บทที่ 2 การวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง

ในบทนี้ได้ศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้าง โดยเริ่มตั้งแต่หลักการขั้นพื้นฐานทั่วไปไปจนถึงวิธีการขั้นสูงที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยต่าง ๆ และบทนี้ได้นำเสนอสภาพทั่วไปของการวางแผนและควบคุมงานก่อสร้างในประเทศไทยที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา นอกจากนี้บทนี้ยังได้รวมบทวิจารณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ วิจารณ์เนื้อหาของการศึกษาทบทวนในประเด็นต่าง ๆดังกล่าว 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 และแจกแจงรายละเอียดของขั้นตอนงานต่าง ๆที่ต้องทำเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เหล่านั้น 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

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

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

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

4. การคำนวณค่าเวลาของกิจกรรมด้วย "วิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต" (Critical Path Method: CPM) ข้อมูลเบื้องต้นของกิจกรรมก่อสร้างที่กำหนดขึ้นจากขั้นตอนต่าง ๆก่อนหน้านี้จะใช้ในการคำนวณค่าเวลาของกิจกรรม ซึ่งมีค่าเวลาต่าง ๆดังนี้

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

กิจกรรมก่อสร้างต่าง ๆจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกันอยู่ และมักมีความสัมพันธ์แบ่งเป็นกลุ่ม ๆ โดยที่กลุ่มงานหนึ่ง ที่มีกิจกรรมต่าง ๆที่สัมพันธ์กันและเรียงต่อกันเป็นลักษณะสายทางจะเรียกว่า "สายทางกิจกรรม" (Path) ขณะที่ในระหว่างกลุ่มงานที่ไม่สัมพันธ์กัน จะมีลักษณะเป็นเส้นสายทางกิจกรรมที่ขนานกันไป โมเดลเน็ตเวิร์คของโครงการก่อสร้างหนึ่งนั้นจะต้องมีสายทาง

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

การคำนวณค่าเวลาต่าง ๆของกิจกรรมจะช่วยทำให้ระบุได้ว่ากิจกรรมใดเป็นกิจกรรมวิกฤต โดยที่กิจกรรมใดที่มี TF เท่ากับศูนย์คือกิจกรรมวิกฤต สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าเวลา สำหรับกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์แบบใด ๆระหว่าง Predecessors และ Successors มีดังนี้

$$\boldsymbol{ES_i = Max(EF_h);\ \forall h}$$ **สมการที่ (2.4)**

$$\boldsymbol{EF_i = ES_i + D_i}$$ **สมการที่ (2.5)**

$$\boldsymbol{LF_i = Min(LS_j);\ \forall j}$$ **สมการที่ (2.6)**

$$\boldsymbol{LS_i = LF_i - D_i}$$ **สมการที่ (2.7)**

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

$$\boldsymbol{TF_i = LS_i - ES_i}$$ **สมการที่ (2.9)**

โดยที่ i คือกิจกรรมใด ๆที่มี predecessors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ h และมี successors ทั้งหมดเป็นเซ็ตของ j

D_i คือ ระยะเวลาของกิจกรรม i

ค่าเวลาต่าง ๆของกิจกรรมที่ได้จะช่วยให้สามารถจัดตารางเวลางานของโครงการก่อสร้างได้ 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 ซึ่งในงานโครงการก่อสร้างนั้นจะพบอยู่เสมอๆว่าผลการดำเนินงานจริงไม่เป็นไปตามที่วางแผนไว้ 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 มูลค่าเงินแบบต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลงาน 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 ด้วยการรวมรวบใบเสร็จค่าใช้จ่ายต่าง ๆที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงาน

มูลค่าเงินทั้งสามแบบนี้จะนำมาใช้วัดค่าความแตกต่าง (Variance) ระหว่างแผนงานฐานและแผนงานปรับปรุงซึ่งค่าความแตกต่างนี้สามารถวัดได้เป็นรายแต่ละกิจกรรมและในภาพรวมของทั้งโครงการ เพื่อบ่งบอกว่าผลการดำเนินงานจริงของแต่ละกิจกรรมหรือทั้งโครงการดีหรือแย่เพียงใดเทียบกับแผนงานฐาน ค่าความแตกต่างสามารถเปรียบเทียบวัดได้สองลักษณะดังนี้

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

$$SV = BCWP - BCWS$$ **สมการที่ (2.10)**

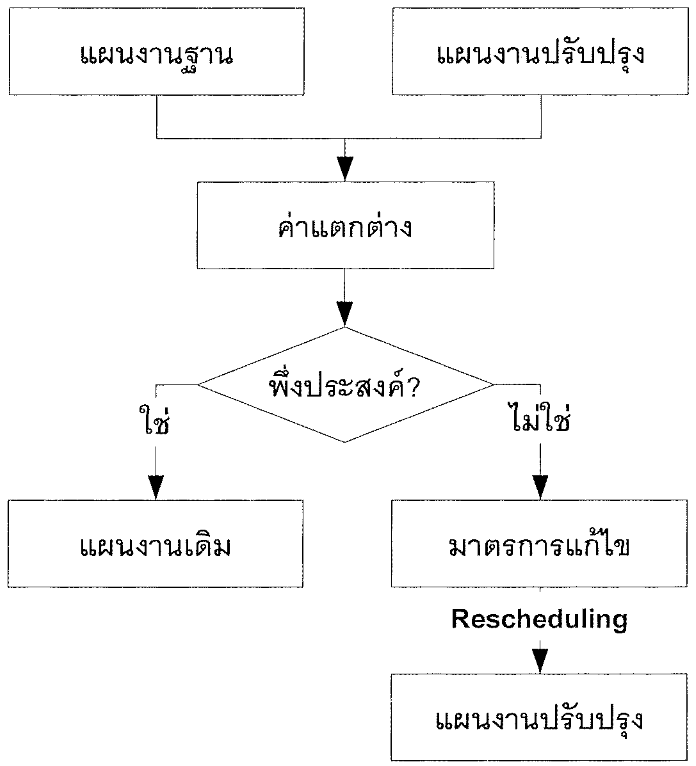
2. ค่าความแตกต่างเชิงต้นทุน (Cost Variance: CV) คือค่าที่ใช้วัดว่าผลการดำเนินงานจริงที่ทำได้ว่ามีการใช้จ่ายประหยัดกว่าหรือเปลืองกว่าแผนงานฐาน โดย CV ที่มีค่าเป็นบวก จะแปลความหมายได้ว่า ผลการดำเนินงานจริงประหยัดกว่าแผนงาน (และในทางกลับกัน)

$$CV = BCWP - ACWP$$ **สมการที่ (2.11)**

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 15 มี.ค. 2555
เลขทะเบียน 244844

แตกต่าง) จะเห็นได้ว่าการควบคุมงานได้รวมเอา "การวางแผนอีกครั้ง" เป็นขั้นตอนย่อยอันหนึ่ง โดยการวางแผนอีกครั้งจะต้องสะท้อนถึงมาตรการแก้ไขที่กำหนดขึ้นเพื่อชดเชยผลงานจริงที่ไม่พึงประสงค์ในช่วงที่ผ่านมา



รูปที่ 2.1 ภาพรวมของการควบคุมงานโครงการก่อสร้าง

2.2 โมเดลปัญหาการวางแผนงาน

เทคนิคเบื้องต้นที่ใช้สำหรับการวางแผนโครงการงานก่อสร้างโดยทั่วไปอย่างแพร่หลายคือวิธีสายทางกิจกรรมวิกฤต (Critical Path Method: CPM) ที่มีเป้าหมายเพื่อจัดตารางเวลาการดำเนินกิจกรรมก่อสร้างให้ได้ระยะเวลาโครงการสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาเงื่อนไขเฉพาะด้านความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม (Activity dependency) เป็นหลักซึ่งเป็นมิติด้านเวลา วิธี CPM จึงเป็นการวางแผนงานในขั้นเบื้องต้น และมีข้อด้อยที่ไม่ได้พิจารณาเงื่อนไขที่สำคัญอื่นๆที่มีผลกระทบต่อแผนงาน โดยเฉพาะเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรโครงการประเภทต่าง ๆที่มีจำนวนจำกัด (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 โดยที่การดำเนินกิจกรรมเหล่านี้เป็นแบบต่อเนื่องจะไม่สามารถหยุดพักระหว่างกลางได้ (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)

