่องจักร และเงินสด ซึ่งทรัพยากรหลักของโครงการเหล่านี้มีจำนวนอยู่อย่างจำกัด หน้าที่สำคัญของการบริหารโครงการก่อสร้างจึงเป็นการวางแผนและควบคุมการใช้ทรัพยากรหลักเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตามทรัพยากรหลักเหล่านี้มีความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างกันอยู่อย่างซับซ้อนทั้งโดยตรงและโดยอ้อม การเปลี่ยนแปลงของจำนวนทรัพยากรหลักประเภทใดประเภทหนึ่งจะส่งผลต่อความต้องการใช้ทรัพยากรหลักประเภทอื่นๆ ทั้งในลักษณะที่แปรผันตามและแปรผกผัน ดังนั้นการวางแผนการใช้ทรัพยากรหลักเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นงานที่ต้องใช้ทักษะและการคำนวณขั้นสูง บ้างต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงาน

ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากได้มุ่งพัฒนาเทคนิคการโมเดลปัญหาการจัดตารางเวลางานก่อสร้างนี้ แต่อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมที่เป็นงานวิจัยล่าสุดทำให้เห็นว่ายังไม่มีโมเดลการวางแผนใดที่ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างทรัพยากรหลัก โดยมักจะพิจารณาไปที่ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ทรัพยากรหลักคู่ใดคู่หนึ่งเพียงอย่างเดียวเพื่อลดความซับซ้อนของโมเดลลง เช่น โมเดลการแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน โมเดลการจัดสรรทรัพยากร (ดำเนินงาน) แต่เนื่องจากทรัพยากรหลักเหล่านี้มีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ การพิจารณาทรัพยากรหลักเหล่านี้แบบบูรณาการจึงจะเป็นวิธีการที่สมเหตุสมผลและสอดคล้องกับความจริงมากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ได้แผนงานที่ใกล้ความเป็นจริงที่สุด

การวิจัยนี้จึงได้เสนอการสร้างโมเดลปัญหาการวางแผนงานแบบบูรณาการทรัพยากรหลักของโครงการ เรียกว่า Integrated Common Resource Project Scheduling Problem (ICRPSP) และทดสอบโมเดลนี้ เพื่อให้ได้แผนงานก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น โมเดลปัญหาการวางแผนมีลักษณะทั่วไปเป็นปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization problems) จึงส่วนประกอบหลักของโมเดลได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งส่วนประกอบหลักเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปสมการต่างๆทางคณิตศาสตร์ ที่เป็นตัวกำหนดลักษณะคำตอบ ใช้ประเมินผลคำตอบ และใช้สร้างขอบเขตจำกัดของคำตอบที่ต้องการ

เนื่องจาก ICRPSP เป็นโมเดลแบบบูรณาการจึงทำให้ ตัวแปรตัดสินใจของโมเดลประกอบด้วยหลายกลุ่มตัวแปร (สองกลุ่มคือ กลุ่มตัวแปรเวลาเลื่อน (Shifting time) ของกิจกรรมใดๆ และกลุ่มการเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงาน (Work resource combinations)) และมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบหลายวัตถุประสงค์ย่อย (Multi-objective functions) เพื่อใช้ชี้วัดเป้าหมาย

หลายด้านพร้อมกัน (สองกลุ่มคือ กลุ่มด้านต้นทุนทั้งหมดของโครงการ (Total project cost: TC) และกลุ่มด้านระดับการจัดสรรทรัพยากร (Resource fluctuation)) นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันข้อจำกัดแบ่งหลายกลุ่มตามประเภทของทรัพยากรหลัก (เวลา ทรัพยากรดำเนินงาน และวงเงินเครดิต) และข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมก่อสร้าง หลักในการสร้างโมเดล ICRPSP นี้ได้มุ่งเน้นไปที่การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรัพยากรหลักแต่ละประเภท เพื่อนำมากำหนดเป็นข้อมูลนำเข้า เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัด

จากนั้นจึงได้พัฒนาโมเดลให้อยู่ในรูปโปรแกรมที่สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก ด้วยการพัฒนาโมเดลบนโปรแกรมสำนักงานพื้นฐาน Microsoft Excel ที่มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลและการคำนวณที่ซับซ้อนได้ นอกจากนี้โปรแกรม Microsoft Excel ยังเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย จึงช่วยให้ผู้ใช้ที่คุ้นเคยกับโปรแกรมนี้อยู่เดิมสามารถเรียนรู้การทำงานกับโมเดล ICRPSP ได้อย่างรวดเร็วนำไปสู่ความสำเร็จในการนำไปใช้งาน รวมถึงการใช้เงินลงทุนกับโปรแกรมนี้ต่ำ

ขั้นตอนการใช้งานโมเดลเพื่อสร้างแผนงานคำตอบที่ดีที่สุด เริ่มจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนโครงการก่อสร้างทั่วไป ทั้งนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้ 1.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านกิจกรรมก่อสร้างเพื่อการสร้างแผนงานอย่างเร็ว (Earliest start schedule) 2.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านเงื่อนไขทางการเงินสำหรับการคำนวณกระแสเงินสด 3.กลุ่มข้อมูลนำเข้าด้านขีดจำกัดของทรัพยากรหลักของโครงการแต่ละประเภทตามจำนวนที่มีอยู่ในโครงการ จากนั้นจึงสั่งให้โปรแกรมคำนวณวนรอบเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) โดยการวิจัยนี้ได้เลือกเอาโปรแกรม Optimization สำเร็จรูปที่ใช้หลักการค้นหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms ซึ่งมีหลักฐานปรากฏชัดเจนว่ามีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งในการค้นหาคำตอบของโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนเช่น ICRPSP นี้ โดยจะใช้พลังการคำนวณของโปรแกรม Excel เพื่อสร้าง Trials จำนวนมากและประเมินคำตอบ แผนงานคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากโมเดลอาจต่างกันจากการค้นหาแต่ละครั้ง (Runtime) เนื่องจากลักษณะการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms ใช้การสุ่มค่าและความน่าจะเป็น ดังนั้นเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีจนเป็นที่น่าพอใจจึงอาใช้จำนวน Trials และ Runtimes ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดจริงๆ

โมเดล ICRPSP ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ได้ถูกนำมาทดสอบกับโจทย์ตัวอย่างโครงการก่อสร้างเพื่อประเมินผลความสำเร็จของโมเดลที่สร้างขึ้น การทดสอบได้ถูกออกแบบไว้หลากหลายด้านเพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโมเดล ซึ่งผลการทดสอบได้ชี้ให้เห็นว่าทรัพยากรหลักประเภทต่างๆของโครงการมีผลต่อแผนงานคำตอบที่ค้นหาได้อย่างซับซ้อน ซึ่ง ICRPSP แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อช่วยการวางแผนและควบคุมโครงการก่อสร้าง โดยจะเป็นเครื่องมือสำหรับประเมินค่าจำนวนทรัพยากรหลักประเภทต่างๆเพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมเท่าที่จำเป็นต้องใช้ได้ ทั้งนี้ทำให้ได้แผนงานก่อสร้างที่จัดสรรการใช้ทรัพยากรหลักต่างๆอย่างมีประสิทธิภาพดีที่สุด นอกจากนี้ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าการพิจารณาวางแผนทรัพยากรหลักเฉพาะที่คู่ใดคู่หนึ่ง เป็นการละเลยผลกระทบที่มีต่อทรัพยากรหลักอื่นที่ไม่ได้ถูกพิจารณาในคราวนั้นได้ แผนงานที่ได้จึงไม่

