ตัวแบบปัญหาการปรับระดับทรัพยากรโดยทบทวนทางเลือกความสัมพันธ์ กรณีศึกษา โครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี

Resource Leveling Model by Reviewing Relationship Options Case Study of Orthopaedic Building Renovation Project, Ramathibodi Hospital

เอกอนันต์ อินทรทรัพย์ * วชรภูมิ เบญจโอพาร
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Aekanan Intarasap* Vacharapoom Benjaoran
Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000
Tel: 08-1351-4833 E-mail: aekanan.ace@gmail.com

บทคัดย่อ

การขาดแคลนทรัพยากรแรงงานในอุตสาหรรมก่อสร้างในปัจจุบันได้ส่งผลกระทบต่อวิธีการบริหารงานโครงการก่อสร้าง เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ การหาวิธีการจัดสรรทรัพยากรแรงงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อให้มีระดับการใช้ทรัพยากรอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงระยะเวลาโครงการ โดยการปรับแก้แผนงานให้มีความสมดุลเพื่อลดความผันผวนของระดับการใช้ทรัพยากร ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวแบบคอมพิวเตอร์โดยใช้ความสามารถของโปรแกรมสเปรดชีต เพื่อปรับแก้แผนงานก่อสร้างให้มีความสมดุลในการใช้ทรัพยากร โดยสร้างตัวแบบและสมการวัตถุประสงค์แบบถ่วงน้ำหนักและมีการการเพิ่มตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบเลือกได้เข้าไปด้วย จากนั้นประเมินคำตอบของปัญหาแบบ Multi Objective Minimization ของดัชนีวัดความผันผวนต่างๆหลายค่า ส่วนแผนงานก่อสร้างที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือโครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี ซึ่งโครงการนี้มีปัญหาการใช้ปริมาณแรงงานในโครงการไม่สม่ำเสมอส่งผลให้มีปัญหาในการบริหารงานและควบคุมต้นทุน ผลจากงานวิจัยพบว่า ตัวแบบที่สร้างขึ้นสามารถปรับสมดุลของทรัพยากรได้เป็นอย่างดี ผลลัพท์คำตอบของแผนงานที่ได้รับมีความน่าพอใจ ดัชนีความผันผวน ต่างๆ มีการลดลงทั้งหมด ในขณะที่ระยะเวลาของโครงการยังคงเท่าเดิม

คำสำคัญ : ตัวแบบ การจัดสรรทรัพยากร การปรับระดับทรัพยากร ทางเลือกความสัมพันธ์ การหาคำตอบที่เหมาะสม

Abstract

Insufficient labor problem in construction industry impact to management method very much.Target of this research is searching method of resource allocation for highest effective resource usage affect to uniformly resource level through project by adjust schedule to decrease resource fluctuation.This research has developed computer model by use Spreadsheet Programs to adjust former schedule called resource leveling. Solution is inventing an optimal objective function, program modeling from example problem and add determination variable type relationship options ,finally evaluate answer result by multiobjective minimization of fluctuation Index. Example problem is case study of orthopaedic building renovation project, Ramathibodi Hospital,have trouble about irregular labors in construction activitys. Result of this research have discovered after use resource leveling model,labor resource utilization is uniform and easy to management.Schedule answer from this resource

leveling model very good, Fluctuation Index have decreased,better than before using model,moreover project duration be the same.

Keywords: Model, resource allocation, resource leveling, relationship option, optimization

1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรแรงงานในงานก่อสร้าง หรือ แรงงานไม่เพียงพอในช่วงที่มีความต้องการการใช้สูงส่งผลให้จะต้องมีการวางแผนงานในการจัดสรรทรัพยากร วิธีการแก้ปัญหาคือต้องวิเคราะห์การใช้ทรัพยากร และ ทำการปรับระดับการใช้ทรัพยากร (resource levelling) เพื่อให้มีระดับการใช้ทรัพยากรมีความสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาโครงการ [1]

เนื่องจากลักษณะของการปรับสมดุลนี้คำตอบที่เป็นไปได้นั้นมีจำนวนมาก วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมโดยการนำหลักการวิจัยดำเนินงาน (operation research) และความสามารถในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาสร้างเป็นตัวแบบถือว่าเป็นแนวทางที่ใช้กันแพร่หลายและถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง

การปรับแก้แผนงานก่อสร้างโดยเปลี่ยนแปลงรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเช่น จากแบบ Finish-to-Start (FS) เป็นแบบFinish-to-Finish (FF) , Start -to-Start (SS) และ No Relation (NO) เป็นต้น จะมีผลโดยตรงต่อความสมดุลของระดับการใช้ทรัพยากรซึ่งจะเพิ่มโอกาสให้ได้แผนงานผลลัพท์ที่ดียิ่งขึ้น [2]

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวแบบปัญหาการปรับระดับการใช้ทรัพยากร โดยกรณีตัวอย่างมีปัญหาเป็นการใช้แรงงานในโครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์โรงพยาบาลรามาธิบดีซึ่งมีปัญหาการใช้แรงงานในการก่อสร้างไม่สม่ำเสมอ ทำให้แรงงานไม่เพียงพอในบางช่วงเวลา โดยผู้วิจัยจะใช้ความสามารถของโปรแกรมสเปรดชีตเอ็กเซลและ หลักการขั้นตอนทางพันธุกรรม มาช่วยเพื่อให้โมเดลมีความสามารถในการพิจารณาตัดสินใจเลือก หรือ ทบทวนเงื่อนไขความสัมพันธ์ของกิจกรรมต่าง ๆเพื่อทำให้ได้แผนงานที่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรและสามารถนำไปใช้กับงานโครงการก่อสร้างได้จริง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมามีการวิจัยที่ได้พัฒนาโมเดลปัญหาการปรับสมดุลทรัพยากร เช่น Hegazy [3] ได้เสนอโมเดลปัญหาการปรับสมดุลทรัพยากรซึ่งได้เสนอดัชนีการใช้โมเมนต์ของความผันผวนน้อยที่สุดจากสมการ (1)

$$Minimize \sum_{k}^{K} (M_{xk} + M_{yk}) \quad (1)$$

$$M_{xk} = \sum_{t}^{T} (r_t)^2 \quad (2)$$

$$M_{yk} = \sum_{t}^{T} [r_t * (t-d)] \quad (3)$$

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

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

r_t = คือจำนวนทรัพยากรที่ต้องการวันที่ t

d = วันเริ่มความต้องการใช้ทรัพยากรประเภทหนึ่ง

ต่อมาในงานวิจัยที่น่าสนใจของ El-Rayes และ Jun [4] พวกเขาจึงได้เสนอวิธี การวัดค่าความสมดุลของระดับการใช้ทรัพยากรแบบใหม่ ที่มุ่งเน้นไปที่การลดรูปทรงที่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร(Minimize Undesirable resource) โดยได้เสนอค่าดัชนีที่ใช้วัดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรเป็น 2 ประเภทคือ RRH และ RID และทำการ Minimization ค่าผลรวมแบบถ่วงน้ำหนักของดัชนี RRH และ RID กับระดับการใช้ทรัพยากรสูงสุด MRD จุดประสงค์ของการสร้างตัวแบบในงานวิจัยนี้ คือการทำให้ค่าดัชนี RRH และ RID ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรได้ดีที่สุด [2]