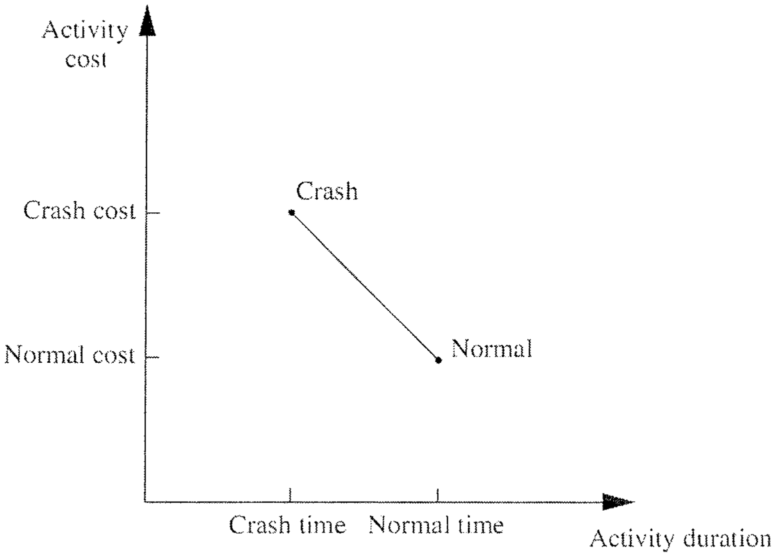
ทรัพยากรของโครงการสามารถแบ่งประเภทออกเป็น ทรัพยากรหมุนเวียน (Renewable resources) คือทรัพยากรที่เมื่อใช้ดำเนินการกิจกรรมหนึ่งจนแล้วเสร็จ สามารถนำไปใช้ดำเนินการกิจกรรมอื่นต่อไปได้ ตัวอย่างเช่น คนงาน และเครื่องจักร อีกประเภทคือ ทรัพยากรไม่หมุนเวียน (Nonrenewable resources: NR) คือทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป 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

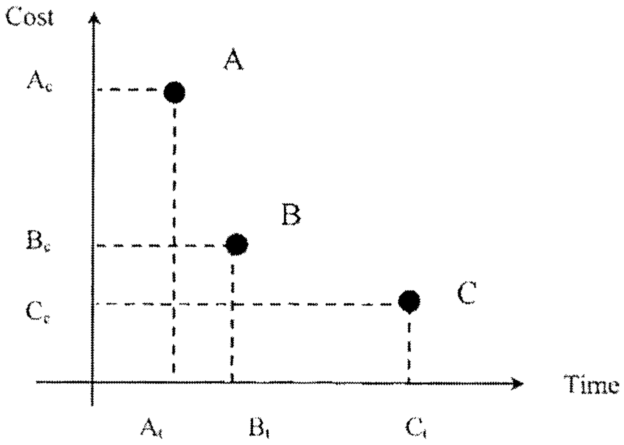
RCPSP สามารถแบ่งออกได้โดยทั่วไปเป็น 4 กลุ่มย่อยคือ การแลกเปลี่ยนระหว่างเวลากับต้นทุน (Time-cost trade-off), การจัดสรรทรัพยากร (Resource allocation) การปรับระดับสมดุลทรัพยากร (Resource leveling) และกระแสเงินสดกับวงเงินเครดิต (Cashflow with credit limit) ซึ่งจะได้ทบทวนรายละเอียดแบ่งเป็นแต่ละหัวข้อดังข้างล่าง

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



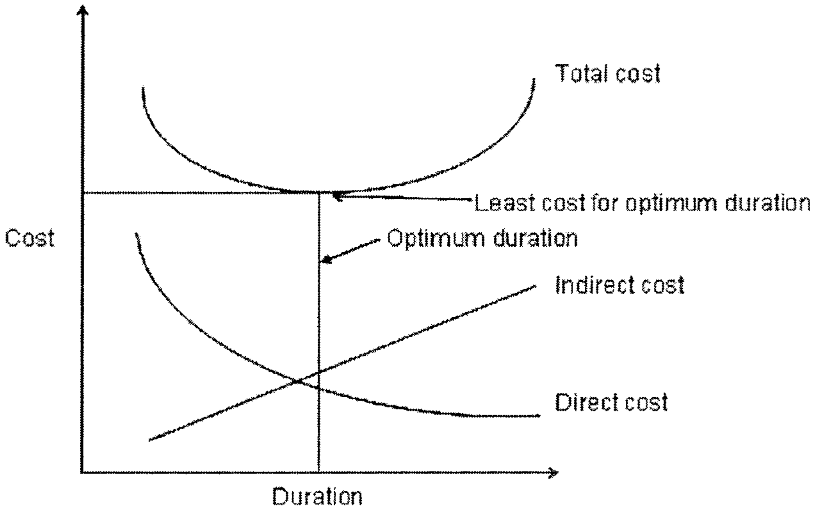
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างต้นทุนกับเวลาของกิจกรรมในแบบปกติและแบบเร่งรัด (Hillier 2001)



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 ดังนั้นหากกำหนดค่าระยะเวลาโครงการหลาย 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 ด้วยทางเลือกที่ j

Objective functions:

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

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

และ Activity dependency

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

$\boldsymbol{C}$ คือต้นทุนของโครงการทั้งหมด

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

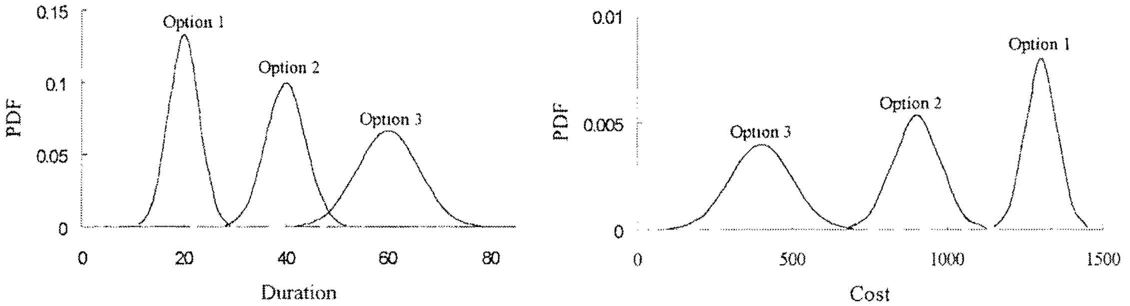
$\boldsymbol{IC_t}$ คืออัตราต้นทุนทางอ้อมของโครงการต่อหน่วยเวลา t

$\boldsymbol{T}$ คือระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ ที่ต้องการ

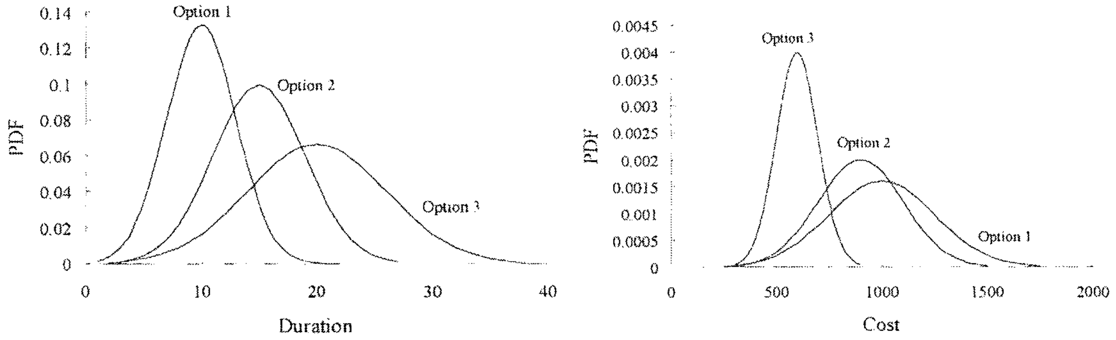
$\boldsymbol{EF_i}$ คือค่าเวลา EF ของกิจกรรมที่ i