สมเหตุสมผล ซึ่งไม่เกิดกับแผนงานคำตอบที่ได้จากโมเดล ICRPSP ที่เป็นโมเดลแบบบูรณาการทรัพยากรหลักทั้งหมดของโครงการไว้ด้วยกัน ผลลัพธ์ของการวิจัยนี้จึงทำให้ได้วิธีในการโมเดลปัญหาแผนงานโครงการก่อสร้างเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรโครงการต่างๆและทำให้ได้แผนงานคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อนำไปใช้ควบคุมและดำเนินการโครงการต่อไป

4.2 ข้อจำกัด

ข้อจำกัดของโมเดล ICRPSP ส่วนหนึ่งจะเป็นข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากการพัฒนาโมเดลบนโปรแกรม Spreadsheet การเก็บข้อมูลจะมีขีดความสามารถในการจัดเก็บได้จำกัดตามขนาดของจำนวนแถวและคอลัมน์ของ Worksheet รวมทั้งความเร็วในการประมวลผลข้อมูลอาจลดลงในกรณีที่เก็บข้อมูลจำนวนมาก อย่างไรก็ตามสำหรับโครงการก่อสร้างทั่วไปทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่นำมาทดสอบโมเดลนั้นไม่เกิดปัญหาความเร็วในการประมวลผลแต่อย่างใด อีกทั้งการวางแผนโครงการยังทำเป็นครั้งคราว ไม่ได้ทำอย่างต่อเนื่องตลอด ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการค้นหาแผนงานคำตอบ (run time) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดี เพียงประมาณหนึ่งชั่วโมง จึงเป็นสิ่งที่คุ้มค่ายิ่ง

ข้อจำกัดของโมเดล ICRPSP อีกส่วนคือการจัดเตรียมข้อมูลนำเข้าที่ต้องการใช้ในการหาคำตอบ เนื่องจากโมเดล ICRPSP เป็นโมเดลปัญหาแบบบูรณาการที่พิจารณาปัญหาอย่างรอบด้าน จึงต้องการข้อมูลนำเข้าจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนโครงการโดยทั่วไปอยู่แล้ว จึงมีเพียงข้อมูลนำเข้าที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักที่ต้องการเพิ่มเติม ซึ่งข้อมูลกลุ่มนี้มักอยู่ในตัวของผู้วางแผนที่รับรู้ด้วยสำนึกหรือดุลยพินิจ แต่ไม่ได้แสดงออกมาเป็นรูปธรรมเป็นตัวเลขที่ชัดเจน เช่น จำนวนทรัพยากรดำเนินงานที่ต้องการใช้ ต้นทุนทางอ้อมต่อหน่วยเวลา อัตราผลผลิตของทรัพยากรดำเนินงานประเภทต่างๆ เป็นต้น

ในการสร้างโมเดล ICRPSP ได้จำกัดขนาดของโมเดลไว้ให้เหมาะสม ได้แก่ จำนวนทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากรดำเนินงานที่กำหนดไว้เป็นสองทางเลือก และประเภททรัพยากรดำเนินงานที่กำหนดไว้เป็นสองประเภท เหล่านี้นั้นสามารถปรับขยายเพิ่มเติมให้เหมาะสมได้ไม่ยากด้วยการเพิ่มขนาดของโมเดลให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ โดยที่ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงหลักการที่สำคัญแต่อย่างใด

คำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากโมเดล ICRPSP และทิศทางและความสัมพันธ์ของค่าต่างๆของคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้วิเคราะห์ไว้จากผลการทดสอบ อาจขึ้นอยู่กับตัวโจทย์ปัญหาอย่างมาก จึงไม่อาจใช้บทสรุปที่ได้อธิบายไว้เป็นบทสรุปทั่วไปสำหรับทุกโจทย์ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ ทิศทางและความสัมพันธ์ของค่าต่างๆที่เกี่ยวข้อง ควรเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล

4.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปคือ โมเดลปัญหาการวางแผนงานแบบบูรณาการ เช่น โมเดล ICRPSP ไม่ได้เป็นโมเดลที่สมบูรณ์แบบที่สุด โดยการวางแผนทุกวิธีก็ยังคงต้องมีสมมติฐานเป็น

พื้นฐานในการพิจารณากับปัญหา ดังนั้น ICRPSP จึงคงใช้ได้กับในกรณีที่เป็นไปตามสมมติฐานของโมเดลเท่านั้น โดยเฉพาะลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรหลักของโครงการต่างๆ และการกำหนดข้อมูลนำเข้าเบื้องต้นของโมเดล โดยการวิจัยต่อไปก็อาจนำข้อสมมติฐานของโมเดล ICRPSP นี้ไปพัฒนาปรับปรุงต่อไป

รูปลักษณ์ของโมเดล ICRPSP นั้นเป็นไปเพื่อการวิจัย ยังคงมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User interface) ที่ไม่สวยงามเหมือนกับโปรแกรมช่วยวางแผนสำเร็จรูปที่มีอยู่ โดยเฉพาะไม่มีส่วนการแสดงผลลัพธ์เป็นรูปกราฟ หรือกราฟฟิคต่างๆ อย่างไรก็ตามการวิจัยต่อไปอาจเลือกที่จะพัฒนาโมเดลการวางแผนบนโปรแกรมช่วยวางแผนสำเร็จรูป เช่น Microsoft Project ก็จะทำให้ได้ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่คุ้นเคย

4.4 ผลลัพธ์

การวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16 จำนวน 2 บทความ และตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ จำนวน 1 บทความ มีรายละเอียดดังนี้

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

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

3. 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.

เอกสารอ้างอิง

วชรภูมิ เบญจโอพาร (2553) การบริหารงานก่อสร้าง, เอกสารประกอบการสอนวิชาการบริหารงานก่อสร้าง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พิมพ์ครั้งที่ 5, 180 หน้า.

Ammar, M.A. and Mohieldin, Y.A. (2002) Resource constraint 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), 154–160.

Chan, W.T., Chua D.K.H., and Kannan G. (1996) Construction Resource Scheduling with Genetic Algorithms, Journal of Construction Engineering and Management, 122(2), 125-132.

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), 1115-24.

Chen, H.L., O'Brien, W.J., and Herbsman, Z.J. (2005) Assessing the accuracy of cash flow models: the significance of payment conditions, Journal of Construction Engineering and Management 131(6), 669-76.

Chen, P.H., and Weng H. (2009) A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling, Automation in Construction, 18(4), 485–498.

Dorigo, M., Maniezzo V., and Colorni A. (1996) Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics, Part B: Cybernetics, 26(1), 29–41.

Elazouni, A. M. and Gab-Allabh, A. (2004) Finance-based scheduling of construction projects using integer programming, Journal of Construction Engineering and Management, 130(1), 15-24.