ค่า RRH (Release & Rehire) คือ ดัชนีวัดผลรวมจำนวนทรัพยากรที่ต้องปล่อยให้ว่างงานชั่วคราวในช่วงที่การใช้งานต่ำและนำกลับมาใช้อีกในช่วงความต้องการใช้กลับเพิ่มขึ้นมา

$$RRH = H - MRD = HR/_2 - MRD \quad (4)$$

$$HR = [r_1 + \sum_{t}^{T-1} | r_t - r_{t+1} | + r_T] \quad (5)$$

$$MRD = Max\ (r_1, r_2, r_3, r_4, \ldots\ldots, r_T) \quad (6)$$

RID (Resource Idle Day) คือ ดัชนีวัดผลรวมจำนวนทรัพยากรที่ว่างงานอันเนื่องความผันผวนของระดับการใช้

$$RID = \sum_{t}^{T} [r_t - Min(Max(r_1, r_2, \ldots, r_t), Max(r_t, r_{t+1}, \ldots, r_T))] \quad (7)$$

โดยที่

H คือผลรวมจำนวนทรัพยากรประจำวันที่ต้องการเพิ่มขึ้น

MRD คือจำนวนทรัพยากรประจำวันที่ต้องการมากที่สุด

HR คือผลรวมความผันผวนรายวันของความต้องการใช้ทรัพยากร

r_t คือจำนวนทรัพยากรที่ต้องการประจำวันที่ t

T คือ Total Project Durations

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตัวแบบปัญหาของงานวิจัยนี้ มีการปรับปรุงงานของ El-Rayes และ Jun [4] ด้วยการเพิ่มตัวแปรการเลือกความสัมพันธ์ โดยนำข้อมูลตัวอย่างโจทย์จากโครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์โรงพยาบาลรามาธิบดีมาใช้เนื่องจากเป็นโครงการที่มีจำนวนกิจกรรมพอเหมาะไม่มากไม่น้อยเกินไปบางกิจกรรมสามารถปรับเงื่อนไขความสัมพันธ์ได้โดยไม่ขัดแย้งกับความเป็นจริง โดยมีสมมุติฐานงานวิจัยที่ว่าเมื่อใช้โมเดลที่พัฒนาใหม่นี้ปรับระดับการใช้ทรัพยากรโครงการจะแก้ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่สม่ำเสมอเพื่อให้ได้แผนงานที่ดียิ่งขึ้น

โครงการก่อสร้างปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์โรงพยาบาลรามาธิบดีนี้มีงบประมาณโครงการเป็นจำนวนเงิน 58 ล้านบาท ระยะเวลาโครงการตามสัญญา 120 วัน ดำเนินงานก่อสร้างโดยบริษัท ปฐมเฟอร์นิเจอร์ (1997) จำกัด ลักษณะงานเป็นการปรับปรุงพื้นที่ใช้สอยเดิมของชั้นที่ 1 ให้มีความสะดวกสบายและทันสมัยขึ้นต่อการให้บริการผู้ป่วยแผนกออร์โธพิดิกส์ ประกอบไปด้วยรายละเอียดดังตารางที่ 1

3.1 สมการของโมเดลปัญหา

ส่วนประกอบหลักของตัวแบบนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ตัวแปรตัดสินใจ(decision variable), ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์(objective function), ฟังก์ชั่นข้อจำกัด (constraint function) และ วิธีการหาคำตอบ(solving algorithms) ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของตัวแบบที่สร้างขึ้นมีดังนี้ [5]

ตัวแปรตัดสินใจ กำหนดให้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มเวลาเริ่มของกิจกรรม (activity start time) จะเป็นค่าตอบที่ใช้กำหนดเวลาของแผนงานซึ่งเวลาเริ่มของกิจกรรมเหล่านี้จะเป็นไปตามเงื่อนไขของกิจกรรมที่กำหนดเสมือนเป็นการปรับเลื่อนกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมต่างๆเป็นลำดับภายในระยะเวลาโฟลทที่กิจกรรมนั้นมีอยู่ การคำนวณ CPM จะทำให้ได้ระยะเวลาของโครงการทั้งหมด,การกำหนดเวลาเริ่มของกิจกรรมและยังทำให้ได้ระดับการจัดสรรทรัพยากรอีกด้วย [5]

ตัวแปรตัดสินใจ1: S_i= เวลาเลื่อน(Shifting time) ของกิจกรรมที่ i

$$ST_i = ES_i + S_i \quad (8)$$

โดยที่ ST_i = เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i

S_i = เป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่ มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ตัวแปรตัดสินใจอีกกลุ่มคือกลุ่มการเลือกรูปแบบความสัมพันธ์ (relationship options) เป็นการกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมบางอันสามารถมีทางเลือกต่างๆกันได้ ซึ่งผลของรูปแบบความสัมพันธ์ที่ถูกเลือกจะนำไปใช้ในการคำนวณ CPM ต่อไป

ตัวแปรตัดสินใจ 2: การเลือกรูปแบบความสัมพันธ์

x_{ihj} = ตัวแปร Binary ที่ใช้ทางเลือกที่ j ของรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ i และ predecessors ของ i ตัวที่ h

โดยที่ $$\mathbf{S}_j\, x_{ih} = 0,1\ ;\ \forall I \quad (9)$$

ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์(objective function) กำหนดให้เป็นแบบ Multi-Objective ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักโดยปรับปรุงจากงานของ Hegazy [2] และ El-Rayes และ Jun [4]

Total Score=

$$\text{Minimize } (w_1 M_x + w_2 MRD + w_3 RRH + w_4 RID + w_5 T) \quad (10)$$

โดยที่ w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 คือค่าถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อยและเพื่อการปรับสเกลของตัวเลขซึ่งกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.005,1,1,0.1 และ 1 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดข้อมูลกิจกรรมของโครงการอาคารออร์โธพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี

กิจกรรม	รายละเอียด	เวลา (วัน)	ทรัพยากร (คน)	กิจกรรมก่อนหน้า
A	งานรื้อถอนโครงสร้างและตัดต่อวิศวกรรม	14	20	-
B	งานเสาเข็มเจาะภายในอาคาร	7	5	A
C	งานหล่อฐานรากและตอม่อ	7	15	B
D	งานถมดินปรับพื้นที่และหล่อพื้น คสล.ใหม่	15	20	C
E	งานก่ออิฐ-ฉาบปูนผนัง	10	10	A,D
F	งานติดตั้งโครงผนังเบา-โครงฝ้าเพดาน	7	12	E,D
G	งานติดตั้งแผ่นผนังเบา-แผ่นฝ้าเพดาน	7	20	F
H	งานติดตั้งประตู-หน้าต่าง	3	5	G
I	งานปูกระเบื้องยาง	7	10	D
J	งานปูกระเบื้องห้องน้ำ และ ติดตั้งสุขภัณฑ์	15	8	G,I
K	งานตกแต่งภายใน - งานไม้	20	20	H,J
L	งานเดินท่อสุขาภิบาลและท่อดับเพลิง	10	10	A
M	งานทดสอบแรงดันท่อสุขาภิบาลและท่อดับเพลิง	3	3	L
N	งานติดตั้งหัวฉีดน้ำ-ตู้ดับเพลิง-ปั๊มน้ำ	7	10	M,G
O	งานเดินท่อ Conduit ระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร	15	20	A
P	งานร้อยสายไฟในระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร-งานติดตั้งรางWirewayติดตั้งตู้ Load Panel	7	20	O
Q	งานติดตั้งโคมไฟ-สวิทช์-ปลั๊กไฟฟ้า-เต้ารับสัญญาณTV-โทรศัพท์-LAN	15	10	G,P
R	งานติดตั้งท่อ Duct - หัวจ่าย Fresh Air- ช่อง Exhaust	20	20	A
S	งานติดตั้ง AHU และ FCU -ท่อน้ำเย็น-ท่อน้ำทิ้ง	15	20	R,G
T	งานติดตั้ง Chiller - Pump และอุปกรณ์ควบคุม	20	10	S
U	งานตัดต่อวาล์วเก่า และ ติดตั้งวาล์วใหม่	5	5	A
V	งานเดินท่อก๊าซออกซิเจน-ท่อไนตรัส	14	10	U,G
W	งานติดตั้งอุปกรณ์หัวจ่ายก๊าซ และ ติดตั้งปั๊มอากาศอัด	7	5	V
X	งานทดสอบแรงดันท่อก๊าซออกซิเจน-ท่อไนตรัส	3	5	W

ฟังก์ชั่นข้อจำกัด(constraint function) แบ่งออกเป็นกลุ่มเงื่อนไขความสัมพันธ์รูปแบบต่างๆ และกลุ่มเงื่อนไขทั่วไป ดังนี้

:กลุ่มเงื่อนไขความสัมพันธ์

$$FS: \quad ST_i \geq FT_h \quad ; \forall h \qquad (11)$$

$$SS: \quad ST_i \geq ST_h \quad ; \forall h \qquad (12)$$

$$FF: \quad FT_i \geq FT_h \quad ; \forall h \qquad (13)$$

:กลุ่มเงื่อนไขทั่วไป

$$T = Max(FT_i) \qquad (14)$$

$$FT_i \geq ST_i + D_i \qquad (15)$$

โดยที่ ST_i เวลาเริ่มของกิจกรรมที่ i ที่ปรับเลื่อนแล้ว

FT_i เวลาแล้วเสร็จของกิจกรรมที่ i

h กิจกรรม predecessors ของกิจกรรมที่ i

T ระยะเวลาของโครงการที่กำหนด

D_i ระยะเวลาของกิจกรรมที่ i

วิธีการหาคำตอบ(Solving Algorithms) โมเดลปัญหาที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms (GAs) โดยโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Evolver™ ของบริษัท Palisade Corp. ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ใน Microsoft Excel

3.2.การสร้างโมเดลด้วยสเปรดชีต

ตัวแบบปัญหานี้จะถูกสร้างบนโปรแกรมสเปรดชีตโดยจะถูกบันทึกเป็นไฟล์ที่มีแผ่นงาน (sheet) แผ่นเดียวโดยในแต่ละเซลของแผ่นงานจะใช้ป้อนสูตรของสมการต่างๆที่ต้องคำนวณ และเพื่อให้เข้าใจโมเดลได้ง่ายในพื้นที่แผ่นคำนวณจะ มีส่วนการคำนวณค่าเวลา ,ส่วนแสดงบาร์ชาร์ทของแต่ละกิจกรรมและส่วนของการคำนวณค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ด้วยทั้งหมดโดยแสดงในลักษณะตาราง

3.2.1 การนำเข้าข้อมูล

เท็มเพลตของแผนงานคือพื้นที่สำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งาน เป็นตัวโจทย์ปัญหาแผนงานโครงการที่ต้องการหาคำตอบ ข้อมูลที่ต้องนำเข้าได้แก่ รายชื่อกิจกรรม ระยะเวลากิจกรรม จำนวนทรัพยากรที่ใช้ต่อวัน และความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดทำแผนงานก่อสร้าง

ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นข้อมูลที่แสดงแทนด้วย Predecessors ได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงสามกิจกรรม โดยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมกับ Predecessors กำหนดให้มีค่าตั้งต้นแบบ Finish To Start (FS) นอกจากนี้เนื่องจากเป้าหมายของการสร้างโมเดลนี้มีความสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมได้ จึงกำหนดให้กิจกรรมใดๆสามารถมีทางเลือกของกิจกรรมได้ไม่เกินสองทางเลือกเพื่อไม่ให้ขนาดของโมเดลใหญ่เกินไป โดยทางเลือกความสัมพันธ์ใดๆอาจมีรูปแบบเป็น FS หมายถึง Finish To Start ที่เป็นค่าตั้งต้น, SS หมายถึง Start To Start, FF หมายถึง Finish To Finish หรือ No หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์

ในโมเดลนี้ผู้วางแผนสามารถกำหนดทางเลือกของความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดให้เป็นคำตอบโดยที่แต่ละคู่ความสัมพันธ์ของกิจกรรมไม่จำเป็นต้องมีทางเลือกเดียวเสมอไป

3.2.2 การคำนวณค่าเวลา

ส่วนของการคำนวณค่าเวลา แบ่งเป็นส่วนแสดงค่าเวลาที่สำคัญ 6 ค่า ได้แก่ ST (Starting Time), FT (Finish Time), LS (Lasted Started), LF (Lasted Finished), TF (Total Float) และ FF (Free Float)