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

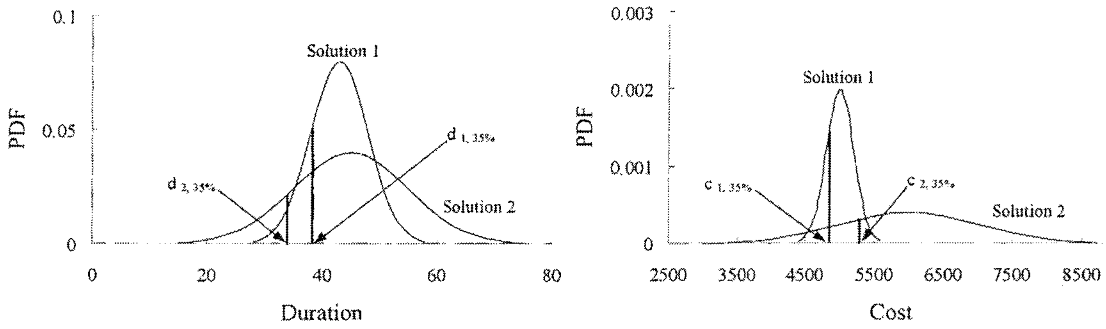


รูปที่ 2.5 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใด ๆที่ไม่ซ้อนเหลื่อมกัน (Feng, L Liu, and Burns 2000)



รูปที่ 2.6 Probability distributions ของระยะเวลาและต้นทุนของแต่ละทางเลือกของกิจกรรมใด ๆที่ซ้อนเหลื่อมกัน (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

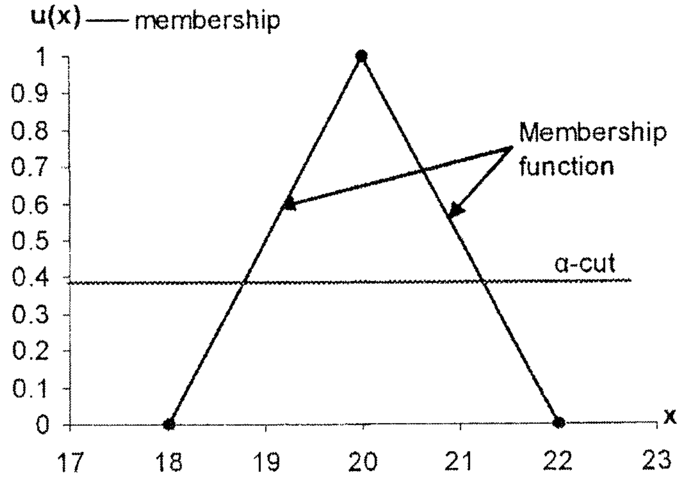
$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$$ **สมการที่ (2.13)**

โดยที่ A คือฟัซซี่เซ็ตของค่าตัวแปร

x คือสมาชิกของฟัซซี่เซ็ต A

X คือช่วงของค่าตัวแปรที่เป็นไปได้

μ_A คือฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ที่มีค่าตั้งแต่ [0,1] แสดงถึงดีกรีที่ x เป็นสมาชิกของ fuzzy set A

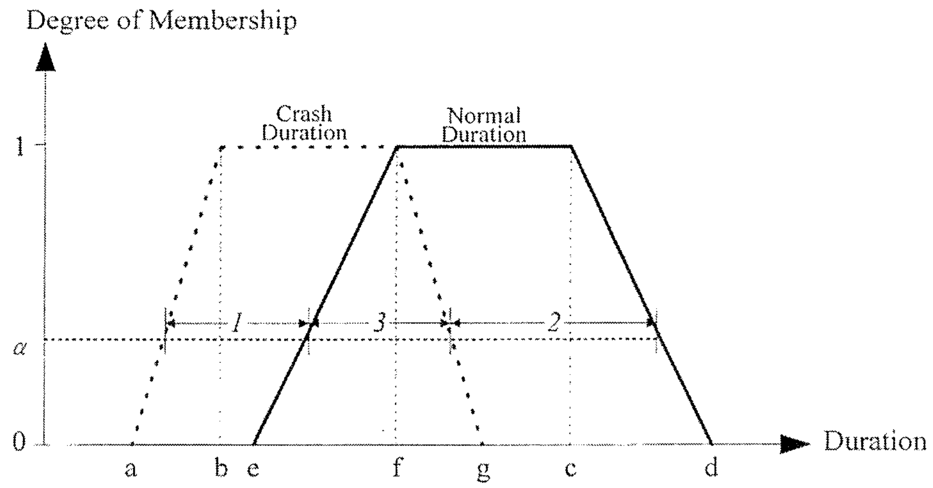


รูปที่ 2.8 ฟัซซี่เซ็ตของ “ประมาณ 20” (Zheng and Ng 2005)

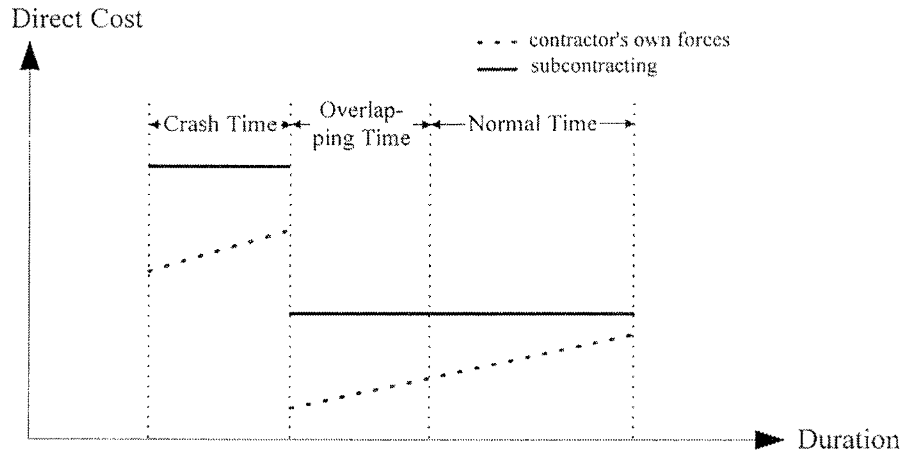
α-cut level เป็นการกำหนดระดับการยอมรับความเสี่ยงของค่าตัวแปร โดยจะยอมรับ x เฉพาะที่มีค่าความเป็นสมาชิก (μ_A) ที่มากกว่าเท่ากับ α การกำหนด α-cut level ทำให้ค่าตัวเลขฟัซซี่ถูกแปลงให้อยู่ในรูปเซ็ตของตัวเลขที่แน่นอน (crispsets) ได้ ลักษณะของฟังก์ชันสมาชิกและ α -cut level แสดงในรูปที่ 2.8

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

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)

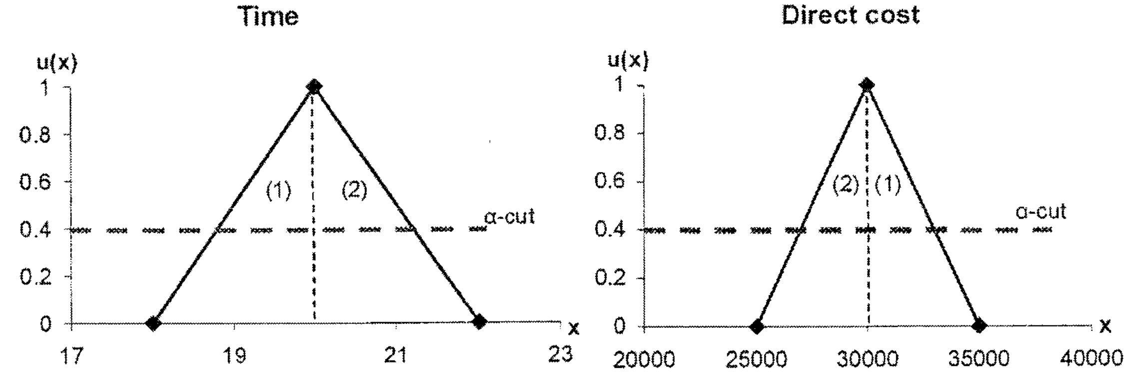


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่และต้นทุนของกิจกรรม (SS Leu, AT Chen, and CH Yang 2001)

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

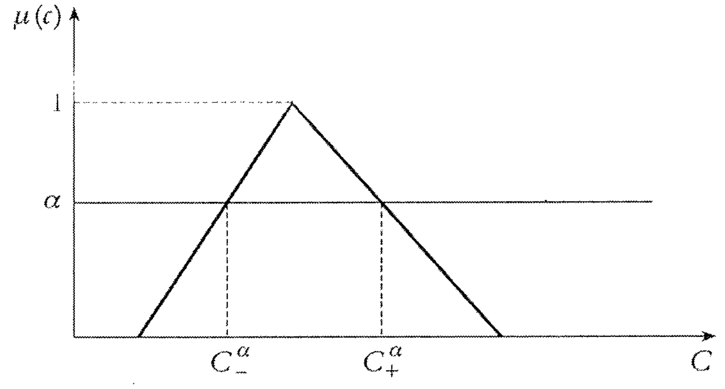
อย่างไรก็ตาม Zheng and Ng (2005) ได้แย้งว่าการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาฟัซซี่กับต้นทุนด้วยกราฟเส้นตรงแบ่งเป็นช่วง ๆ นั้น ไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง เนื่องจาก