Elazouni, A. and Metwally, F.G. (2005) Finance-based scheduling: tool to maximize project profit using improved genetic algorithms, Journal of Construction Engineering and Management 131(4), 400-12.

Elazouni, A. and Metwally, F.G. (2007) Expanding Finance-based scheduling to devise overall-optimized project schedules, Journal of Construction Engineering and Management 133(1), 86-90.

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

Ellis, R.D. and Kim, J.L. (2005) Development of a resource scheduling model using optimization, Proceedings of the Construction Research Congress 2005, April 5-7, San Diego, California.

El-Rayes, K., and Jun D.H. (2009) Optimizing resource leveling in construction projects, Journal of Construction Engineering and Management, 135(11), 1172-1180.

Eshtehardian, E., Afshar, A., and Abbasnia, R. (2008) Time-cost optimization: using GA and fuzzy sets theory for uncertainties in cost, Construction Management and Economics 26(7), 679-91.

Feng, C.W., Liu, L., and Burns, S.A. (2000) Stochastic construction time-cost trade-off analysis, Journal of Computing in Civil Engineering, 14, 117.

Gendreau, M. (2002) An Introduction to Tabu Search. http://www.ifi.uio.no/infheur/Bakgrunn/Intro_to_TS_Gendreau.htm.

Glover, F. (1989) Tabu search-part I, ORSA Journal on Computing, 1(3), 190–206.

Glover, F. (1990) Tabu search-part II, ORSA Journal on Computing, 2(1), 4–32.

Glover, F., and Kochenberger, G.A. (2003) Handbook of Metaheuristics, Vol. 57, Boston: Kluwer Academic Publishers.

Harris, R.B. (1978) Precedence and Arrow Networking Techniques for Construction, Wiley.

Hegazy, T. and Ersahin, T. (2001) Simplified spreadsheet solutions II: overall schedule optimization, Journal of Construction Engineering and Management 127(6), 469-75.

Hegazy, T. and Menesi, W. (2008) Delay analysis under multiple baseline updates, Journal of Construction Engineering and Management 134(8), 575-82.

Hegazy, T. and Petzold, K. (2003) Genetic optimization for dynamic project control, Journal of Construction Engineering and Management 129(4), 396-404.

Hegazy, T. (1999) Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms, Journal of Construction Engineering and Management, 125(3), 167-175.

Hillier, F. (2001) Introduction to Operations Research, 7th ed., Boston: McGraw-Hill.

Ibbs, W. and Nguyen, L.D. (2007) Schedule analysis under the effect of resource allocation, Journal of Construction Engineering and Management 133(2), 131-8.

Iyer, K.C. and Jha, K.N. (2006) Critical factors affecting schedule performance: evidence from Indian construction projects, Journal of Construction Engineering and Management 132(8), 871-81.

Kartam, S., Ballard, G. and Ibbs, C.W. (1997) Introducing a new concept and approach to modeling construction, Journal of Construction Engineering and Management 123(1), 89-97.

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., Chen, A.T. and Yang, C.H. (2001) A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off, International Journal of Project Management, 19(1), 47–58.

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), 966-74.

Lorterapong, P., and Moselhi, O. (1996) Project-network analysis using fuzzy sets theory, Journal of Construction Engineering and Management, 122(4), 308-318.

Lu, M. 2003. “Simplified discrete-event simulation approach for construction simulation.” Journal of Construction Engineering and Management 129: 537.

Lu, M., Lam, H.C., and Dai, F. (2008) Resource-constrained critical path analysis based on discrete event simulation and particle swarm optimization, Automation in Construction, 17(6), 670-681.

Merkle, D., Middendorf, M., and Schmeck, H. (2002) Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(4), 333–346.

Moder, J.J., Phillips, C.R., and Davis, E.W. (1983) Project management with CPM, PERT, and precedence diagramming, Van Nostrand Reinhold.

Pan, N.H., Hsaio, P.W., and Chen, K.Y. (2008) A study of project scheduling optimization using Tabu Search algorithm, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 21(7), 1101–1112.

Park, H.K., Han, S.H., and Russell, J.S. (2005) Cash flow forecasting model for general contractors using moving weights of cost categories, Journal of Management in Engineering 21(4), 164-72.

Russell, J.S. (1991) Contractors failure: analysis, Journal of Performance of Constructed Facilities 5(2), 163-80.

Toor, S.R. and Ogunlana, S.O. (2008) Problems causing delays in major construction projects in Thailand, Construction Management and Economics 26(4), 395-408.

Zadeh, L.A. (1965) Fuzzy sets, Information and Control, 8(3), 338-353.

Zhang, H. and Li, H. (2004) Simulation-based optimization for dynamic resource allocation, Automation in Construction, 13(3), 409-20.

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

Zhang, H., Li, X., Li, H., and Huang, F. (2005) Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling, Automation in Construction, 14(3), 393–404.

Zhang, H., Tam, C.M., and Li, H. (2006) Multimode project scheduling based on particle swarm optimization, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21(2), 93-103.

Zheng, D.X.M., and Ng, S.T. (2005) Stochastic time-cost optimization model incorporating fuzzy sets theory and nonreplaceable front, Journal of Construction Engineering and Management, 131(2), 176-186.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก 1

ส่วนข้อมูลทั่วไป

1. ชื่อผู้ให้ข้อมูล .....
2. ตำแหน่ง .....
3. ประสบการณ์ทำงาน .....
4. ชื่อองค์กร .....
5. ที่ตั้งโครงการก่อสร้าง.....
6. ลักษณะงานที่ทำ .....
7. จำนวนบุคลากร .....
8. ระดับมูลค่าของงาน .....

ขั้นตอนด้านการวางแผนงาน

1. ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรมช่วยในการวางแผนงานหรือไม่

    [ ] มี [ ] Primavera

    [ ] Microsoft Project

    [ ] Microsoft Excel

    [ ] ไม่มี

2. ขั้นตอนการจัดการเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินการวางแผนงาน ใช้ข้อมูลจากแหล่งใดบ้าง

    [ ] แบบก่อสร้าง [ ] รายการประกอบแบบ

    [ ] รายการประมาณราคา (BOQ) [ ] สัญญาก่อสร้าง

    [ ] การตรวจสภาพหน้างาน [ ] อื่น.....

3. แบ่งโครงสร้างรายงานออกเป็นส่วนย่อยๆ(WBS) ในขั้นตอนการวางแผนงานหรือไม่

    [ ] มี [ ] มีระบบมาตรฐานในการทำ WBS หรือไม่ อย่างไร

    .....

    [ ] ใช้ BOQในการทำ WBS หรือไม่ อย่างไร

    .....

    [ ] ไม่มี

4. ใช้รหัสของงานกำหนดพื้นที่การทำงานในการวางแผนงานหรือไม่

    [ ] มี โดยการกำหนดจาก.....

    [ ] ไม่มี

5. กำหนดตำแหน่งหน้าที่ความรับผิดชอบของบุคลากรของการวางแผนงาน ในแต่ละหมวดงานหรือไม่

[ ] มี กำหนดอย่างไร.....