การคำนวณค่าเวลาของแต่ละกิจกรรมเป็นพื้นฐานของการทำแผนงานโครงการก่อสร้าง ด้วยวิธีการคำนวณแบบ CPM (Critical Path Method) โดยการคำนวณเหล่านี้ จะเป็นการแสดงผลการคำนวณที่อ้างอิงมาจากข้อมูลนำเข้า และชุดคำตอบที่เป็นไปได้ ดังนั้นค่าเวลาที่ต้องคำนวณเหล่านี้ จะมีการปรับแต่งสูตรให้สะท้อนค่าเวลาเลื่อน (shifting time) และการเลือกทางเลือกความสัมพันธ์ด้วยเงื่อนไขความสัมพันธ์เชิงเวลาสามารถสร้างเป็นสูตรคำนวณในสเปรดชีตได้ดังนี้

(1) กรณี FS และไม่มีทางเลือก :

การคำนวณขาไป

$$ST_i = Max\,(FT_h) + S_i;\ \forall h \qquad (16)$$

ตัวอย่างเช่น พิจารณารูปที่ 1 กิจกรรม F มี Predecessors เป็นกิจกรรม A และ D จะได้ว่า

$$ST_F = Max\,(FT_A\,,\,FT_D) + S_F$$

การคำนวณขากลับ

$$LF_i = Min\,(LS_k)\ ;\forall k \qquad (17)$$

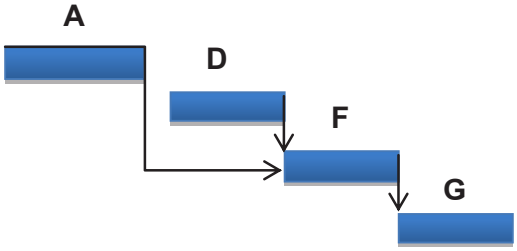
ตัวอย่างเช่นพิจารณารูปที่ 1 กิจกรรม F มี Successors เป็นกิจกรรม G จะได้ว่า

LF_F = Min (LS_G)

โดยที่ i = กิจกรรมที่กำลังพิจารณา

h = กิจกรรม predecessors ของกิจกรรม i

k = กิจกรรม successors ของกิจกรรม i



รูปที่ 1 บาร์ชาร์ทแสดงคู่ความสัมพันธ์ของกิจกรรม F และกิจกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

(2)กรณีทางเลือก FS กับ No:

การคำนวณขาไป

$$ST_i = Max\,(FT_h * x_{ihj}) + S_i;\ \forall h \qquad (18)$$

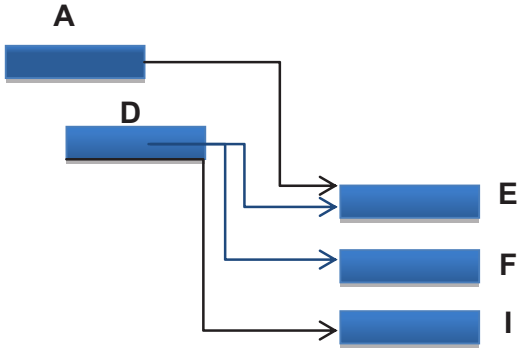
ตัวอย่างเช่น พิจารณารูปที่ 2 กิจกรรม E มี Predecessors เป็นกิจกรรม A และ D โดยมีทางเลือกของความสัมพันธ์กับกิจกรรม D เป็น FS หรือ No

$$ST_E = Max\,(FT_A\,,FT_D * x_{iED1}) + S_E$$

การคำนวณขากลับ

พิจารณารูปที่ 2 ในขณะที่กิจกรรม D มี Successors เป็นกิจกรรม E,F,I จะได้ว่า

$$LF_D = Min\,(LS_E + x_{ED2} * BN\,,\,LS_F\,,\,LS_I\,)$$



รูปที่ 2 บาร์ชาร์ทแสดงคู่ความสัมพันธ์ของกิจกรรม E-D และกิจกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

โดยที่

x_{ihj} = Binary Integer (0 หรือ 1) แทนการไม่เลือกหรือเลือก

BN = ตัวเลขเต็มบวกที่มีค่ามากๆเมื่อเทียบกับระยะเวลาโครงการ เช่น 1,000 วัน

(3) กรณีทางเลือก FS และ SS

การคำนวณขาไป

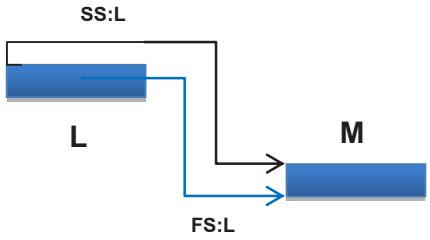
ตัวอย่างเช่นพิจารณารูปที่ 3 กิจกรรม M มี Predecessors เป็นกิจกรรม L และมีทางเลือกความสัมพันธ์กับกิจกรรม L เป็น FS หรือ SS จะได้ว่า

$$ST_i = Max\,(FT_h * x_{ihj}) + S_i;\ \forall h \quad (19)$$

การคำนวณขากลับ

พิจารณารูปที่ 3 ในขณะที่กิจกรรม L มี Successors เป็นกิจกรรม M จะได้ว่า

$$LF_L = Min(LS_M + D_L + x_{LM1} * BN, LS_M + x_{LM2} * BN) \quad (20)$$



รูปที่ 3 บาร์ชาร์ทแสดงคู่ความสัมพันธ์ของกิจกรรม M-L และกิจกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

(4)กรณีทางเลือก FS และ FF

การคำนวณขาไป

$$ST_i = Max\,(FT_h - D_i * x_{ihj}) + S_i;\ \forall h$$

ตัวอย่างเช่น พิจารณารูปที่ 4 กิจกรรม S มี Predecessors เป็นกิจกรรม R และ G และมีทางเลือกความสัมพันธ์กับกิจกรรม G เป็น FS หรือ FF จะได้ว่า

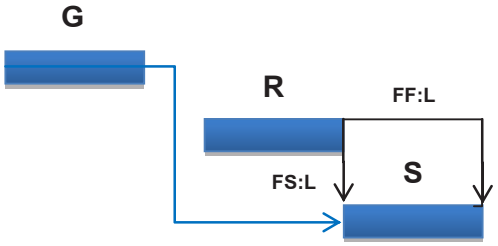
$$ST_S = Max\,(FT_R - D_R * x_{SR2}, FT_G) + S_S \quad (21)$$

การคำนวณขากลับ

$$LF_i = Min\,(LS_h + x_{ihj} * BN);\ \forall h$$

ตัวอย่างเช่นพิจารณารูปที่ 4 ในขณะที่กิจกรรม R มี Successors เป็นกิจกรรม S จะได้ว่า

$$LF_R = Min\,(LS_S + x_{SR2} * BN, LF_S + x_{SR1} * BN) \quad (22)$$



รูปที่ 4 บาร์ชาร์ทแสดงคู่ความสัมพันธ์ของกิจกรรม S-R และกิจกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