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

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

โดยที่ C_α = ต้นทุนฟัซซี่ที่ α-cut level ของทางเลือกหนึ่งของกิจกรรม

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

ผลรวมของต้นทุนฟัซซี่ของสองกิจกรรมใด ๆ จะต้องใช้คณิตศาสตร์ของตัวเลขฟัซซี่ในการหาผลรวม โดยค่าผลรวมของตัวเลขฟัซซี่ C_1 และ C_2 เป็นดังนี้

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

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

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

การเปรียบเทียบลักษณะที่ 2 โดยการเปรียบเทียบด้วยคณิตศาสตร์ของตัวเลขฟัซซี่เอง โดยตัวเลขฟัซซี่ C_1และ C_2 ใด ๆ จะได้ว่า

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

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

2.2.2 การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด

การจัดสรรทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด (Resource allocation)เป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดการกับทรัพยากรโครงการประเภทต่าง ๆที่มีอยู่อย่างจำนวนจำกัด 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:

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

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

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:

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

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

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

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

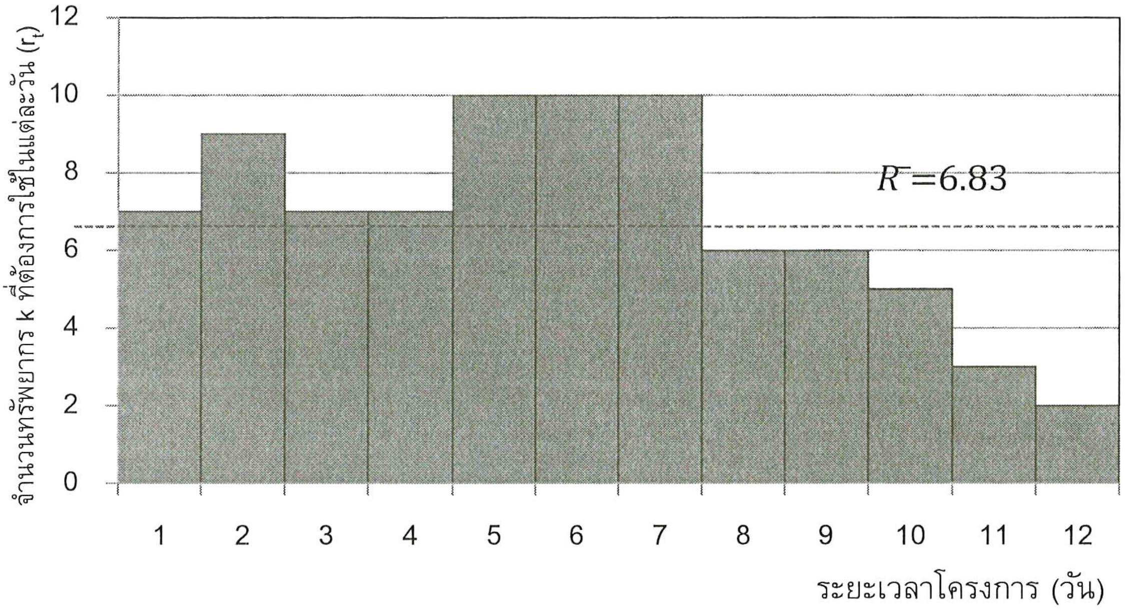
r_i = จำนวนทรัพยากรที่ต้องการใช้ของกิจกรรมที่ i

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:

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

$$M_x = \sum_t^T (r_t)^2$$ **สมการที่ (2.25)**

$$M_y = \sum_t^T (r_t \cdot (t - d))$$ **สมการที่ (2.26)**

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

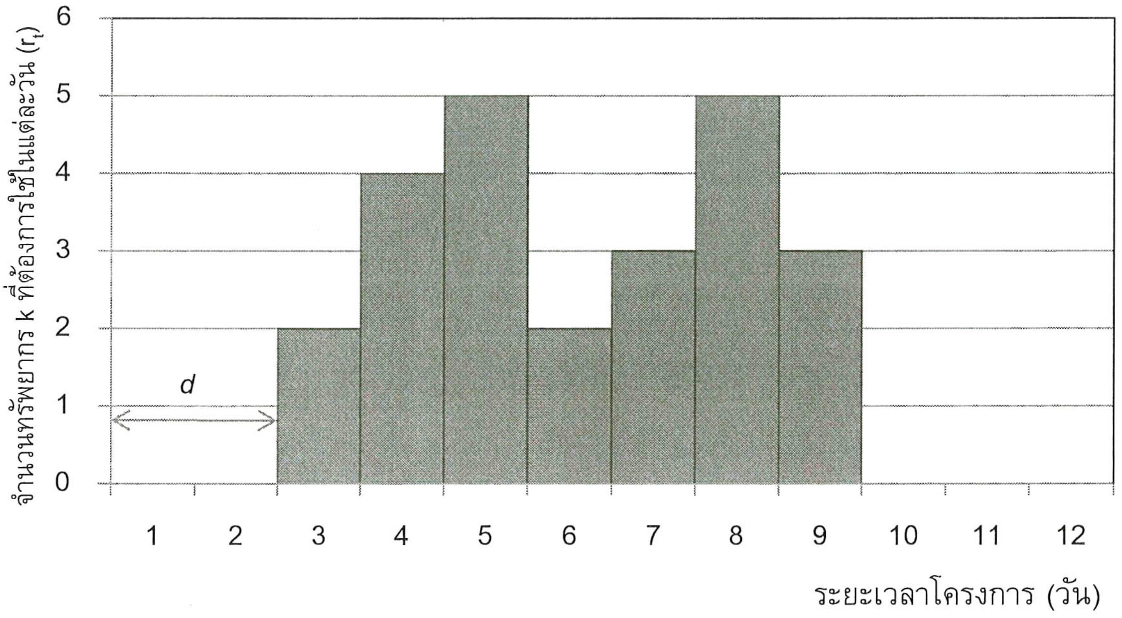
Activity dependency

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

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

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

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

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

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

N_t = ยอดกระแสเงินสด(สุทธิ)สะสม หลังรวมกระแสเงินเข้า ที่ขณะเวลา t

E_t= กระแสเงินสดออก ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t

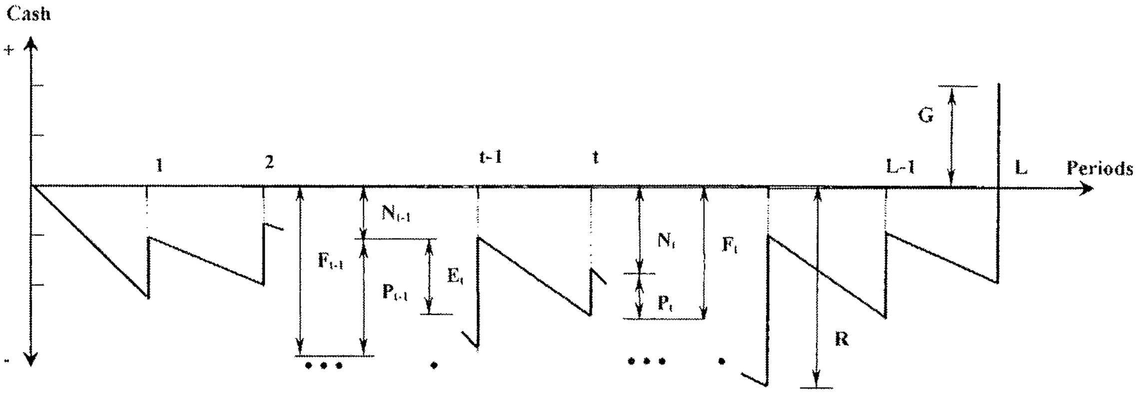
P_t = กระแสเงินสดเข้า ที่เกิดขึ้นภายในช่วงเวลา t