[ ] ไม่มี

6. การประมาณระยะเวลาของแต่ละกิจกรรมในโครงการใช้ข้อมูลด้านใดบ้าง

[ ] แบบก่อสร้าง [ ] รายการประกอบแบบ

[ ] ข้อมูลภาคสนาม [ ] โครงสร้างรายงาน (WBS)

[ ] รายการปริมาณงาน (BOQ) [ ] สัญญาก่อสร้าง

[ ] ประสบการณ์การการทำงาน [ ] สถิติข้อมูลโครงการที่ผ่านมา

7. กำหนดความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมอย่างไรบ้าง

แบบปกติ

[ ] FS (Finish to Start) [ ] SS (Start to Start)

[ ] SF (Start to Finish) [ ] FF (Finish to Finish)

แบบพิเศษ

[ ] Overlapping [ ] Delaying

8. ในการวางแผนงานมีการจัดสรรทรัพยากรลงในแต่ละกิจกรรมหรือไม่

[ ] มี อย่างไร.....

กำหนดจำนวนทรัพยากรสูงสุดที่ใช้ได้.....

....

[ ] ไม่มี

9. ในการจัดสรรทรัพยากรมีการปรับระดับการใช้ทรัพยากร(Resource leveling)หรือไม่

[ ] มี โดย [ ] Minimum moment

[ ] Trial and error

[ ] อื่นๆ.....

[ ] ไม่มี

10. ในการวางแผนงานมีการแบ่งแยกต้นทุนของแต่ละกิจกรรมหรือไม่

[ ] มี แบ่งตาม [ ] BOQ

[ ] การประมาณราคาใหม่

[ ] Budget ของโครงการ

[ ] ไม่มี

11. การวางแผนงานมีการคำนึงถึง Cash Flow ของโครงการหรือไม่

[ ] มี อธิบาย.....

[ ] ไม่มี

12. จัดเตรียมแผนงานหลายๆชุด (Scenarios) โดยกำหนดทางเลือกสำหรับวิธีการก่อสร้างของแต่ละกิจกรรมไว้หลายๆวิธี เพื่อนำแผนงานเหล่านี้มาเปรียบเทียบและคัดเลือกแผนที่ดีที่สุดหรือไม่

[ ] มี อธิบาย.....

[ ] ไม่มี

<u>ขั้นตอนการติดตามงาน</u>

13. ในการติดตามข้อมูลการทำงานมีรูปแบบและวิธีการอย่างไร

[ ] บันทึกรายงานการทำงานประจำวัน ความถี่.....

[ ] บันทึกรายงานด้านค่าแรง ความถี่.....

[ ] บันทึกรายงานด้านวัสดุ ความถี่.....

[ ] บันทึกรายงานด้านเครื่องจักร ความถี่.....

[ ] บันทึกรายงานfด้านผู้รับเหมาช่วง ความถี่.....

[ ] อื่นๆ..... ความถี่.....

14. ผู้ให้ข้อมูลผลงานคือใคร

[ ] บันทึกรายงานการทำงานประจำวัน .....

[ ] บันทึกรายงานด้านค่าแรง .....

[ ] บันทึกรายงานด้านวัสดุ .....

[ ] บันทึกรายงานด้านเครื่องจักร .....

[ ] บันทึกรายงานfด้านผู้รับเหมาช่วง .....

15. ติดตามและปรับปรุงความก้าวหน้าในกำหนดเวลาที่วางไว้หรือไม่

[ ] มี อธิบาย.....

[ ] ไม่มี

16. ปัจจัยใดที่ส่งผลกับการปรับปรุงแผนงานหลักมีอะไรบ้าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[ ] เวลาในการลาหยุดของคนงาน ปรับปรุงแผนอย่างไร.....
.....
[ ] มีปริมาณงานลด-เพิ่ม ปรับปรุงแผนอย่างไร.....
.....
[ ] วัสดุเข้าหน้างานไม่ตรงเวลา ปรับปรุงแผนอย่างไร.....
.....
[ ] อุปสรรคของสถานที่ก่อสร้าง ปรับปรุงแผนอย่างไร.....
.....

17. หากแผนงานมีความล่าช้า จะมีวิธีการปรับแก้แผนงานอย่างไร
อธิบาย.....

18. จงเรียงลำดับสิ่งที่ท่านคิดว่ามีผลทำให้แผนงานเกิดความล่าช้า

ลำดับที่ [ ] ทีมงานโครงการ ลำดับที่ [ ] เจ้าของงาน
[ ] ผู้ควบคุมงาน
[ ] ผู้รับเหมาหลัก
[ ] ผู้รับเหมาย่อย
[ ] ผู้ออกแบบ

ลำดับที่ [ ] ปัจจัยภายนอก ลำดับที่ [ ] สภาพอากาศ
[ ] สภาพหน้างาน
[ ] สภาพเศรษฐกิจ
[ ] สภาพการเมืองและกฎหมาย

ลำดับที่ [ ] ปัจจัยภายใน ลำดับที่ [ ] ผู้บริหาร
[ ] หัวหน้างาน
[ ] คนงาน
[ ] เงินทุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก 2

ผลการทดสอบโมเดล

Legend of table matrix	
Initial solution or run-time number	
Sel.1? A	Shift A
Sel.1? B	Shift B
Sel.1? C	Shift C
Sel.1? D	Shift D
Sel.1? E	Shift E
Sel.1? F	Shift F
Sel.1? G	Shift G
Sel.1? H	Shift H
Sel.1? I	Shift I
Sel.1? J	Shift J
Max.Overdraft	Credit Limit
Project time	Contract time
MRD R1	Available R1
MRD R2	Available R2
RRH R1	RRH R2
RID R1	RID R2
Project Cost	Total Score

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials

Initial 1.1		1	best	2	best	3		4		5		6		7		8		9		10	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	3	1	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	1	1	0	0	1	2	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	3	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
385	600	245	600	245	600	239	600	241	600	165	600	277	600	318	600	335	600	258	600	258	600
10	15	13	15	13	15	10	15	14	15	13	15	14	15	9	15	12	15	10	15	10	15
18	30	10	30	10	30	13	30	11	30	11	30	10	30	13	30	13	30	12	30	12	30
17	30	10	30	10	30	12	30	12	30	9	30	10	30	12	30	11	30	11	30	11	30
36	38	20	20	20	20	26	24	22	24	22	18	20	20	26	24	26	22	24	22	24	22
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	287	367	287	367	285	385	297	389	293	373	302	382	284	384	290	386	289	381	289	381

Initial 1.2		1	best	2	best	3		4		5	best	6		7	best	8		9		10	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0
1	0	1	3	1	3	0	0	1	0	1	3	0	0	1	3	0	0	1	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	3	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2	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	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
581	600	245	600	245	600	277	600	242	600	245	600	318	600	245	600	277	600	167	600	387	600
10	15	13	15	13	15	14	15	11	15	13	15	9	15	13	15	14	15	13	15	11	15
13	30	10	30	10	30	10	30	14	30	10	30	13	30	10	30	10	30	10	30	11	30
14	30	10	30	10	30	10	30	13	30	10	30	12	30	10	30	10	30	9	30	10	30
40	38	20	20	20	20	20	20	28	26	20	20	26	24	20	20	20	20	20	20	22	20
13	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
290	656	287	367	287	367	302	382	285	393	287	367	284	384	287	367	302	382	295	395	296	380