(5)ในทุกกรณี

$$FT_i = ST_i + D_i \ ;\ \forall h$$

$$LS_i = LF_i - D_i \ ;\ \forall h$$

3.3 วิธีทดสอบโมเดลและการแสดงผลการทดสอบ

3.3.1 การสร้างแผนงานตารางเวลา และ แผนงานการจัดสรรทรัพยากรก่อนการปรับสมดุล

โมเดลที่ถูกสร้างขึ้นได้ถูกทดสอบกับข้อมูลโครงการที่นำมาจากโครงการก่อสร้างจริง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผนงานโครงการปรับปรุงอาคารออร์โธพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี จากตารางที่ 1 แล้วนำมาสร้างแผนงานตารางเวลา เพื่อคำนวณค่าเวลา CPM เบื้องต้น จากนั้นสร้างกราฟแท่งการจัดสรรทรัพยากร

3.3.2 การค้นหาสมการวัตถุประสงค์และค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโมเดลที่มีตัวเลือกความสัมพันธ์

กำหนดตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม โดย กิจกรรม E มีทางเลือกเป็น FS:D และ No:D กับกิจกรรม D, กิจกรรม K มีทางเลือกเป็น FS:H และ SS:H กับกิจกรรม H, กิจกรรม M มีทางเลือกเป็น FS:L และ SS:L กับกิจกรรม L,กิจกรรม N มีทางเลือกเป็น FS:G และ SS:G กับกิจกรรม G,กิจกรรม S มีทางเลือกเป็น FS:G และ SS:G กับกิจกรรม G,กิจกรรม V มีทางเลือกเป็น FS:G และ SS:G กับกิจกรรม G,กิจกรรม X มีทางเลือกเป็น FS:W และ SS:W กับกิจกรรม W

ในการทดลองจะใช้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสมการที่ (10) เป็นหลักและ จะต้องค้นหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดก่อน โมเดลที่ถูกสร้างขึ้นได้ถูกทดสอบกับข้อมูลโครงการที่นำมาจากโครงการก่อสร้างจริง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผนงานโครงการปรับปรุงอาคารออร์

โรพิดิกส์ โรงพยาบาลรามาธิบดี เป็นกรณีตัวอย่าง โดยที่ w_1,w_2,w_3,w_4,w_5 คือค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นสเกลของตัวเลขให้มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน จึงกำหนดค่าให้เท่ากับ 0.005,1,1,0.1 และ 1 ตามลำดับโดยจะทำการทดสอบ 7 การทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแผนการทดลองโดยใช้ตัวแบบปรับสมดุลตามความสำคัญของวัตถุประสงค์ย่อย

การทดลองที่	ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้					ค่าการเลือกความสัมพันธ์ Xihj	
	W1	W2	W3	W4	W5	แบบFS	แบบอื่น
1	0.005	0	0	0	0	1	ไม่มี
2	0	1	0	0	0	1	ไม่มี
3	0	0	1	0	0	1	ไม่มี
4	0	0	0	0.1	0	1	ไม่มี
5	0	0	0	0	1	1	ไม่มี
6	หาได้จากการทดลองที่ 1-5					1	ไม่มี
7	หาได้จากการทดลองที่ 1-5					0 หรือ 1	0 หรือ 1

3.3.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโมเดลที่ไม่มีและมีตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม

เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองที่ 1-5 สามารถหาค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ได้ จากนั้นรันเพื่อหาคำตอบจำนวน 10 ครั้งสำหรับการทดลองที่ 6 ทำการบันทึกผลลัพธ์

ทำการทดลองที่ 7 โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเดียวกันกับการทดลองที่ 6 จากนั้นรันเพื่อหาคำตอบจำนวน 10 ครั้ง ทำการบันทึกผลลัพธ์

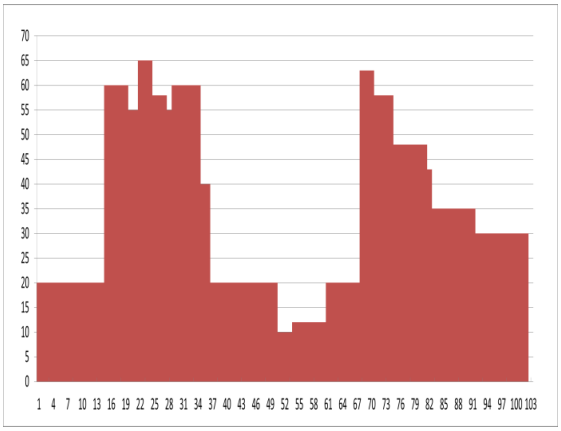
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลลัพท์จาการการสร้างแผนงานตารางเวลาและ แผนงานการจัดสรรทรัพยากรก่อนการปรับสมดุล

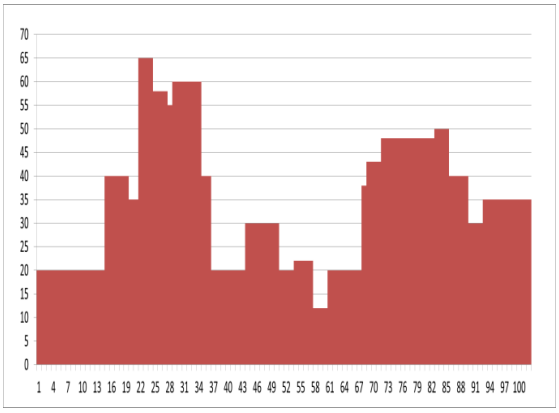
จะได้แผนงานแบบตารางเวลาตามรูปที่ 6 และสร้างกราฟแท่งได้ตามรูปที่ 5.1

4.2 ผลลัพท์จากการค้นหาสมการวัตถุประสงค์และค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโมเดลที่มีตัวเลือกความสัมพันธ์ ได้ผลลัพท์ดังตารางที่ 2 – 7 และใช้ตารางที่ 8 เพื่อประเมินค่าร้อยละถ่วงน้ำหนักรวม

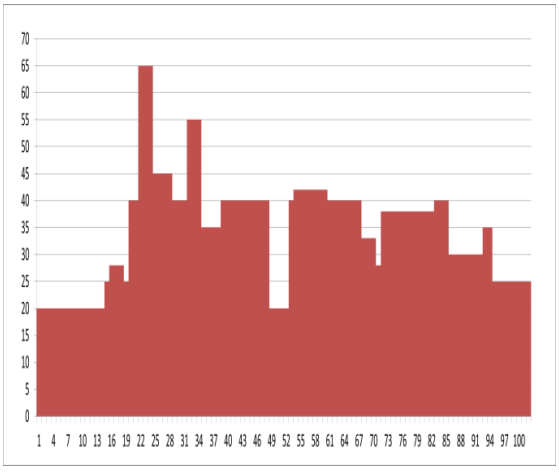
4.3 ผลลัพท์จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโมเดลที่ไม่มีและมีตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมได้ผลลัพท์ดังตารางที่ 6 – 7 และสร้างกราฟแท่งได้ตามรูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3