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 t ใดๆ สมการที่ใช้ในการคำนวณกระแสเงินสดจะเปลี่ยนไปเป็นดังนี้ ทั้งนี้รูปที่ 2.16 ได้แสดง profile ของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นที่ช่วงเวลาต่างๆ พร้อมทั้งแสดงการอ้างอิงของตัวแปรต่างๆ

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

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

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

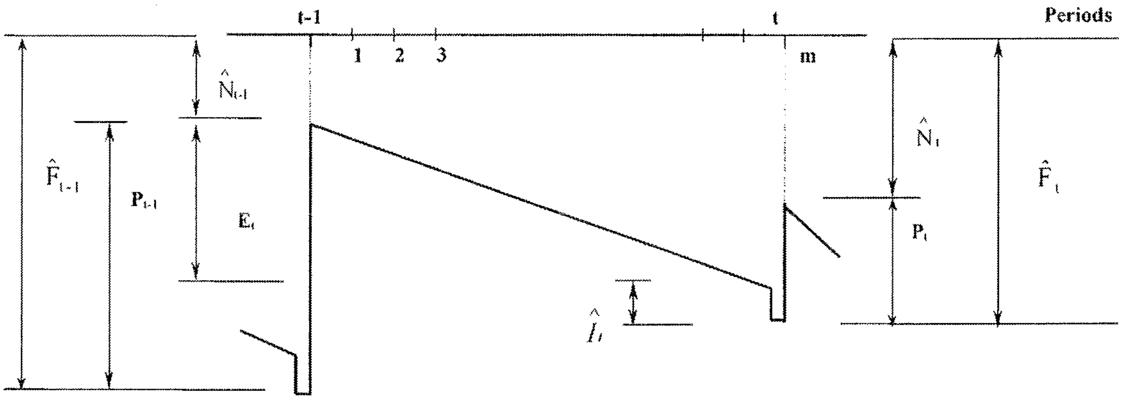
โดยที่ให้ I_t = ดอกเบี้ยที่คิดจากยอดเงินกู้ที่ขณะเวลา t

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 เป็นปัญหาที่ใช้กำหนดหาวันเริ่มที่เร็วที่สุดของกิจกรรมต่างๆ 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:

$$Maximize\ N_L \qquad \text{สมการที่ (2.34)}$$

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

$\sum_i(R_{ik}) \leq RR_k$

Activity dependency

โดยที่ให้ R_{ik} คือจำนวนทรัพยากรประเภทที่ k ที่กิจกรรมที่ i ต้องการใช้

N_L คือยอดเงินสุทธิที่รอบเวลาสุดท้าย (L)

$\widehat{F}_t$ 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) และเงื่อนไขด้านเวลาซึ่งงานวิจัยต่าง ๆ ที่พัฒนาโมเดลปัญหาการวางแผนงานมักจะสมมติให้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมเป็นแบบอย่างง่ายคือแบบ 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:

$$\boldsymbol{Minimize}(\dots\dots + \boldsymbol{w}_1 \sum_{i \in ASAP} \boldsymbol{S}_i - \boldsymbol{w}_2 \sum_{i \in ALAP} \boldsymbol{F}_i) \quad \text{สมการที่ (2.42)}$$

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 : $$\boldsymbol{s}_i \geq \boldsymbol{D}_i \quad \text{สมการที่ (2.43)}$$

MSO+D_i : $$\boldsymbol{s}_i = \boldsymbol{D}_i \quad \text{สมการที่ (2.44)}$$

SNLT+D_i : $$\boldsymbol{s}_i \leq \boldsymbol{D}_i \quad \text{สมการที่ (2.45)}$$

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 รวมทั้งช่วยให้ผู้วางแผนสามารถเลือกใช้เงื่อนไขด้านเวลาต่าง ๆสำหรับกิจกรรมหนึ่งใด ๆได้อย่างอิสระตามที่ต้องการ

2.2.6 การบูรณาการโมเดลปัญหาการวางแผน

งานวิจัยที่ผ่านมามักสร้างโมเดลปัญหาและหาคำตอบด้วยวิธีการแบบ Analystical หรือ Heuristic และเลือกกระทำกับเป้าหมายอย่างใดอย่างหนึ่ง (ดังที่ได้ทบทวนในหัวข้อที่ผ่าน ๆมา) 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 เป็นวิธีที่เรียบง่ายใช้เวลาไม่มากในการหาคำตอบและมีประสิทธิภาพ 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

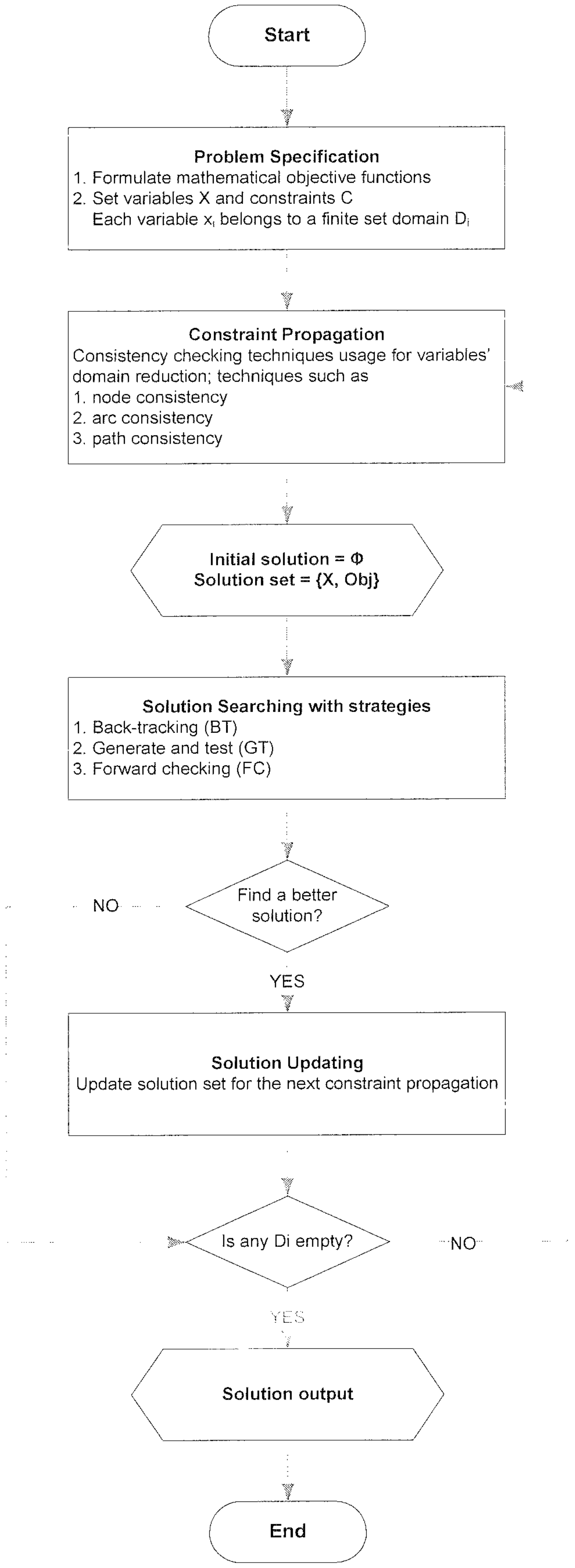
ในความเป็นจริงแล้ว แผนงานของโครงการก่อสร้างหนึ่ง มักนำมาสร้างได้เป็นโมเดลปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ดูจะเป็นวิธีการที่เหมาะสม ทำให้สามารถสร้างโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานเพื่อทำให้ง่าย (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) หดแคบลงเรื่อย ๆ จนได้ Optimal solutions ในที่สุด รูปที่ 2.17 แสดงขั้นตอนการหาคำตอบของวิธี CP



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)