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 1.3		1		2		3		4		5		6		7		8		9 best		10	
0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	1	2	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	1	2
1	1	1	0	1	1	1	3	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	2	1	2	0	0	0	3	0	0
0	1	0	2	0	0	1	0	0	2	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	1	1	1	2	0	2	0	2	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0
1	1	1	2	1	2	1	0	0	1	0	0	1	3	1	2	1	3	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	2	0	1	0	2	0	1	0	0	0	3
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
443	600	237	600	167	600	169	600	186	600	172	600	222	600	194	600	164	600	181	600	162	600
13	15	13	15	14	15	13	15	11	15	12	15	15	15	11	15	15	15	13	15	13	15
13	30	13	30	11	30	10	30	12	30	12	30	10	30	11	30	10	30	10	30	10	30
14	30	11	30	9	30	10	30	11	30	11	30	8	30	10	30	11	30	10	30	11	30
67	71	26	22	22	18	20	20	24	24	24	22	26	25	22	20	28	27	20	20	20	22
33	26	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0
300	1166	298	394	300	380	299	379	299	405	298	390	303	425	300	384	298	428	291	371	288	372

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 1.4		1 Invalid		2 Invalid		3 Invalid		4 Invalid		5 Invalid		6 Invalid		7 Invalid		8 Invalid		9 Invalid		10 Invalid	
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	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	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600	245	600
13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15	13	15
10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367	287	367

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.1.1		1 best		2 best		3 best		4 best		Initial 2.1.2		1 Invalid		2 Invalid		3 Invalid		4 Invalid		5 Invalid	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
384	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600	342	600
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
17	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
17	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30	14	30
34	34	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28	30	28
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
283	419	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406	290	406

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.2.1		1 best		2		3		4		5		Initial 2.2.2		1 best		2 best		3 best		4 best	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
342	600	388	600	273	600	273	600	273	600	273	600	385	600	318	600	318	600	318	600	318	600
8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
15	30	13	30	15	30	15	30	15	30	15	30	17	30	13	30	13	30	13	30	13	30
14	30	15	30	13	30	13	30	13	30	13	30	17	30	12	30	12	30	12	30	12	30
30	28	26	30	30	26	30	26	30	26	30	26	34	34	26	24	26	24	26	24	26	24
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
290	406	280	392	289	401	289	401	289	401	289	401	285	421	284	384	284	384	284	384	284	384

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.3		1		2		3		4		5 best		6 best		7 best		8		9		10 best	
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	2	1	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	307	600	242	600	208	600	307	600	318	600	318	600	318	600	239	600	307	600	318	600
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10	9	10	9	10	10	10	10	10	9	10
18	30	14	30	13	30	13	30	14	30	13	30	13	30	13	30	13	30	14	30	13	30
17	30	14	30	14	30	12	30	14	30	12	30	12	30	12	30	12	30	14	30	12	30
36	38	28	28	26	28	26	24	28	28	26	24	26	24	26	24	26	24	28	28	26	24
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	279	391	281	389	288	388	279	391	284	384	284	384	284	384	285	385	279	391	284	384

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.3		11		12 best		13		14		15 best		16		17		18 best		19 best		20 best	
1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	2	1	0	1	1	1	2	1	2	0	1	1	1	1	1
1	0	0	2	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	239	600	318	600	242	600	307	600	318	600	242	600	242	600	318	600	318	600	318	600
10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	9	10	10	10	10	10	9	10	9	10	9	10
18	30	13	30	13	30	13	30	14	30	13	30	13	30	13	30	13	30	13	30	13	30
17	30	12	30	12	30	14	30	14	30	12	30	14	30	14	30	12	30	12	30	12	30
36	38	26	24	26	24	26	28	28	28	26	24	26	28	26	28	26	24	26	24	26	24
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	285	385	284	384	281	389	279	391	284	384	281	389	281	389	284	384	284	384	284	384

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.4		1		2		3		4		5		6		7 best		8		9		10	
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0	1	0	1	3	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	2
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
385	600	318	600	243	600	258	600	242	600	240	600	242	600	317	600	243	600	239	600	239	600
10	11	9	11	10	11	10	11	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	11	10	11
18	30	13	30	12	30	12	30	16	30	13	30	10	30	11	30	14	30	13	30	13	30
17	30	12	30	11	30	11	30	13	30	13	30	10	30	11	30	13	30	12	30	12	30
36	38	26	24	24	22	24	22	32	26	26	26	20	20	22	22	28	26	26	24	26	24
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	284	384	294	386	289	381	281	397	287	391	298	378	286	374	283	391	285	385	285	385
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.5		1		2		3		4 best		5		6		7		8 best		9		10	
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	2	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	3	0	0	1	0	1	0	0	3	1	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
385	600	317	600	272	600	258	600	251	600	335	600	272	600	318	600	251	600	387	600	318	600
10	12	11	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	9	12	12	12	11	12	9	12
18	30	11	30	10	30	12	30	10	30	13	30	10	30	13	30	10	30	11	30	13	30
17	30	11	30	10	30	11	30	10	30	11	30	10	30	12	30	10	30	10	30	12	30
36	38	22	22	20	20	24	22	20	20	26	22	20	20	26	24	20	20	22	20	26	24
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	286	374	302	382	289	381	290	370	290	386	302	382	284	384	290	370	296	380	284	384
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 2.6		1 best		2		3		4		5		6 best		7		8		9		10 best	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3	0	0	1	0	1	0	1	3
1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	2	1	0
1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
0	0	1	1	0	0	1	2	1	0	1	2	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	3	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	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	1	3	0	0	0	0	0	2	0	2	1	3	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
385	600	245	600	318	600	335	600	165	600	335	600	245	600	233	600	258	600	292	600	245	600
10	13	13	13	9	13	12	13	13	13	12	13	13	13	11	13	10	13	12	13	13	13
18	30	10	30	13	30	13	30	11	30	13	30	10	30	12	30	12	30	11	30	10	30
17	30	10	30	12	30	11	30	9	30	11	30	10	30	10	30	11	30	11	30	10	30
36	38	20	20	26	24	26	22	22	18	26	22	20	20	24	20	24	22	22	22	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	287	367	284	384	290	386	293	373	290	386	287	367	296	384	289	381	290	378	287	367