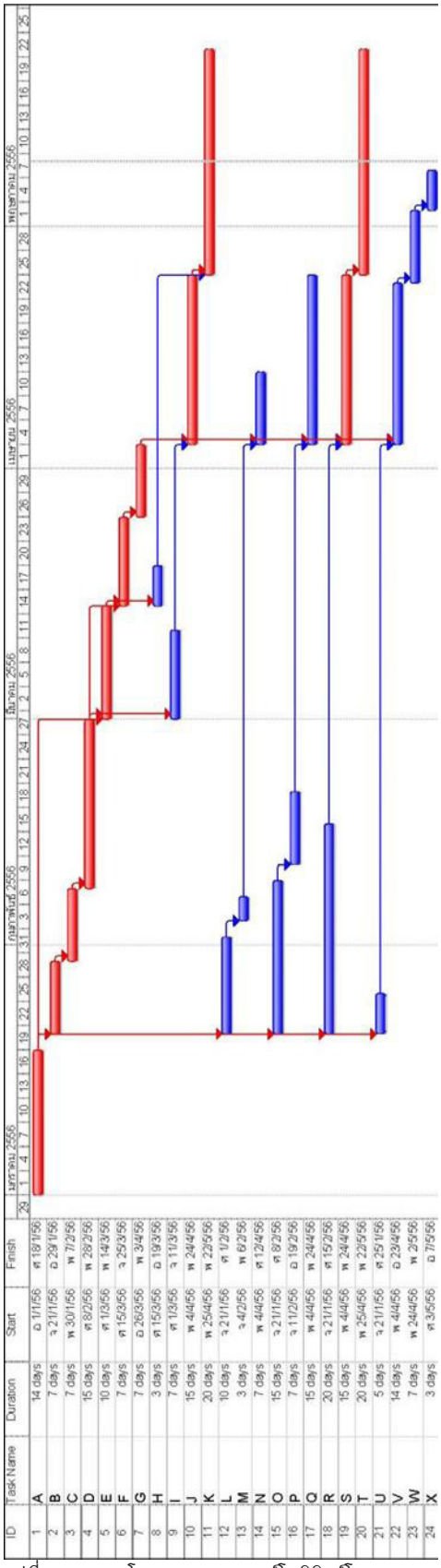
รูปที่ 5.1 กราฟแท่งจัดสรรทรัพยากรโครงการ ก่อนใช้ตัวแบบ



รูปที่ 5.2 กราฟแท่งจัดสรรทรัพยากรโครงการ หลังใช้ตัวแบบ



รูปที่ 5.3 กราฟแท่งจัดสรรทรัพยากรโครงการ หลังใช้ตัวแบบใหม่ที่เพิ่มตัวแปรตัวเลือกความสัมพันธ์



รูปที่ 6 แผนงานโครงการอาคารออร์โธพิดิกส์โรงพยาบาลรามาธิบดีแสดงด้วย Gantt Chart

ตารางที่ 3 ผลการทดลองที่ 1 เน้นดัชนี T

Runtime	Objective Function					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total
1	166,835	75	43	998	92	92
2	166,495	75	37	978	92	92
3	167,645	75	59	986	92	92
4	159,955	75	42	913	92	92
5	162,595	75	58	986	92	92
6	162,505	75	35	696	92	92
7	158,895	75	54	456	92	92
8	166,375	75	35	963	92	92
9	166,385	75	45	968	92	92
10	159,955	75	42	913	92	92
Mean	163,564	75	45	885.70	92	92
SD	3,315.88	0	8.56	116.17	0	0
% C.V.	2.03%	0%	19.01%	18.76%	0%	0%

ตารางที่ 4 ผลการทดลองที่ 2 เน้นดัชนี MRD

Runtime	Objective Function					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total Score
1	154,475	65	70	1,508	102	65
2	154,215	65	63	1,516	102	65
3	145,225	60	60	1,132	99	60
4	143,515	60	52	642	99	60
5	143,555	60	77	1,119	101	60
6	154,215	65	63	1,516	102	65
7	144,975	60	56	441	98	60
8	154,215	65	63	1,516	102	65
9	154,215	65	63	1,516	102	65
10	138,515	60	42	617	99	60
Mean	148,712	62.50	60.90	1,152.30	100.6	62.50
SD	5,814.21	2.50	9.06	413.53	1.56	2.50
% C.V.	3.91%	4.00%	14.88%	35.89%	1.55%	4.00%

ตารางที่ 5 ผลการทดลองที่ 3 เน้นดัชนี RRH

Runtime	Objective Function					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total
1	148,305	73	10	422	98	10.00
2	156,035	80	0	113	92	0.00
3	154,995	80	0	141	92	0.00
4	147,545	80	10	523	100	10.00
5	158,275	80	5	355	92	5.00
6	153,725	80	0	125	92	0.00
7	144,235	70	8	501	101	8.00
8	152,925	75	0	125	92	0.00
9	154,225	80	0	125	92	0.00
10	153,665	78	8	203	93	8.00
Mean	152,393	77.60	4.10	263.30	94.40	4.10
SD	4,104.04	3.47	4.30	160.03	3.53	4.30
% C.V.	2.69%	4.47%	104.88%	60.78%	3.74%	104.88%

ตารางที่ 6 ผลการทดลองที่ 6 เน้นดัชนี RID

Runtime	Objective Function					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total
1	157,015	75	0	39	93	3.90
2	162,445	78	6	30	92	3.00
3	156,315	80	14	40	99	4.00
4	162,045	80	9	33	92	3.30
5	163,875	78	14	28	92	2.80
6	152,365	75	15	123	95	12.30
7	152,225	80	7	29	99	2.90
8	163,925	80	17	37	92	3.70
9	160,065	80	17	56	92	5.60
10	163,625	78	14	26	92	2.60
Mean	159,390	78.40	11.30	44.10	93.80	4.41
SD	4,169.57	1.82	5.05	26.28	2.62	2.63
% C.V.	2.62%	2.32%	44.66%	59.59%	2.79%	59.59%

ตารางที่ 7 ผลการทดลองที่ 5 เน้นดัชนี M_x

Runtime	Objective Function					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total Score
1	132,935	65	59	484	102	664.675
2	137,455	65	82	421	102	687.275
3	136,745	65	57	326	102	683.725
4	137,865	65	85	381	102	689.325
5	137,565	65	57	421	102	687.825
6	132,055	65	70	440	102	660.275
7	137,465	65	75	388	102	687.325
8	137,505	65	32	351	102	687.525
9	137,465	65	73	388	102	687.325
10	137,465	65	77	386	102	687.325
Mean	136,452	65	66.70	398.60	102	682.26
SD	2,005.43	0	14.99	42.71	0	10.03
% C.V.	1.47%	0.00%	22.47%	10.71%	0.00%	1.47%

ตารางที่ 8 สรุปร้อยละการกระจายข้อมูลของการทดลองที่ 1 ถึง 5

การทดลองที่	ร้อยละการกระจายข้อมูล C.V.					
	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total
1	2.03%	0.00%	19.01%	18.76%	0.00%	0.00%
2	3.91%	4.00%	14.88%	35.89%	1.55%	4.00%
3	2.69%	4.47%	104.88%	60.78%	3.74%	104.88%
4	2.62%	2.32%	51.72%	59.59%	2.79%	59.59%
5	1.47%	0.00%	22.47%	10.71%	0.00%	1.47%

5. การอภิปรายผล

ผลลัพท์จากการสร้างแผนงานตารางเวลา ในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อสร้างแผนงานตารางเวลาพบว่าผลที่ออกมาพบว่าแผนงานก่อสร้างนี้มีระยะเวลาดำเนินโครงการตั้งแต่ต้นจนจบทั้งสิ้น 102 วัน เกิดสายงานวิกฤตเป็นจำนวน 2 สาย คือ สายแรก คือ A-B-C-D-E-F-G-J-K และสายที่ 2 A-B-C-D-E-F-G-S-T มีกิจกรรมที่น่าสนใจคือ กิจกรรม A ซึ่งเป็นกิจกรรมแรกของโครงการมีลักษณะที่เด่นคือมี Successor ต่อท้ายมากถึง 6 กิจกรรม อีกกิจกรรมคือ G มีลักษณะที่เด่นคือมี Successor ต่อท้ายมากถึง 6 กิจกรรมเช่นกัน นั่นหมายถึง หากกิจกรรมนี้เริ่มต้นล่าช้าหรือดำเนินการไม่เสร็จก็จะกระทบถึงกิจกรรมที่ตามมาถึง 6 กิจกรรมส่งผลให้โครงการทั้งหมดล่าช้าออกไปการจัดสรรทรัพยากรของแผนงานเริ่มต้นนี้ไม่ดีนักกล่าวคือความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาสูงมาก จากรูปที่ 5.1 มีรูปร่างเป็นภูเขาสองลูกที่ยอดสูงระหว่างหุบเขาที่ค่อนข้างกว้างพิจารณาค่าดัชนี Mx=143,295,MRD=65,RRH=65,RID=987,T=102 daysและ Total Score=28,659 ก็มีค่าสูงแสดงถึงยังมีความผันผวนในการใช้ทรัพยากรมากและจากลักษณะของกราฟทำให้มองเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่จะปรับสมดุลทรัพยากรได้จากรูปร่างที่เป็นหุบเขาซึ่งค่อนข้างกว้าง แนวทางที่เป็นไปได้คือการพิจารณาปรับเลื่อนกิจกรรมในแผนงานที่ไม่วิกฤตที่อยู่ในช่วงเวลานี้ [6]

ผลลัพท์จากการค้นหาสมการวัตถุประสงค์และค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแบบที่มีตัวเลือกความสัมพันธ์ เราจึงตัดสินใจที่จะถ่วงน้ำหนักดัชนีต่าง ๆ ดังนี้ การทดลองครั้งที่ 1 ที่เน้นถ่วงน้ำหนักค่าดัชนี M_x และ การทดลองครั้งที่ 5 ที่เน้นถ่วงน้ำหนักค่าดัชนี T จะมีเปอร์เซนต์ของการกระจายข้อมูล(C.V.)น้อยที่สุดในทุกค่าดัชนีหลังจากการรันเสร็จสิ้น เพราะ คำตอบที่เป็นไปได้มีน้อยมาก พิจารณาจากคำตอบที่ ค่าการเลื่อนเวลาในการรันแต่ละครั้งน้อยมาก ดังนั้นควรจะถ่วงค่าน้ำหนักไปที่ดัชนี M_x และ ดัชนี T มากที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงให้ค่าถ่วงน้ำหนักทั้ง 2 ดัชนีเป็น 30%

การทดลองครั้งที่ 2 ที่เน้นถ่วงน้ำหนักค่าดัชนี MRD หลังจากการรันเสร็จสิ้นพบว่ามีเปอร์เซนต์ของการกระจายข้อมูล(C.V.)มากขึ้นกว่ากรณีแรก เพราะ คำตอบที่เป็นไปได้น้อยแต่กิจกรรมที่มีโฟลทก็มีโอกาสเลื่อนได้หลายรูปแบบ ในงานวิจัยนี้จึงให้ค่าถ่วงน้ำหนักดัชนี MRD เป็น 20%

การทดลองครั้งที่ 3 ที่เน้นถ่วงน้ำหนักค่าดัชนี RRH และ การทดลองครั้งที่ 4 ที่เน้นถ่วงน้ำหนักค่าดัชนี RID พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ของการกระจายข้อมูล (C.V.) มากที่สุดซึ่งถือว่าแย่ที่สุด เพราะ คำตอบที่เป็นไปได้มีค่อนข้างมากเนื่องจากสูตรของดัชนี RRH และ RID เป็นค่าผลต่างของหลายพจน์ตัวแปร ในงานวิจัยนี้จึงให้ค่าถ่วงน้ำหนักดัชนี RRH และ RID เป็น 10%

ผลลัพท์จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวแบบที่ไม่มีและมีตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม จากรูป 5.2 และตารางที่ 9 พบว่า ตัวแบบแรกที่ไม่มีตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมนั้น ค่า Score ดัชนีมีค่าใกล้เคียงกันสูงมาก สังเกตจาก %C.V. = 1.78% ซึ่งต่ำมากแสดงถึงความเสถียรของคำตอบที่ดีจากการรันการสร้างแผนงานใหม่ที่ได้จากตัวแบบ จึงเลือกค่า Score ดัชนีที่ใกล้เคียงกับค่า Mean ที่สุดจากการทดสอบทั้งหมดคือคำตอบที่ 6 (Total Score = 28,659 ส่วน Mean=28,678.4)

ตัวแบบต่อมาที่เพิ่มตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเข้าไปนั้นในตารางที่ 10 พบว่าค่า Score ดัชนีมีค่าใกล้เคียงกันสูงมาก สังเกตจาก %C.V. = 0.78% ซึ่งต่ำมากแสดงถึงความเสถียรของคำตอบที่ดีจากการรัน

การสร้างแผนงานใหม่ที่ได้จากตัวแบบ เราเลือกค่า Score ดัชนีที่ใกล้เคียงกับค่า Mean ที่สุดจากการทดสอบทั้งหมดคือคำตอบที่ 6 (Score = 26,637 ส่วน Mean=26,991.8 ลักษณะของกราฟแท่งจากรูป 5.3 มีลักษณะเหมือนเนินเขาเตี้ยๆที่มีหุบเขาบ้างช่วงแคบๆ แสดงถึงการใช้ทรัพยากรที่น้อยในช่วงเริ่มต้นโครงการและค่อยๆเพิ่มขึ้นจนสูงในช่วงกลางและค่อยๆใช้ทรัพยากรต่ำลงในช่วงปลายโครงการ นั้นหมายถึงการได้รับคำตอบที่ดีขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวแบบแรก

6. สรุปผลการวิจัย

การนำตัวอย่างโจทย์โครงการก่อสร้างโรงพยาบาลรามาธิบดีที่นำมาวิเคราะห์โดยตัวแบบนี้เพื่อเป็นการเป็นการแสดงความสามารถของตัวแบบ ซึ่งสร้างแผนงานที่มีความเหมาะสม (Optimal Schedule) เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้ทรัพยากรในโครงการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

จากงานวิจัยสรุปได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับสมการวัตถุประสงค์ก็คือ w_1เป็นร้อยละ30, w_2เป็นร้อยละ30, w_3 เป็นร้อยละ20, w_4 เป็นร้อยละ10 และ w_5 เป็นร้อยละ10 จากนั้นจึงใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดนี้เทียบสัดส่วนกลับไปที่ค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้น สุดท้ายจะได้สมการวัตถุประสงค์คือ

$$\text{Total Score} = \text{Minimize } [\, 0.20Mx + 20MRD + RRH + 10RID + 30T \,]$$

จากกราฟแท่ง ทั้ง 3 ในรูปที่ 5.1,รูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 ที่ได้รับจากการหาคำตอบของตัวแบบป้อนข้อมูลโจทย์ไปยังโปรแกรม Evolver พบว่า มีลักษณะกราฟเป็นภูเขาฐานกว้างที่มียอดไม่สูงมากซึ่งเป็นรูปร่างที่พึงประสงค์มากขึ้น และค่าผลลัพท์ดัชนีความผันผวนต่างๆ ก็มีแนวโน้มที่ลดต่ำลงด้วย โดยที่ระยะเวลาโครงการ T ยังคงเท่าเดิม แสดงว่า วิธีการปรับระดับทรัพยากรด้วยการเพิ่มตัวเลือกความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม(Relationship Option) เข้าไป จะทำให้ได้รับคำตอบที่ดีมาก จึงสามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ยังโครงการอื่นๆได้อีก เพื่อประโยชน์ในการปรับสมดุลการใช้ทรัพยากร และ เพื่อการใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในภาวะปัจจุบันที่ปัจจัยด้านทรัพยากรแรงงานก่อสร้างมีความสำคัญต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างเป็นอย่างมาก

เอกสารอ้างอิง

[1] กวี หวังนิเวศน์กุล. 2547. การบริหารงานวิศวกรรมก่อสร้าง. ส.เอเชียพลัส (1989),กรุงเทพฯ.

[2] วชรภูมิ เบญจโอพาร. 2554. การบริหารงานก่อสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 6. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,นครราชสีมา.

[3] Hegazy, Tarek. 1999. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms.

[4] El-Rayes, Khaled, and Dho Jun. 2009. Optimizing resource leveling in construction projects. Journal of Construction Engineering and Management Vol.35.No.11(November):1172-1180. DOi10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000097

[5] สุทธิมา ชำนาญเวช. 2552. การวิจัยดำเนินการ. พิมพ์ครั้งที่ 2. พิมพ์ดีการพิมพ์,กรุงเทพฯ.

[6] Chassiakos, A. P, Sakellaropoulos. 2005. Time-cost optimization of construction projects with generalized activity constraints . Journal of Construction Engineering and Management 131:1115.

Experiment 7 ใช้ Weight MX = 0.20 MRD=20 RRH=1 RID=10 Project Duration=30 No Relationship Option

Runtime#	Shift Time Activity																						Relationship Option Xbij																						Objective function				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	E			K			M			N			S			V			X					
																									FSD	NOD	FSH	SSH	FLL	SSL	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total Score
1	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	3	7	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,255	65	70	977	102	28,651
2	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	3	5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,255	65	60	962	102	28,651
3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	4	4	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,295	65	60	972	102	28,659
4	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	3	0	0	0	0	7	0	4	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,455	65	65	982	102	28,691
5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	7	0	3	7	7	5	0	0	0	3	5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	144,145	65	46	936	102	28,829
6	0	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	4	7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,295	65	65	987	102	28,659
7	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	3	7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,255	65	65	972	102	28,651
8	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	3	6	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,255	65	65	967	102	28,651
9	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	3	0	0	0	0	7	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,455	65	60	962	102	28,691
10	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	7	7	0	0	0	0	3	5	2	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	143,255	65	65	972	102	28,651
																																											Mean	143,392	65	62.1	968.9	102	28,678.40
																																										SD	262.22	0.00	6.14	13.32	0	52.44
																																										%C.V.	0.18%	0.00%	9.89%	1.38%	0%	0.18%

ตารางที่ 9 ผลการทดลองที่ 6 ใช้โมเดลที่ไม่มีตัวแปรตัวเลือกความสัมพันธ์

Experiment 6 ใช้ Weight Mx = 0.20 MRD=20 RRH=1 RID=10 Project Duration=30 with Relationship Option

Runtime#	Shift Time Activity																						Relationship Option Xbij																						Objective function				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	E			K			M			N			S			V			X					
																									FSD	NOD	FSH	SSH	FLL	SSL	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	FSG	FFG	M_x	MRD	RRH	RID	T	Total Score
1	0	0	0	3	7	0	5	0	7	0	7	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	136,785	65	57	336	102	27,357
2	0	4	0	7	6	0	7	0	7	0	6	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	133,475	60	105	268	102	26,695
3	0	0	2	5	7	7	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	132,015	65	70	404	102	26,403
4	0	0	3	5	7	7	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	132,155	65	60	292	102	26,431
5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	3	7	0	5	0	7	0	4	7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	136,765	65	52	316	102	27,353
6	0	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	7	0	7	0	7	0	4	7	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	133,185	65	62	316	102	26,637
7	0	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0	0	0	7	7	0	7	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	137,565	65	55	423	102	27,513
8	0	2	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	5	7	7	7	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	132,275	65	70	417	102	26,455
9	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	3	7	7	5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	137,505	65	32	351	102	27,501
10	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	7	5	3	0	0	7	2	0	7	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	137,865	65	85	373	102	27,573
																																											Mean	134,959	64.8	349.6	102	26,991.80
																																										SD	2,395.76	1.50	18.72	50.85	0	479.15
																																										%C.V.	1.78%	2.33%	28.89%	14.55%	0%	1.78%

ตารางที่ 10 ผลการทดลองที่ 7 ใช้โมเดลใหม่ที่มีตัวแปรตัวเลือกความสัมพันธ์