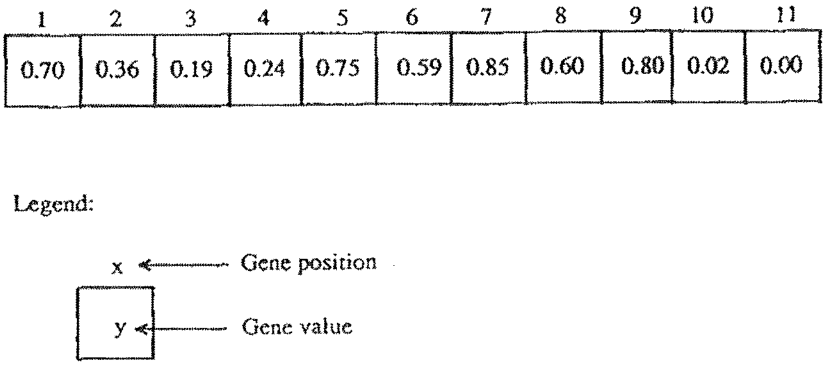
(H. Zhang and H. Li 2004) ได้สนับสนุนการใช้ Simulation สำหรับวางแผนงานก่อสร้างเนื่องจากสามารถใช้ทดสอบนโยบาย (กฎ) การจัดสรรทรัพยากรเพื่อหานโยบายที่เหมาะสมได้ ก่อนนำไปใช้จริง ถึงแม้ว่าวิธี Simulation จะมีข้อดีตรงที่ไม่ต้องสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยาก แต่ก็มีข้อเสียที่ให้ผลลัพธ์เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (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

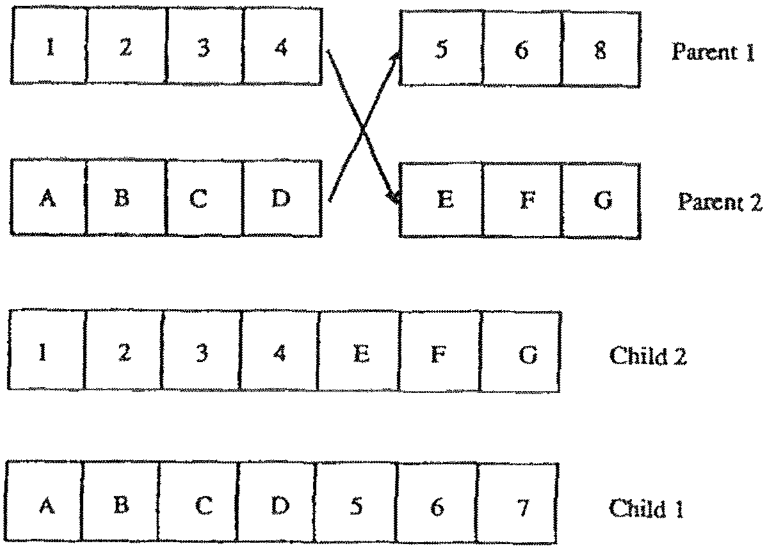
2.4.3 Genetic algorithms

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 ซึ่งหาก เป็นไปตามสมมติฐานก็จะทำให้การถ่ายทอดโครโมโซมต่อๆกันเป็นรุ่นไม่สูญเปล่าแต่ได้คำตอบที่ดีขึ้นเรื่อยๆ 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 การเข้ารหัสแผนงานเป็นโครโมโซมจึงเป็นการแบ่งที่ทำให้โครงสร้างของเน็ตเวิร์คหายไป 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

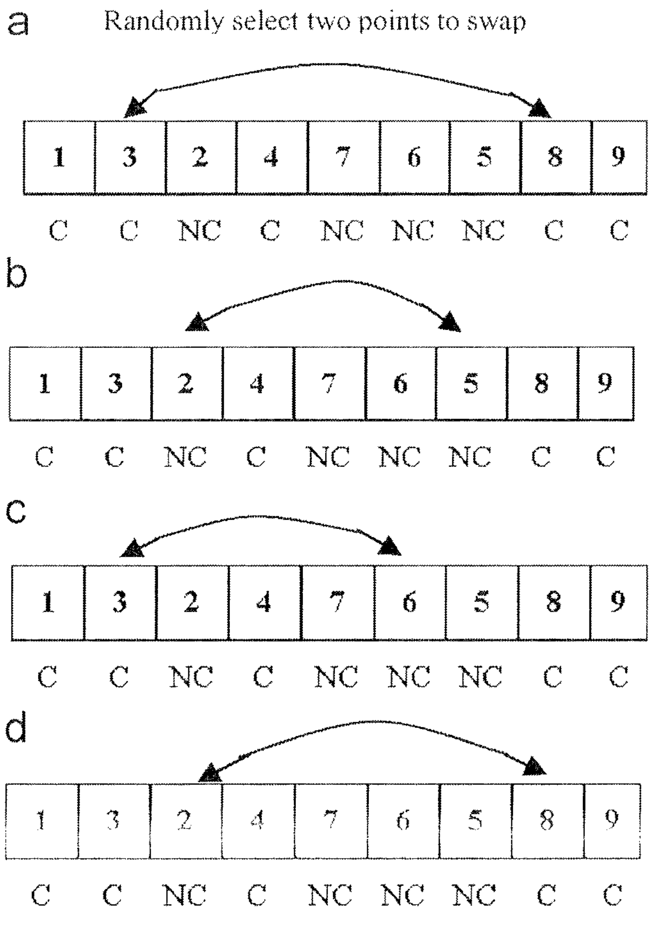
ในบางกรณี Tabus ที่บันทึกไว้ก็อาจส่งผลให้การค้นหาไม่สามารถ move ไปสู่ global optimum ได้ และเป็นการห้ามการ move ที่ไม่ได้ทำให้เกิดการ cycling จึงทำให้ต้องกำหนด “ข้อยกเว้น” (Aspiration Criteria) ที่ใช้สำหรับยกเลิก Tabus ในกรณีที่มีเหตุสมควรได้ Aspiration Criteria นี้มักจะกำหนดขึ้นโดยทั่วไปคือ อนุญาตให้ยกเลิก 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)

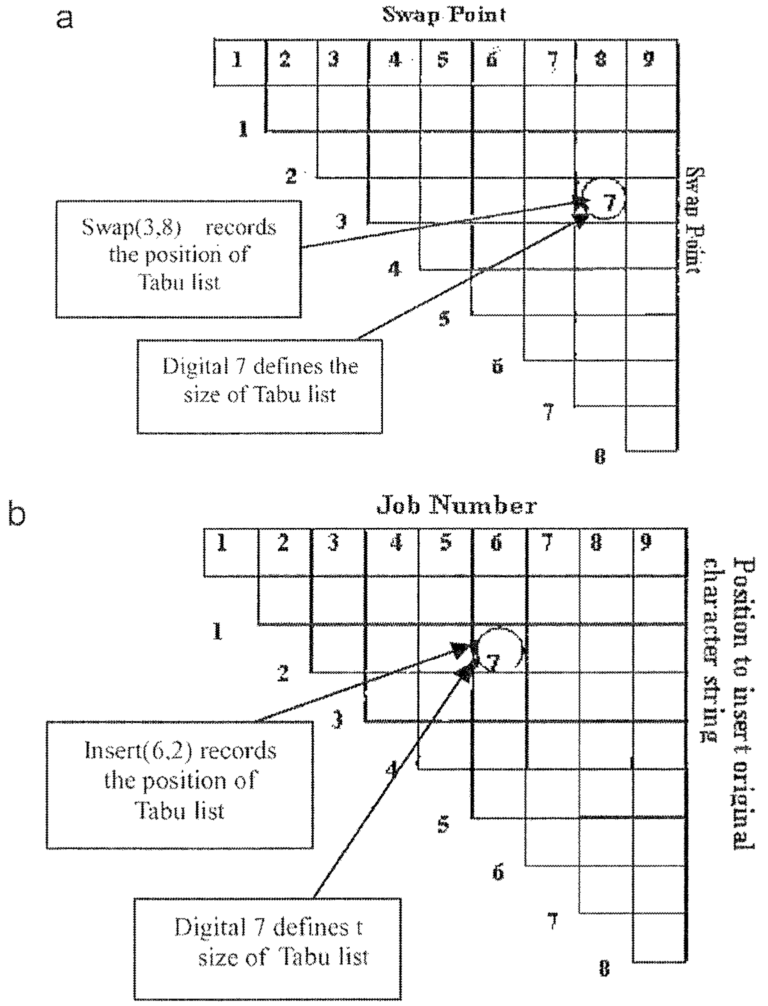
Swap Move คือการสุ่มเลือกตำแหน่งของสายตัวอักษร (ที่ใช้แทนลำดับการดำเนินกิจกรรมก่อสร้าง) 2 ตำแหน่งใดๆ แล้วสลับค่าของตัวอักษรของทั้งสองตำแหน่งนั้น เกิดเป็นสายตัวอักษรใหม่ขึ้นมา ทั้งนี้การสุ่มเลือกตำแหน่งอาจกำหนดให้สุ่มเลือกระหว่าง C กับ C, NC กับ NC, C กับ NC, NC กับ C ก็ได้ อย่างไรก็ตามการ Move ในบางครั้งอาจทำให้เกิดเป็น 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 ที่เกิดขึ้นในรอบที่ผ่านๆมา และจะไม่อนุญาตให้มี 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 โดยที่ไม่ใช่ปฏิบัติการทางพันธุกรรม (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