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 3.1.1		1	Invalid	2	Invalid	3	Invalid	4	Invalid	5	Invalid	6	Invalid	7	Invalid	8	Invalid	9	Invalid	10	Invalid
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600
10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13
18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8
17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8	17	8
36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 3.1.2		1	Invalid	2		3	Invalid	4	best	5		6	Invalid	7	Invalid	8	Invalid	9		10	Invalid
1	0	0	1	1	2	1	0	1	1	1	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2
1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0
0	0	1	3	0	1	1	3	1	1	1	2	1	3	0	3	1	2	1	2	0	1
1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	3	0	0
1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1	1	1	1	3	0	2	1	1	1	1	0	2	1	0	1	1
0	0	1	0	0	3	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2
1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
1	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	1	2	1	2	1	3	1	2	1	2
385	600	166	600	321	600	199	600	370	600	248	600	199	600	328	600	330	600	179	600	328	600
10	15	15	15	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
18	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
17	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
36	38	16	24	18	18	16	26	16	18	16	20	16	26	18	24	18	24	16	20	16	26
0	2	0	8	2	2	0	11	0	2	0	4	0	11	1	8	1	9	0	4	0	10
289	457	301	461	309	421	306	500	305	393	304	416	306	500	304	478	308	492	301	413	304	488
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 3.1.3		1		2		3	best	4		5		6	best	7		8		9		10	
1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1
1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	2	1	3	1	2	1	3
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	3	1	1
0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
199	600	199	600	166	600	243	600	199	600	199	600	243	600	249	600	199	600	179	600	199	600
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	15	15	15	15	15	15	15
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
16	26	16	26	16	24	16	20	16	26	16	26	16	20	16	20	16	26	16	20	16	26
0	11	0	11	0	8	0	4	0	11	0	11	0	4	0	4	0	11	0	4	0	11
306	500	306	500	301	461	297	409	306	500	306	500	297	409	300	412	306	500	301	413	306	500

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 3.2.1		1	Invalid	2	Invalid	3	Invalid	4	Invalid	5	Invalid	6	Invalid	7	Invalid	8	Invalid	9	Invalid	10	Invalid
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600	385	600
10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13	10	13
18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9	18	9
17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9
36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 3.2.2		1	best	2	Invalid	3	Invalid	4	Invalid	5		6		7	Invalid	8		9	Invalid	10	Invalid
1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	0
0	0	1	3	0	3	0	1	1	0	1	2	1	2	1	2	0	3	1	2	1	0
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	2	0	1	0	3	0	1	0	1	1	2	1	1	0	1	0	3
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	1	1	2	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	2
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	2	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	0	0	1	3	1	3	1	2
385	600	243	600	251	600	326	600	192	600	249	600	249	600	167	600	242	600	292	600	239	600
10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14	15	14	15	15	15	15	15	15	15	14	15
18	9	8	9	9	9	9	9	9	9	8	9	8	9	8	9	9	9	8	9	9	9
17	9	8	9	9	9	9	9	9	9	8	9	8	9	8	9	9	9	8	9	9	9
36	38	16	20	18	24	18	26	18	26	16	20	16	20	22	24	18	24	18	22	18	26
0	2	0	4	0	7	0	9	0	10	0	4	0	4	6	8	0	7	1	7	0	8
289	457	297	409	306	460	306	484	308	496	300	412	300	412	303	535	299	453	304	464	300	468
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 20,000 trials																					
Initial 3.2.3		1		2		3		4	best	Initial 3.2.4		6		7		8	best	9		10	
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	0	3	0	3	0	3	1	3	1	3	0	3
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	2	0	2	1	1	0	2	0	2
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	1	3	1	3	1	2	1	2	1	3
249	600	249	600	249	600	249	600	243	600	251	600	251	600	251	600	243	600	253	600	251	600
14	15	14	15	14	15	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
8	9	8	9	8	9	8	9	8	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9
8	9	8	9	8	9	8	9	8	9	9	9	9	9	9	9	8	9	9	9	9	9
16	20	16	20	16	20	16	20	16	20	18	24	18	24	18	24	16	20	18	22	18	24
0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	7	0	7	0	7	0	4	0	4	0	7
300	412	300	412	300	412	300	412	297	409	306	460	306	460	306	460	297	409	304	424	306	460

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 3.2.5		1		2 best		3		4 best		5											
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0										
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0										
0	3	1	2	1	3	1	2	1	3	1	2										
1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0										
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0										
0	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1										
1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0										
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
1	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2										
251	600	249	600	243	600	249	600	243	600	249	600										
15	15	14	15	15	15	14	15	15	15	14	15										
9	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9										
9	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9										
18	24	16	20	16	20	16	20	16	20	16	20										
0	7	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4										
306	460	300	412	297	409	300	412	297	409	300	412										
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 3.3		1		2		3		4 best		5		6		7		8		9 best		10	
1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	2	0	1	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1	1	0	1	3	1	1	1	0	1	0	1	0	1	3	1	1
1	0	0	3	0	2	0	0	1	0	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
1	0	1	2	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	3	1	1	0	1
0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	3	1	0	1	0
0	0	0	1	1	2	0	1	0	0	1	2	1	2	1	2	0	1	0	0	1	2
1	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
385	600	162	600	207	600	203	600	245	600	167	600	167	600	167	600	193	600	245	600	327	600
10	15	13	15	12	15	12	15	13	15	13	15	13	15	13	15	15	15	13	15	13	15
18	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
17	10	10	10	10	10	9	10	10	10	9	10	9	10	9	10	9	10	10	10	8	10
36	38	20	20	20	22	20	20	20	20	20	22	20	20	20	20	20	20	20	20	20	18
0	2	0	0	0	2	0	1	0	0	0	3	0	2	0	2	0	1	0	0	0	2
289	457	288	368	296	400	291	381	287	367	295	409	295	395	295	395	307	397	287	367	298	394
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.1		1 Invalid		2 Invalid		3 Invalid		4 Invalid		5 Invalid		6 Invalid		7 Invalid		8 Invalid		9 Invalid		10 Invalid	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30
17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30
36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.1		11	Invalid	12	Invalid	13	Invalid	14	Invalid	15	Invalid	16	Invalid	17	Invalid	18	Invalid	19	Invalid	20	Invalid
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150	385	150
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30
17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30
36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.2		1	Invalid	2	Invalid	3	Invalid	4	Invalid	5	Invalid	6	Invalid	7	Invalid	8	Invalid	9	Invalid	10	Invalid
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	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	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160	385	160
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30	18	30
17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30	17	30
36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38	36	38
0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457	289	457
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.3		1		2		3	best	4		5		6		7		8		9		10	
1	0	0	0	0	3	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	0	1	1	0	1	3	0	0	1	0	1	3	0	2	1	3	0	1
1	0	0	2	0	1	1	3	1	1	1	2	0	3	0	1	1	2	0	1	1	2
1	0	1	2	1	0	1	2	1	0	1	1	1	2	1	0	1	1	1	0	1	2
0	0	0	3	0	0	1	0	1	2	1	0	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2
0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	3	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	3
1	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
385	165	165	165	164	165	162	165	161	165	164	165	164	165	161	165	164	165	161	165	165	165
10	15	14	15	12	15	13	15	14	15	12	15	11	15	14	15	13	15	14	15	14	15
18	30	13	30	16	30	10	30	10	30	11	30	13	30	10	30	10	30	10	30	13	30
17	30	11	30	13	30	10	30	10	30	11	30	14	30	10	30	12	30	10	30	11	30
36	38	26	22	32	26	20	20	20	20	22	22	26	28	20	20	20	26	20	20	26	22
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
289	457	295	391	288	404	288	368	290	370	287	375	284	392	290	370	290	392	290	370	295	391

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.4		1	best	2		3		4	best	5	best	6		7		8		9		10	best
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0
1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	1	3	0	0	1	0	1	3	1	3	0	2	0	2	1	0	0	2	1	3
1	0	0	1	1	3	1	0	1	1	1	1	0	2	0	3	1	3	0	2	1	1
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	2	1	1	1	0
0	0	1	2	1	0	1	0	1	2	1	2	0	2	1	0	0	0	0	2	1	2
0	0	1	0	0	3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0	0	3	1	3	0	0	0	3	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
385	175	161	175	171	175	165	175	161	175	161	175	165	175	164	175	169	175	165	175	161	175
10	15	14	15	12	15	13	15	14	15	14	15	13	15	13	15	11	15	13	15	14	15
18	30	10	30	12	30	11	30	10	30	10	30	10	30	11	30	13	30	10	30	10	30
17	30	10	30	10	30	9	30	10	30	10	30	12	30	12	30	11	30	12	30	10	30
36	38	20	20	24	20	22	18	20	20	20	20	20	24	22	24	26	22	20	24	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	290	370	297	385	293	373	290	370	290	370	292	380	291	383	291	387	292	380	290	370
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.5		1		2		3		4		5		6	best	7		8		9		10	best
1	0	1	3	1	0	1	0	1	0	0	3	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	2	1	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	3	0	0	1	0	1	2	1	3
1	0	1	0	1	0	1	3	1	0	1	0	0	1	0	3	0	0	1	3	1	1
1	0	1	0	1	0	0	2	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	2
0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	3	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
385	200	184	200	162	200	168	200	166	200	184	200	161	200	171	200	165	200	181	200	161	200
10	15	12	15	13	15	11	15	14	15	12	15	14	15	12	15	13	15	13	15	14	15
18	30	11	30	10	30	13	30	12	30	11	30	10	30	12	30	11	30	10	30	10	30
17	30	11	30	11	30	12	30	11	30	11	30	10	30	10	30	9	30	10	30	10	30
36	38	22	22	20	22	26	24	24	22	22	22	20	20	24	20	22	18	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	295	383	288	372	287	387	298	390	295	383	290	370	297	385	293	373	291	371	290	370
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.6		1		2		3	best	4		5	best	6		7		8		9		10	
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
1	0	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1
0	0	1	0	0	1	1	3	0	0	1	3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2
1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	3	1	0	1	0	1	0	1	3
1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1	2	1	2	1	2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	0	1	0	0	2	1	0	0	3	0	2	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	3	0	0	0	0
1	0	1	3	0	3	0	0	0	2	0	0	0	2	0	1	0	1	1	3	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
385	225	201	225	205	225	161	225	171	225	161	225	171	225	168	225	199	225	165	225	181	225
10	15	13	15	12	15	14	15	13	15	14	15	12	15	13	15	11	15	13	15	13	15
18	30	11	30	10	30	10	30	12	30	10	30	12	30	12	30	12	30	11	30	10	30
17	30	9	30	12	30	10	30	10	30	10	30	10	30	11	30	12	30	9	30	10	30
36	38	22	18	20	24	20	20	24	20	20	20	24	20	24	22	24	24	22	18	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	298	378	289	377	290	370	301	389	290	370	297	385	296	388	293	389	293	373	291	371

GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.7		1		2		3	best	4	best	5		6	best	7		8		9	best	10	
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	3	1	3	1	0	1	3	0	0	0	0	1	3	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	2	1	2	0	0	0	2
1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	3	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
385	250	165	250	239	250	245	250	245	250	241	250	245	250	248	250	233	250	245	250	164	250
10	15	13	15	13	15	13	15	13	15	12	15	13	15	10	15	11	15	13	15	12	15
18	30	11	30	13	30	10	30	10	30	10	30	10	30	13	30	12	30	10	30	11	30
17	30	9	30	11	30	10	30	10	30	9	30	10	30	12	30	10	30	10	30	11	30
36	38	22	18	26	22	20	20	20	20	20	20	20	20	26	24	24	20	20	20	22	22
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	293	373	291	387	287	367	287	367	289	379	287	367	285	385	296	384	287	367	287	375
GA Parameters: Pop. Size =100, Crossover rate = 0.5, Mutation = 0.1, Stopping criteria = improve less than 0.01% in 50,000 trials																					
Initial 4.8		1		2		3	best	4		5		6		7		8		9		10	
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	2	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	3	0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0	1	2	1	2	0	0	1	0	0	0	1	2	1	0
1	0	1	0	1	2	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
0	0	1	0	0	2	1	0	0	3	0	3	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	3
1	0	0	3	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	1	3	0	3	0	0	0	3
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
385	275	162	275	240	275	245	275	233	275	233	275	251	275	165	275	162	275	239	275	243	275
10	15	13	15	13	15	13	15	11	15	11	15	12	15	13	15	13	15	11	15	12	15
18	30	10	30	12	30	10	30	12	30	12	30	10	30	11	30	10	30	13	30	10	30
17	30	11	30	11	30	10	30	10	30	10	30	10	30	9	30	11	30	11	30	10	30
36	38	20	22	24	22	20	20	24	20	24	20	20	20	22	18	20	22	26	22	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	457	288	372	294	386	287	367	296	384	296	384	290	370	293	373	288	372	288	384	287	367
Weighting 2-10-2																					
Initial 5.1		1		2		3	best	4	best	5		6		7	best	8		9		10	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	3	1	3	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	1	0
1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
385	600	318	600	318	600	245	600	245	600	388	600	318	600	245	600	318	600	318	600	317	600
10	15	9	15	9	15	13	15	13	15	9	15	9	15	13	15	9	15	9	15	11	15
18	30	13	30	13	30	10	30	10	30	13	30	13	30	10	30	13	30	13	30	11	30
17	30	12	30	12	30	10	30	10	30	15	30	12	30	10	30	12	30	12	30	11	30
36	38	26	24	26	24	20	20	20	20	26	30	26	24	20	20	26	24	26	24	22	22
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	745	284	668	284	668	287	653	287	653	280	672	284	668	287	653	284	668	284	668	286	660

Weighting 2-10-4																					
Initial 5.2		1		2		3		4		5		6		7	best	8		9		10	
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	3	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
385	600	309	600	244	600	309	600	309	600	388	600	309	600	308	600	309	600	309	600	309	600
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	9	15	10	15	11	15	10	15	10	15	10	15
18	30	15	30	15	30	15	30	15	30	13	30	15	30	11	30	15	30	15	30	15	30
17	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	13	30	15	30	15	30	15	30
36	38	30	30	30	30	30	30	30	30	26	30	30	30	22	26	30	30	30	30	30	30
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	1323	276	1224	278	1232	276	1224	276	1224	280	1231	276	1224	281	1221	276	1224	276	1224	276	1224
Weighting 2-10-6																					
Initial 5.3		1	best	2	best	3		4	best	5	best	6	best	7		8		9	best	10	best
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	3	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	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
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	309	600	309	600	203	600	309	600	309	600	309	600	388	600	388	600	309	600	309	600
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	9	15	9	15	10	15	10	15
18	30	15	30	15	30	16	30	15	30	15	30	15	30	13	30	13	30	15	30	15	30
17	30	15	30	15	30	13	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
36	38	30	30	30	30	32	28	30	30	30	30	30	30	26	30	26	30	30	30	30	30
0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	1900	276	1776	276	1776	276	1788	276	1776	276	1776	276	1776	280	1791	280	1791	276	1776	276	1776
Weighting 2-10-8																					
Initial 5.4		1	best	2	best	3	best	4	best	5		6	best	7	best	8	best	9	best	10	best
1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	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	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	309	600	309	600	309	600	309	600	388	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600
10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	9	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
18	30	15	30	15	30	15	30	15	30	13	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
17	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
36	38	30	30	30	30	30	30	30	30	26	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	2477	276	2328	276	2328	276	2328	276	2328	280	2351	276	2328	276	2328	276	2328	276	2328	276	2328