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

$$X_i(t) = V_i(t) + X_i(t-1)$$ **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

$$X_i(t) = \{x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t), \ldots, x_{iN}(t)\}$$ สมการที่ (2.51)

$$V_i(t) = \{v_{i1}(t), v_{i2}(t), v_{i3}(t), \ldots, v_{iN}(t)\}$$ 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

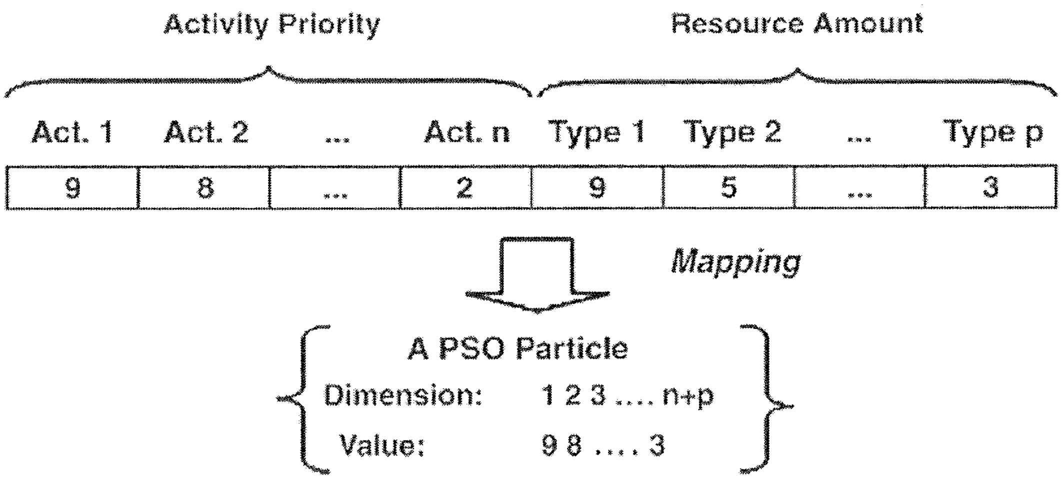
Permutation-based representation เป็นการเข้ารหัสด้วยการจัดเรียงลำดับกิจกรรมที่ต้องเริ่มดำเนินการ ดังนั้นในสายของตัวอักษรที่ใช้แสดงแทน particle หนึ่งใดๆ จะใช้ค่าตำแหน่งแทนลำดับการเริ่มดำเนินการ และค่าของตัวเลขแทนตัวกิจกรรม ดังรูปที่ 2.23 จะได้ว่า particle ที่ 1 ให้เริ่มดำเนินการกิจกรรมที่ 1, 3, 5, 4, 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 อย่างไรก็ตามยังอาจเพิ่มเติมการเข้ารหัสเพื่อเป็นค่าจำนวนทรัพยากรประเภทต่าง ๆที่ควรจัดหาไว้ด้วย 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 ได้ไปพร้อม ๆกันในคราวเดียว



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);

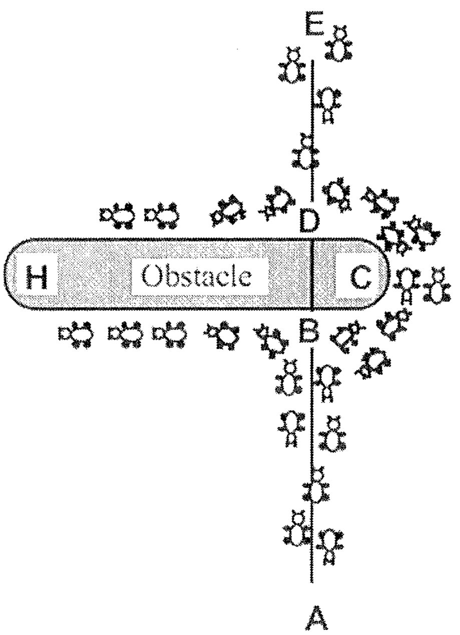
For each individual i ∈ N: calculate fitness (i);

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



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∈1, 2,., m) แสดงด้วยสายตัวอักษร มดแต่ละตัวจะถูกประเมินค่าด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ค่าความเข้มข้นของ pheromone ขึ้นอยู่กับเส้นทางที่มดเลือกเดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางที่ให้ค่าคำตอบที่ดี

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

โดยที่ให้ t = จำนวนรอบของการค้นหา มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง T

T = จำนวนรุ่นของมด หรือรอบในการค้นหาทั้งหมด

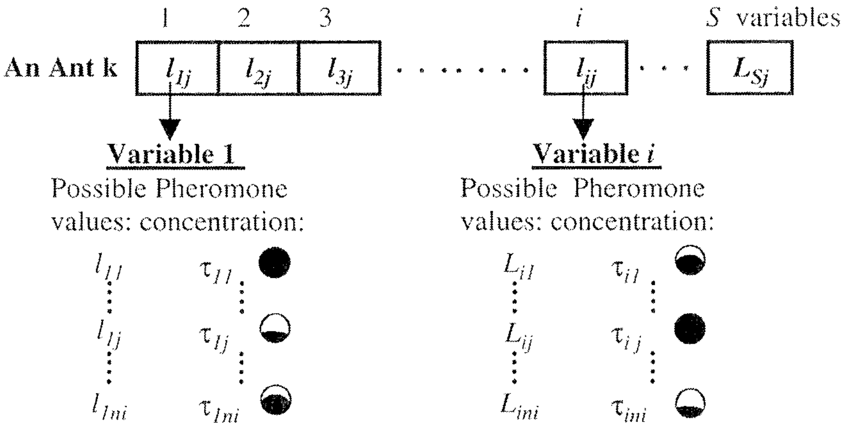
$\tau_{ij}(t)$ = ค่าความเข้มข้นของ pheromone ประจำเส้นทางย่อย i-j ในรุ่นที่ t ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปทุก ๆรุ่นของมด

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

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

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

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

กระบวนการพัฒนากบจะเกิดขึ้นเป็นรอบ ๆ โดยแต่ละรอบจะมุ่งไปที่เฉพาะกบที่ไม่ดี (X_w) เท่านั้น ซึ่งจะพัฒนาด้วยการปรับตำแหน่งของกบตัวที่ไม่ดีนั้น ขนาดของการเปลี่ยนตำแหน่งเป็น D_i

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

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

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 โดยเลือกสัมภาษณ์ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบในการวางแผนงานหรือกลยุทธ์ในการทำงานมีรายละเอียดดังนี้

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

2. บริษัท ซินเทคคอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) เป็นบริษัทรับเหมาก่อสร้างงานอาคารสูง โดยสัมภาษณ์กับคุณวีรพงษ์ ตั้งเบญจาภิกุล 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

ประเด็นในการศึกษาที่ปรากฎอยู่ในแบบสอบถามประกอบด้วย

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. มีมาตรฐานการแบ่งโครงสร้างรายงานออกเป็นส่วนย่อย ๆ (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

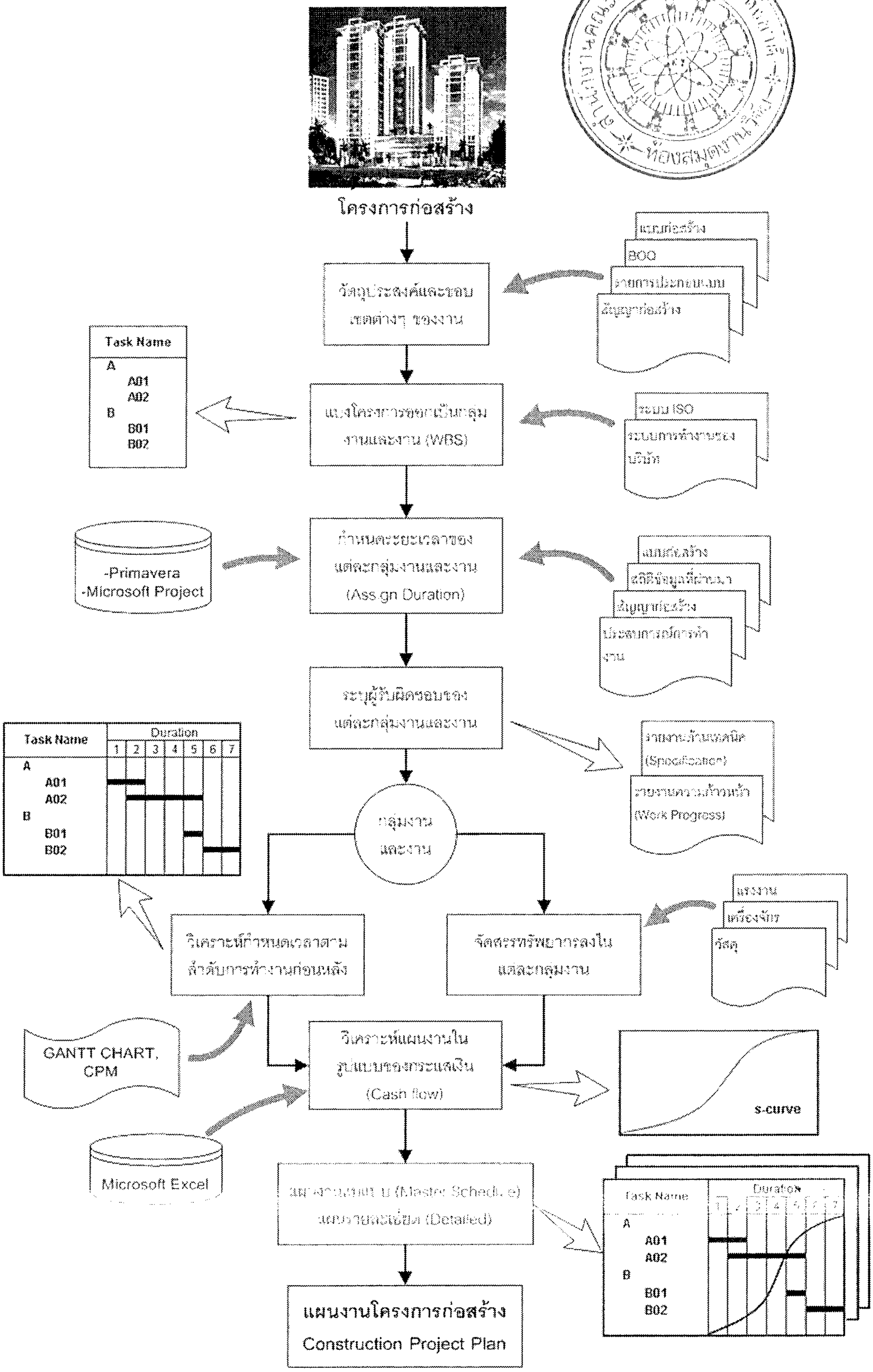
กระบวนการและข้อมูลที่ใช้ในการวางแผนงานโดยสรุปแยกตามบริษัท

บริษัท Black and Veatch ใช้แหล่งข้อมูลในการวางแผนงาน ได้แก่ แบบก่อสร้าง รายการประกอบแบบและการประชุมหัวหน้างาน ในการวางแผนยังได้พิจารณาเรื่องระยะเวลาและการใช้ทรัพยากรโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อชั่วโมงของทรัพยากร แต่ไม่พิจารณากระแสเงินสดส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดค่าใช้จ่ายในแต่ละเดือนได้อย่างถูกต้อง ในการพิจารณาเรื่องระยะเวลาได้คำนึงถึงระยะเวลาตามสัญญาเพียงอย่างเดียวโดยใช้ข้อมูลจากสถิติของโครงการที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

บริษัท Syntec Construction และบริษัท 27 วิศวกรรม ใช้แหล่งข้อมูลในการวางแผนงานได้แก่ 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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย



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	Stochasticall y 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/Subcon tracting
(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 optimization	
(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 programming	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 programming	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 optimization	
(Hong Zhang, Tam, and Heng Li 2006)	Activity execution methods	Project finish time	Precedent relationship constraints + resource availability	Particle swarm optimization	
(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 ความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมก่อสร้างต่าง ๆนั้นเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ว่าเป็นอยู่จริง 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 กิจกรรมก่อสร้างต่าง ๆทั่วไปมักมีวิธีดำเนินการที่แน่นอน 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 ทั้งนี้ต้นทุนทางตรงส่วนที่เป็นค่าวัสดุควรจะเท่าเดิมและเท่ากันในทุก ๆทางเลือกส่วนผสมของทรัพยากร

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

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

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

ดังนั้นจึงเสมือนกับโมเดลปัญหา TCT เป็นการ tradeoff ระหว่างเวลากับ จำนวนทรัพยากรดำเนินงานที่ใช้

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

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

สำหรับโมเดลปัญหา RCPSP ซึ่งแบ่งออกได้เป็น Resource allocation และ Resource leveling นั้นมีจุดร่วมกันบางประการ คือใช้ตัวแปรตัดสินใจเป็นการกำหนดหาวันเริ่มของกิจกรรมต่าง ๆ (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) เป็นโมเดลที่พิจารณากระแสเงินสดของโครงการที่เกิดขึ้นตามระยะเวลาต่าง ๆของโครงการ โดยจะต้องถูกจำกัดให้ไม่เกินกว่าวงเงินเครดิตที่มีอยู่ กระแสเงินสดจัดเป็นทรัพยากรของโครงการประเภทหนึ่งที่สำคัญและต้องอยู่ภายในข้อจำกัดวงเงินเครดิตที่มีอยู่ โมเดลนี้จึงมีแนวคิดและลักษณะคล้ายคลึงกับโมเดลปัญหา Resource allocation อย่างไรก็ตาม การบริหารกระแสเงินสดควรพิจารณาที่ระดับบริษัทมากกว่าจะเป็นที่ระดับโครงการ และนอกจากนี้หากบริษัทมีเงินทุนหมุนเวียนอยู่บ้างอาจทำให้ความต้องการกู้เงินน้อยลงหรือไม่จำเป็นเลย โมเดลปัญหานี้มีความน่าสนใจแต่การคำนวณกระแสเงินสดก็ขึ้นอยู่กับสมมติฐานหลายประการ เช่น ส่วนประกอบของประเภทต้นทุน ระยะเวลาเครดิตของต้นทุนประเภทต่าง ๆ การส่งมอบงาน และเงินงวดงาน เป็นต้น จึงอาจทำให้ความน่าเชื่อถือของผลคำตอบที่ได้ลดลง

โมเดลปัญหาที่รวมเอาเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาของกิจกรรม (Generalized activity relationships and constraints) เป็นโมเดลที่ถูกสร้างขึ้นให้สามารถจัดการกับเงื่อนไขพิเศษด้านเวลาต่าง ๆของกิจกรรมที่อาจต้องใช้ในการวางแผน โดยความสามารถนี้มีอยู่ในโปรแกรมช่วยวางแผนทั่วไปอยู่แล้ว หากแต่โมเดลปัญหาที่งานวิจัยต่าง ๆที่ผ่านมานำเสนอมักพิจารณาให้มีเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมแบบปกติคือ แบบ Finish-to-start จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่สามารถทำให้โมเดลปัญหา Optimization สามารถจัดการกับรูปแบบความสัมพันธ์ที่หลากหลายและเงื่อนไขด้านเวลาแบบต่าง ๆที่อาจถูกกำหนดขึ้น อย่างไรก็ตาม แผนงานที่ดีไม่ควรมีความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่หลากหลายและซับซ้อน เพราะจะทำให้เข้าใจยากและไม่สะดวกในการนำแผนงานไปใช้ปฏิบัติจริง หากแต่ควรวางแผนให้เรียบง่ายที่สุด ในบางกรณีอาจทดแทนการใช้ความสัมพันธ์และเงื่อนไขด้านเวลาที่ซับซ้อน ด้วยการปรับเปลี่ยนการแบ่งกิจกรรมออกมาใหม่ หรือการเปลี่ยนคู่ความสัมพันธ์ให้ง่ายลง

โมเดลปัญหาการวางแผนแบบบูรณาการ (Integrated model) ด้วยการรวมลักษณะโมเดลปัญหาต่างประเภทเข้าด้วยกัน เพื่อให้ประเด็นปัจจัยด้านต่าง ๆที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนโครงการก่อสร้างได้รับการพิจารณาไปพร้อม ๆกันอย่างรอบด้าน 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