Weighting 2-10-10																					
Initial 5.5		1		2	best	3	best	4	best	5	best	6	best	7	best	8	best	9	best	10	best
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
385	600	388	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600	309	600
10	15	9	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15
18	30	13	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
17	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
36	38	26	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	3055	280	2911	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879	276	2879
Weighting 2-10-0.500																					
Initial 5.6		1		2		3		4		5		6	best	7		8		9		10	
1	0	0	0	1	1	1	0	1	2	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	2	0	3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	3	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	2	1	0	0	0
1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	2	1	3	1	2	0	0	1	1	1	2
0	0	1	3	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	2	0	0	1	3	1	2
0	0	1	0	1	2	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	1	2	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
385	600	277	600	167	600	251	600	319	600	169	600	325	600	308	600	194	600	277	600	308	600
10	15	14	15	13	15	12	15	12	15	12	15	14	15	14	15	11	15	14	15	14	15
18	30	10	30	10	30	10	30	10	30	12	30	8	30	12	30	11	30	10	30	12	30
17	30	10	30	8	30	10	30	10	30	11	30	8	30	10	30	10	30	10	30	10	30
36	38	20	20	20	18	20	20	20	20	24	22	16	16	24	20	22	20	20	20	24	20
0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	312	302	231	295	234	290	225	304	232	294	239	304	216	302	239	300	234	302	231	302	239
Weighting 2-10-0.250																					
Initial 5.7		1		2		3		4		5		6		7		8		9	best	10	
1	0	0	0	1	2	1	0	1	0	1	1	1	0	1	2	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0
0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	3	1	0	1	2	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	0	1	1	2	1	2	0	2	1	3	0	1	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	2	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	3
0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	3	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0
385	600	238	600	319	600	308	600	308	600	290	600	234	600	319	600	165	600	251	600	277	600
10	15	13	15	12	15	14	15	14	15	12	15	13	15	12	15	13	15	12	15	14	15
18	30	12	30	10	30	12	30	12	30	12	30	12	30	10	30	11	30	10	30	10	30
17	30	11	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	9	30	10	30	10	30
36	38	22	23	20	20	24	20	24	20	24	20	24	20	20	20	22	18	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	240	296	164	304	156	302	164	302	164	303	164	302	164	304	156	293	153	290	152	302	155

Weighting 2-10-0.167																					
Initial 5.8		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	best
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	2	1	1	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0
1	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0	1	2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	0	0	0	1	2	1	3	0	0	1	0	1	3	1	3	1	0	1	0
0	0	0	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0	3
1	0	1	3	0	2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
385	600	165	600	194	600	308	600	277	600	319	600	167	600	277	600	277	600	251	600	243	600
10	15	13	15	11	15	14	15	14	15	12	15	14	15	14	15	14	15	12	15	12	15
18	30	11	30	11	30	12	30	10	30	10	30	11	30	10	30	10	30	10	30	10	30
17	30	9	30	10	30	10	30	10	30	10	30	9	30	10	30	10	30	10	30	10	30
36	38	22	18	22	20	24	20	20	20	20	20	22	18	20	20	20	20	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	216	293	129	300	134	302	138	302	130	304	131	300	130	302	130	302	130	290	128	287	128
Weighting 2-10-0.125																					
Initial 5.9		1		2		3		4		5		6		7	best	8		9		10	
1	0	0	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	0	2	0	3	0	0	0	0
1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	1	1	0	0	1	3	1	3
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1	3	0	3	1	1	1	1
0	0	1	0	1	3	1	3	0	0	1	2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
385	600	165	600	277	600	277	600	387	600	308	600	245	600	325	600	213	600	245	600	245	600
10	15	13	15	14	15	14	15	11	15	14	15	13	15	14	15	14	15	13	15	13	15
18	30	11	30	10	30	10	30	11	30	12	30	10	30	8	30	8	30	10	30	10	30
17	30	9	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	8	30	9	30	10	30	10	30
36	38	22	18	20	20	20	20	22	20	24	20	20	20	16	16	16	18	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	204	293	117	302	118	302	118	296	121	302	126	287	116	304	102	311	107	287	116	287	116
Weighting 2-10-0.100																					
Initial 5.10		1		2		3		4		5		6		7		8	best	9		10	
1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	1	0
1	0	1	2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	0	1	1	1	0
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	3	1	2	1	1
0	0	1	0	0	0	1	3	1	3	1	3	1	0	1	3	0	1	1	3	1	3
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	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
385	600	165	600	387	600	277	600	277	600	277	600	165	600	277	600	325	600	276	600	277	600
10	15	13	15	11	15	14	15	14	15	14	15	13	15	14	15	14	15	15	15	14	15
18	30	11	30	11	30	10	30	10	30	10	30	11	30	10	30	8	30	10	30	10	30
17	30	9	30	10	30	10	30	10	30	10	30	9	30	10	30	8	30	10	30	10	30
36	38	22	18	22	20	20	20	20	20	20	20	22	18	20	20	16	16	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	197	293	109	296	114	302	110	302	110	302	110	293	109	302	110	304	94	305	111	302	110

Weighting 2-10-0.010																					
Initial 5.11		1		2		3	best	4		5		6		7		8		9	best	10	
1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	2	1	2	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	3	1	2
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	3	1	2	0	2	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	2	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	0	1	3	1	2	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	1	2	1	2	0	0	0	0
1	0	1	3	1	3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
385	600	165	600	165	600	245	600	277	600	308	600	176	600	194	600	230	600	245	600	251	600
10	15	13	15	13	15	13	15	14	15	14	15	13	15	11	15	11	15	13	15	12	15
18	30	11	30	11	30	10	30	10	30	12	30	11	30	11	30	11	30	10	30	10	30
17	30	9	30	9	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
36	38	22	18	22	18	20	20	20	20	24	20	22	20	22	20	22	20	20	20	20	20
0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
289	171	293	83	293	83	287	83	302	83	302	91	298	87	300	87	301	87	287	83	290	83

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

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

ตำแหน่ง : ผู้ช่วยศาสตราจารย์

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 BhoKha, S. (2009) “Enhancing visualization of 4D CAD model compared to conventional methods.” Engineering, Construction and Architectural Management, 16(4), 392-408.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Benjaoran, V., Dawood, N. and Hobbs, B. (2005) “Flowshop scheduling model for bespoke precast concrete production planning.” Construction Management and Economics, 23(1), 93-105.

[5] 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.

[6] 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).

[7] วชรภูมิ เบญจโอฬาร (2009) เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Management), พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 180 หน้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี