การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ

นายรัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4553-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODELS FOR DRAINAGE TUNNELING PROJECT PLANNING

Mr. Rattapong Sarutirattanaworakun

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4553-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ
โดย	นายรัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ช่อวิเชียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิง คุณะวัฒน์สถิตย์)

รัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล : การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำ. (DEVELOPMENT OF SIMULATION MODELS FOR DRAINAGE TUNNELING PROJECT PLANNING)
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์, 283 หน้า. ISBN 974-17-4553-2.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์เริ่มจากการหาระดับชั้นการจัดการ (Hierarchy) งานก่อสร้างอุโมงค์ที่นำมาใช้ในแบบจำลองสถานการณ์ โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ในระดับขั้นตอนการทำงาน (Work Task Level) จากนั้นจึงทำการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลก่อสร้างของโครงการ และใช้แผนภูมิการไหล (Flow Chart) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ ต่อมาจึงสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ 2 ประเภท ได้แก่ State-Based Simulation Model และ Discrete-Event Simulation Model จากนั้นจึงตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์ดังกล่าว

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งได้พัฒนาขึ้นทั้ง 2 ประเภท ได้นำไปประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาซึ่งเป็นโครงการกรณีศึกษา ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์พบว่า Discrete-Event Simulation Model ให้ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 10.27 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่อัตราการก่อสร้างจริงมีค่าเท่ากับ 9.53 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 7.86% สำหรับ State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic มีค่าประมาณ 12.82 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง มีค่า MAPE เท่ากับ 34.52% และ State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าประมาณ 13.50 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง มีค่า MAPE เท่ากับ 41.66% ในขณะที่วิธีวิเคราะห์ของบริษัทก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษามีค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าจริงน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 13.71 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และมีค่า MAPE เท่ากับ 43.86%

นอกจากการนำแบบจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้วิเคราะห์โครงการกรณีศึกษาโดยทำการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ วิเคราะห์ค่าอัตราการใช้งานเครื่องจักร (Utilization Rate) และผลที่ได้จากการปรับปรุงการทำงานของโครงการ ต่อมาจึงนำเสนอแนวทางการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ สำหรับผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละแนวทางจะถูกนำไปวิเคราะห์ข้อดีและข้อจำกัดเพื่อให้ได้แผนงานที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต รัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

4670455021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SIMULATION / TUNNELING / PLANNING

RATTAPONG SARUTIRATTANAWORAKUN : DEVELOPMENT OF SIMULATION MODELS FOR DRAINAGE TUNNELING PROJECT PLANNING. THESIS ADVISOR : ASST.PROF VEERASAK LIKHITRUANGSILP, Ph.D., 283 pp. ISBN 974-17-4553-2.

The objective of this research is to develop a tunneling simulation model that can be used efficiently for tunnel construction in Thailand. The model development begins with the selection of an appropriate hierarchical level of tunneling. Herein, we focus on the work task level by collecting and analyzing construction data using a flow chart to create the relation between tunneling procedures. This research introduces two types of simulation models: state-based simulation model and discrete-event simulation model. The developed model is then verified and validated.

By applying the above procedure to a case study, the Saensaeb and Lat Phrao canals to the Chao Phaya river tunneling project, the simulation results show that the developed discrete-event simulation model can provide the most accurate estimate of 10.27 meter/12 hr-shift with 7.86% Mean Absolute Percentage Error (MAPE) as compared with the actual tunnel advance rate of 9.53 meter/12 hr-shift. The state-based simulation model analyzed by the probabilistic method yields the average tunnel advance rate of 12.82 meter/12 hr-shift with 34.52% MAPE, whereas the result from the deterministic method yields the average tunnel advance rate of 13.50 meter/12 hr-shift with 41.66% MAPE. The analytical method used by the contractor provides the least accurate estimated tunnel advance rate of 13.71 meter/12 hr-shift with 43.86% MAPE.

In addition to evaluating the performance of the project (i.e., tunnel advance rate and project duration), the proposed model is used to analyze the relation between excavation rates of TBM and tunnel advance rates as well as project duration, the utilization rate of machines, and analyze the outcomes from the improved construction processes of the project. The model can also provide appropriate alternative construction plans as well as their advantages and limitations so that the most appropriate construction plan can be obtained.

Department Civil Engineering Student's signature Rattapong Sarutirattanaworakun

Field of study Civil Engineering Advisor's signature Veerasak

Academic year 2005

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ลิขิตเรืองศิลป์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และเสนอแนะแนวทางในการทำงาน ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ช่อวิเชียร รองศาสตราจารย์ ดร.วิศณุ ทรัพย์สมพล รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิง คุณะวัฒน์สถิตย์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยโดยสมบูรณ์

ผู้เขียนสำนึกในพระคุณของบิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้เขียนจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอสำนึกในพระคุณของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ให้แก่ผู้เขียน

ท้ายสุดนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณชาญวุฒิ มโนพิมพ์ วิศวกร 4 สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร คุณเฉลิมเดช วัฒนกิจยิ่งยง และคุณวรวุธ รามัญเพ็ง วิศวกรอุโมงค์กิจการร่วมค้า Italian-Thai Development และ Nishimatsu Construction (IN Joint Venture) โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ที่ได้ให้เวลาและอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลสำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จ

คุณความดีและคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้เป็นสิ่งตอบแทนต่อผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฑ
สารบัญรูป..... ณ

บทที่

1. บทนำ..... 1
   1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 2
   1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3
   1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3
   1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 3
   1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

2. การทบทวนแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 6
   2.1 แนวคิดและทฤษฎีของแบบจำลองสถานการณ์..... 6
      2.1.1 ระบบ (System)..... 6
      2.1.2 ชนิดของระบบ (Type of System)..... 7
      2.1.3 แบบจำลองสถานการณ์..... 7
      2.1.4 แบบจำลองสถานการณ์กับการประมาณระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้าง... 7
      2.1.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์..... 8
   2.2 รายละเอียดโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์
      ที่ใช้ในงานวิจัย..... 10
      2.2.1 เครื่องมือพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม
         Stroboscope..... 10
      2.2.2 กระบวนการทำงานของโปรแกรม Stroboscope..... 12

บทที่ หน้า

2.3 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 14
2.3.1 การพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์.....15
2.3.2 การนำโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการวางแผน งานก่อสร้าง..... 25
2.4 สรุปท้ายบท..... 29

3. กระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ Tunnel Boring Machine (TBM).....31
3.1 การพิจารณาเลือกใช้ TBM.....31
3.2 ชนิดของ TBM.....31
3.2.1 Open-Face TBM.....31
3.2.2 Closed-Face TBM..... 32
3.3 ชนิดฟันขุดเจาะของ Closed-Face TBM.....33
3.4 ส่วนประกอบหลักของ EPB TBM..... 34
3.4.1 Front Body.....34
3.4.2 Middle Body..... 35
3.4.3 Rear Body..... 35
3.5 ระบบสนับสนุนการทำงานของ EPB TBM..... 36
3.5.1 สายพานลำเลียงดิน..... 36
3.5.2 เครื่องค้ำยันดาดผนังอุโมงค์..... 36
3.5.3 Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment..... 36
3.5.4 Backup System..... 36
3.6 การปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะของ EPB TBM.....39
3.7 อัตราการลำเลียงดินของสกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดิน..... 40
3.8 การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting)..... 40
3.8.1 Primary Grouting..... 41
3.8.2 Secondary Grouting..... 41
3.9 การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์..... 43
3.9.1 Primary Segment Lining..... 43

บทที่ หน้า

3.9.2 Secondary Segment Lining..... 44
3.10 การนำดินไปทิ้งและขนส่งดาดผนังอุโมงค์.....44
3.11 การต่อรางสำหรับขบวนรถจักรและรางสำหรับตู้ Backup System.....45
3.12 การสำรวจและตรวจสอบอุโมงค์.....46
3.12.1 การสำรวจแนวอุโมงค์และแนวระดับ..... 46
3.12.2 การตรวจสอบทางธรณีวิทยา..... 47
3.13 สรุปท้ายบท.....47

4. การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์..... 48
4.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์..... 48
4.2 การวิเคราะห์ระดับชั้นการจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในแบบจำลอง สถานการณ์.....50
4.3 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....51
4.3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล.....51
4.3.2 ประเภทของข้อมูล..... 52
4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมิน ระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์.....54
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ แผนภูมิการไหล.....57
4.5 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model.....58
4.6 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model.....60
4.6.1 Resource and Decision Parameters..... 60
4.6.2 Auxiliary Parameters.....62
4.6.3 Resource Types.....63
4.6.4 Network Nodes.....64
4.6.5 Network Links.....65
4.6.6 General Section of the Tunneling Simulation..... 65

บทที่ หน้า

4.6.7 Specific Section of the Tunneling Simulation……..…68
4.6.8 Tunneling Durations…… 68
4.6.9 QUEUE Initialization and Simulating…… 69
4.6.10 Printing Results……69
4.7 การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์…… 70
4.7.1 การตรวจสอบความถูกต้อง…… 70
4.7.2 การทดสอบความถูกต้อง…… 71
4.8 สรุปท้ายบท…… 73

5. การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา……..……..74
5.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา…….. 77
5.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล…….…….. 80
5.2.1 ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา…….. 81
5.2.2 ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา……..…… 87
5.2.3 ข้อมูลแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา…..99
5.2.4 ข้อมูลจากสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา……..… 104
5.2.5 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB……. 107
5.3 สรุปท้ายบท……..110

6. แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model……..……..112
6.1 การใช้แผนภูมิการไหลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา……112
6.1.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์……113

บทที่ หน้า

6.1.2 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์..... 117
6.1.3 แผนภูมิการไหลกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง..... 117
6.2 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา..... 119
6.2.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1..... 126
6.2.2 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 2..... 128
6.2.3 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 3..... 130
6.2.4 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 4..... 131
6.2.5 การสรุปผลการวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model..... 133
6.3 สรุปท้ายบท..... 134

7. แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model..... 136
7.1 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา..... 136
7.1.1 ขั้นตอนการเดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร..... 137
7.1.2 ขั้นตอนการเดินทางไปรับดินและส่งดาดผนังอุโมงค์ให้ TBM ที่หน้าอุโมงค์ของขบวนรถจักร..... 139
7.1.3 ขั้นตอนการทำงานที่หน้าอุโมงค์ของขบวนรถจักร..... 140
7.1.4 ขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์และติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ของ TBM..... 141
7.1.5 ขั้นตอนการเดินทางกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร..... 142
7.1.6 ขั้นตอนการทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร..... 142
7.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model..... 144

บทที่ หน้า

7.3 การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model..... 146
7.4. การประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model สำหรับวิเคราะห์และวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์..... 149
7.4.1 การวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษา..... 149
7.4.2 การวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก..... 157
7.5 สรุปท้ายบท..... 162

8. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ..... 163
8.1 สรุปผลการศึกษา..... 163
8.2 ข้อเสนอแนะ..... 169

รายการอ้างอิง..... 171
ภาคผนวก..... 174
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรและการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา..... 175
ภาคผนวก ข พารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model..... 189
ภาคผนวก ค แบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา... 206
ภาคผนวก ง สัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา..... 228

บทที่ หน้า

ภาคผนวก จ ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้สร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้าง อุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา.....253

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....283

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้โปรแกรม Stroboscope……..……11

2.2 เครื่องมือพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Stroboscope.....11

2.3 การใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานก่อสร้าง……..…..30

4.1 ค่า k ที่ใช้ในสมการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่าง……..……..……..55

5.1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการกรณีศึกษา……74

5.2 ข้อมูลสภาพชั้นดินของโครงการกรณีศึกษา……..…..81

5.3 ข้อมูลแนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive……..82

5.4 พารามิเตอร์นำเข้าระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบของ TBM……83

5.5 ข้อมูล TBM ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา……..84

5.6 ข้อมูลขบวนรถจักรที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา……85

5.7 ข้อมูลตู้ Backup System ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา……86

5.8 ข้อมูลรางสำหรับขบวนรถจักรและรางพักที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา……..……87

5.9 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึก
การทำงานของ TBM……..…..89

5.10 พารามิเตอร์นำเข้าอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงาน
ของ TBM……..…… 89

5.11 ข้อมูลอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ต่อผลัดของโครงการจากบันทึกอัตราการก่อสร้าง
อุโมงค์และจากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์……91

5.12 ความถี่ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์
จากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด……..…96

5.13 พารามิเตอร์นำเข้าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อ
ผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์……97

5.14 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาสูญเสียของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพ
การก่อสร้างอุโมงค์……98

5.15 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์
ช่วง Main Drive……..…… 103

5.16 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการนำดินไปทิ้ง……..…105

ตารางที่ หน้า

5.17 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่..... 105
5.18 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร..... 106
5.19 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าจากการสัมภาษณ์วิศวกรของบริษัทก่อสร้าง
โครงการกรณีศึกษา.....107
5.20 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าจากการสัมภาษณ์วิศวกรของบริษัทก่อสร้าง
โครงการกรณีศึกษา..... 109
6.1 รายละเอียดแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based
Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา.....121
7.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้าง
อุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ด้วยวิธี MAPE..... 147
7.2 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ MAPE ทดสอบ
ความแม่นยำของวิธีประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์..... 148
7.3 ค่าประมาณระยะทางก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้าง
อุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โครงการกรณีศึกษา..... 150
7.4 ข้อมูลวันทำงานของโครงการกรณีศึกษาในช่วงระยะเวลาก่อสร้าง 80 วัน.....152
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับค่าประมาณ
อัตราการก่อสร้างอุโมงค์และค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์.....153
7.6 เวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงานของ TBM และขบวนรถจักร.....155
7.7 แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก.....158

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า
1.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย..... 5
2.1 วงรอบการทำงานของโปรแกรม Stroboscope..... 14
2.2 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MicroCYCLONE..... 16
2.3 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดินโดยใช้โปรแกรม Stroboscope.... 17
2.4 ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดิน โดยใช้โปรแกรม Stroboscope..... 17
2.5 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้โปรแกรม Simphony.....20
2.6 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำโดยใช้โปรแกรม RISim.....21
2.7 ตัวอย่างผังโครงข่ายย่อยของ Truck ในแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำ โดยใช้โปรแกรม RiSim.....22
2.8 โครงสร้างโปรแกรม KMOS.....23
2.9 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การขนส่งคอนกรีตจากโรงงานไปสู่ระบบลำเลียง คอนกรีตโดยใช้โปรแกรม KMOS..... 24
2.10 รูปแบบกล่องโต้ตอบของโปรแกรม KMOS.....25
3.1 Open-Face TBM.....32
3.2 Closed-Face TBM.....33
3.3 Cutter Bit..... 33
3.4 Roller Cutter Bit (Roller Disc Cutter).....34
3.5 ส่วนประกอบหลักของ EPB TBM.....35
3.6 ระบบสนับสนุนการทำงานของ EPB TBM..... 37
3.7 สายพานลำเลียงดิน..... 38
3.8 เครื่องค้ำยันดาดผนังอุโมงค์..... 38
3.9 Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment.....38
3.10 ตู้ Backup System.....39
3.11 ตำแหน่งหัวฉีดสารละลายปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะของ EPB TBM.....40
3.12 การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ 42

รูปที่ หน้า

3.13 โรงงานสำหรับใช้ผลิตวัสดุอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์..... 43
3.14 ดาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบครบเป็นวง.....43
3.15 Gantry Crane.....44
3.16 หัวรถจักร..... 45
3.17 รถขนถ่ายดินและรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์.....45
4.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์.....49
4.2 ระดับชั้นการจัดการงานก่อสร้าง..... 50
4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้
แผนภูมิการไหล.....57
4.4 ตัวอย่างแผนภูมิการไหล.....58
4.5 ตัวอย่างผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network.....58
4.6 ตัวอย่างผังโครงข่าย Precedence Network.....59
4.7 ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยใช้
โปรแกรม ProbSched..... 59
4.8 ขั้นตอนการตรวจสอบแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท
Discrete-Event Simulation Model.....72
4.9 ตัวอย่างการตรวจสอบด้วยวิธี Trace Simulation ของโปรแกรม Stroboscope.....72
5.1 สภาพชั้นดินโครงการกรณีศึกษา.....75
5.2 แนวเส้นทางโครงการกรณีศึกษา.....76
5.3 วิธีที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์แผนงาน
ก่อสร้างช่วง Main Drive ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์..... 78
5.4 วิธีที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์แผนงาน
ก่อสร้างช่วง Main Drive ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์..... 80
5.5 ปล่องขนถ่ายดินหลักต้นอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา..... 83
5.6 บันทึกการทำงานของ TBM.....90
5.7 รายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์..... 92
5.8 บันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์.....93
5.9 รายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด..... 94
5.10 ระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์..... 100

รูปที่ หน้า

5.11 กฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์..... 102
6.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งระบบสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์.....114
6.2 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วง Initial Drive..... 115
6.3 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วง Main Drive.....116
6.4 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์.....118
6.5 แผนภูมิการไหลกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง.....119
6.6 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 1.....122
6.7 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 1..... 124
6.8 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 ด้วยวิธี Probabilistic..... 127
6.9 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 2 ด้วยวิธี Probabilistic..... 128
6.10 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 3 ด้วยวิธี Probabilistic.....129
6.11 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 4 ด้วยวิธี Probabilistic.....130
6.12 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 5 ด้วยวิธี Probabilistic.....132
6.13 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาและจากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model.....134
7.1 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Model Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา..... 138
7.2 ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในแบบจำลองสถานการณ์โครงการกรณีศึกษา..... 139
7.3 ส่วนแสดงผลการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์..... 145
7.4 ส่วนแสดงผลทางสถิติ.....145
7.5 ส่วนแสดงผลข้อมูลทั่วไปของโครงการ..... 146
7.6 ค่าประมาณระยะทางก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โครงการกรณีศึกษา.....151

รูปที่ หน้า

7.7 Cumulative Distribution Function (CDF) ของค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตร จากต้นอุโมงค์..... 151
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์..... 154
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ที่ของ TBM กับระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์..... 154
7.10 เวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงานของ TBM และขบวนรถจักร..... 156
7.11 ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 และ 2..... 161
7.12 ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 และ 4..... 161

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

โครงการก่อสร้างอุโมงค์เป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนเกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้างในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน ปริมาณน้ำใต้ดิน และสิ่งกีดขวางแนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพการก่อสร้างอุโมงค์และเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมและยากต่อการคาดการณ์สภาพล่วงหน้าก่อนการก่อสร้างได้ นอกจากนี้ความสามารถในการก่อสร้างอุโมงค์ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวกับการวางแผนงานโครงการและประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ใช้ เช่น อัตราการขุดเจาะของเครื่องจักรกลขุดเจาะอุโมงค์ อัตราการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) อัตราเร็วของขบวนรถจักร และเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายดินขึ้นสู่พื้นดิน เป็นต้น อีกทั้งการก่อสร้างอุโมงค์ยังมีต้นทุนค่าก่อสร้างสูงกว่าการก่อสร้างระบบอื่นจึงส่งผลให้ในอดีตโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยมีไม่มากนัก แต่ในปัจจุบันนั้นพบว่าโครงการก่อสร้างอุโมงค์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ทั้งนี้เนื่องจากแนวคิดด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการก่อสร้างที่จะต้องกระทบต่อวิถีชีวิตของผู้คนในพื้นที่ก่อสร้างให้น้อยที่สุด การก่อสร้างระบบดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเพราะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและผู้คนในพื้นที่ก่อสร้างน้อยกว่าการก่อสร้างระบบอื่น นอกจากนี้อุโมงค์ยังเป็นระบบโครงสร้างพื้นฐานที่สามารถรองรับความต้องการใช้สาธารณูปโภคที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นความต้องการใช้ระบบรถไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์ส่งน้ำและระบายน้ำ และอุโมงค์รถยนต์บริเวณทางแยก เป็นต้น

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยส่วนใหญ่จำกัดพื้นที่อยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบลุ่ม ชั้นดินทั่วไปเป็นดินเหนียวอ่อน การขุดเจาะนิยมใช้เครื่องจักรกลขุดเจาะอุโมงค์ที่เรียกว่า Tunnel Boring Machine (TBM) มีการค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุลที่เรียกว่า Earth Pressure Balance (EPB) ซึ่งเป็นการใช้ดินที่ได้จากการขุดเจาะมาปรับปรุงคุณสมบัติด้านความหนืดให้เหมาะสมแล้วนำไปอัดด้วยความดันเพื่อค้ำยันป้องกันการพังทลายของดินหน้าอุโมงค์ กระบวนการก่อสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ กระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้งดิน และกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ โดยในแต่ละกระบวนการจะมีความสัมพันธ์กับกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการนำดินไปทิ้งจะเริ่มได้เมื่อ TBM ขุดเจาะดินได้เสร็จตามระยะที่กำหนดในแต่ละวงรอบ และในกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์เพื่อค้ำยันอุโมงค์จะเริ่มได้เมื่อ

รถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car) นำดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ที่ด้านหลัง TBM เพื่อรอการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว เป็นต้น

แนวทางหนึ่งที่สามารถใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพคือการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) เพื่อวางแผนและวิเคราะห์แผนงานก่อสร้าง เนื่องจากแบบจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบกระบวนการก่อสร้างที่มีขั้นตอนการทำงานซ้ำๆ และสามารถวิเคราะห์กระบวนการที่มีความสลับซับซ้อนและความไม่แน่นอนสูงได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้วิศวกรวางแผนและควบคุมการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถทดลองวางแผนงานก่อสร้างในรูปแบบต่างๆ ล่วงหน้า เช่น การทดลองเปลี่ยนขั้นตอนการทำงาน และการเปลี่ยนเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบเพื่อเลือกใช้แผนงานก่อสร้างที่เหมาะสมซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการก่อสร้างได้อีกทางหนึ่ง

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงการก่อสร้างอุโมงค์เป็นโครงการที่มีความไม่แน่นอนสูงเนื่องจากปัจจัยหลายประการที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงก่อให้เกิดความเสี่ยงในการวางแผนงานก่อสร้างทั้งในด้านการประมาณระยะเวลาก่อสร้างและต้นทุนค่าก่อสร้าง แนวทางหนึ่งที่สามารถใช้บรรเทาหรือกำจัดความเสี่ยงดังกล่าวได้คือการวิเคราะห์และวางแผนงานก่อสร้างโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ จากการศึกษางานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานอุโมงค์ในประเทศไทยเบื้องต้นพบว่าผลงานส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะเทคนิคการออกแบบและการก่อสร้างรวมไปถึงทางด้านธรณีวิศวกรรมเท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนและการจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมก่อสร้างและการจัดการรวมถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวางแผนและจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพนั้นยังมีอยู่อย่างจำกัดและเกือบทั้งหมดเป็นงานวิจัยในต่างประเทศ ตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าวได้แก่ งานวิจัยของ El-Choum และ Rumala (1997) ได้ทำการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้ระบบผู้เชี่ยวชาญมาช่วยในการตัดสินใจเลือกวิธีก่อสร้างอุโมงค์โดยคำนึงถึงปัจจัยหลัก 3 ประการได้แก่ อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอุโมงค์ และเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ งานวิจัยของ Nido และ Abraham (2000) ทำการศึกษาถึงการใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่พัฒนาโดยใช้โปรแกรม ProSidyc ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี Microtunneling ตามลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน งานวิจัยของ AbouRizk, Manavazhi และ

Dozzi (1997) ใช้โปรแกรม SLAM II ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละแผนงานก่อสร้างเพื่อเลือกแผนงานก่อสร้างที่ใช้เวลาในการก่อสร้างและเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

จากข้อจำกัดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์ในการวิเคราะห์และวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้สำหรับการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทย โดยผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ได้จริงซึ่งจะเป็นการพัฒนาเทคนิคทางด้านวิศวกรรมการก่อสร้างอุโมงค์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงการและวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกสำหรับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่การก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB (Earth Pressure Balance) ช่วง Main Drive ไม่รวมส่วนของการก่อสร้างอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ปล่องระบายอากาศ และระบบสนับสนุนการใช้งานอุโมงค์ เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเป็น 6 ขั้นตอนหลักแสดงในรูปที่ 1.1 โดยสรุปได้ดังนี้

(1) ศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่างๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์และการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์ในงานอุโมงค์ และศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

(2) วิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ที่ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยหรือใช้ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในอดีต และปัจจัยอื่นๆ ที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ภายในประเทศ

(3) วางแผนขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

(4) นำขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ที่ได้ไปใช้กับโครงการกรณีศึกษา ได้แก่ โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นโครงการของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร มีความยาวทั้งหมด 5,123.60 กิโลเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เมตร ก่อสร้างโดยใช้ TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB

(5) ใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกโครงการกรณีศึกษา

(6) จัดทำและเผยแพร่เอกสารสรุปผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ สามารถพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

(1) ประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

(2) วางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสมในระยะเวลาก่อสร้างที่กำหนด

(3) สามารถลดความเสี่ยงของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เนื่องจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์เป็นโครงการที่มีความไม่แน่นอนเกี่ยวข้องในหลายๆ ด้าน จึงก่อให้เกิดความเสี่ยงในการประมาณระยะเวลาก่อสร้าง ดังนั้นการใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในโครงการมาใช้ในการประมาณระยะเวลาก่อสร้างจะช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากความล่าช้าของโครงการลงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.1 ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การทบทวนแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในบทนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นแนวคิดและทฤษฎีของแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) ส่วนที่ 2 จะเป็นการอธิบายรายละเอียดของโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในงานวิจัย และส่วนที่ 3 จะเป็นการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีรายละเอียดดังนี้

2.1 แนวคิดและทฤษฎีของแบบจำลองสถานการณ์

แนวคิดและทฤษฎีของแบบจำลองสถานการณ์ได้อธิบายถึงความหมายและส่วนประกอบของระบบ ชนิดของระบบ ความหมายของแบบจำลองสถานการณ์ และการใช้แบบจำลองสถานการณ์ในการประมาณระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 **ระบบ** (System) เป็นกลุ่มของสมาชิกที่มีหน้าที่และทำงานร่วมกันเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์จะมีสมาชิกที่ประกอบด้วย Tunnel Boring Machine (TBM) ขบวนรถจักร สายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) และ Gantry Crane เป็นต้น โดยสมาชิกทั้งหมดจะต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้ก่อสร้างอุโมงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบหลักของระบบโดยทั่วไปมี 6 ส่วนดังนี้

- **ส่วนทำการ** (Entity) เป็นสมาชิกในระบบ ได้แก่ ทรัพยากรที่ใช้ในระบบ ประกอบด้วยส่วนทำการสถิต (Static Entity) เช่น ส่วนทำการสถิตของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ สายพานลำเลียงดิน เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) และเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter) เป็นต้น และส่วนทำการพลวัต (Dynamic Entity) เช่น TBM และขบวนรถจักร เป็นต้น
- **คุณสมบัติของส่วนทำการ** (Attribute) เป็นลักษณะเฉพาะของส่วนทำการแต่ละตัว เช่น คุณสมบัติอย่างหนึ่งของ TBM คือ อัตราเร็วในการขุดเจาะดิน เป็นต้น
- **กิจกรรม** (Activity) เป็นการกระทำหรือหน้าที่ของส่วนทำการแต่ละตัวในระบบ เช่น ขบวนรถจักรทำหน้าที่ขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง ในขณะที่ TBM ทำหน้าที่ขุดเจาะดิน เป็นต้น
- **สถานภาพของระบบ** (State of System) เป็นสภาพของระบบ ณ เวลาใดๆ
- **เหตุการณ์** (Event) เป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานภาพของระบบ

- **ลำดับการดำเนินการ** (List Processing) เป็นลักษณะแถวคอยของส่วนทำการพลวัตที่ไปใช้บริการส่วนทำการสถิต เช่น FIFO (First In First Out) และ FILO (First In Last Out) เป็นต้น

2.1.2 **ชนิดของระบบ** (Type of System) แบ่งได้เป็น 4 ชนิดตามลักษณะที่เกิดดังนี้

- Deterministic System เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานภาพที่แน่นอน สามารถคาดการณ์สถานภาพที่เปลี่ยนไปล่วงหน้าได้
- Stochastic System เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานภาพแบบสุ่มและไม่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุสถานภาพที่เปลี่ยนแปลงไปล่วงหน้าได้
- Continuous System เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานภาพอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับเวลา เช่น ระบบการขึ้นลงของระดับน้ำในแม่น้ำ เป็นต้น
- Discrete System เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานภาพ ณ ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งไม่ต่อเนื่องตลอดเวลา แบบจำลองชนิดนี้เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบส่วนใหญ่ในธรรมชาติ

2.1.3 **แบบจำลองสถานการณ์** เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หรือคาดการณ์พฤติกรรมของระบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยแบบจำลองสถานการณ์จะวิเคราะห์ระบบในลักษณะของขั้นตอนและวิธีการที่มีความสัมพันธ์กันแบบพลวัต ณ เวลาหนึ่งๆ สำหรับสมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะต้องได้มาจากระบบจริง การสร้างแบบจำลองชนิดนี้จะต้องแบ่งส่วนทำการหรือสมาชิกในแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวรับบริการที่เรียกว่า Transaction และตัวให้บริการที่เรียกว่า Facility ตัวอย่างเช่น สายพานลำเลียงดินเป็นตัวให้บริการทำหน้าที่ขนถ่ายดินเข้าสู่ขบวนรถจักรซึ่งเป็นตัวรับบริการในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น

2.1.4 **แบบจำลองสถานการณ์กับการประมาณระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้าง**

การประมาณระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้างนั้นโดยทั่วไปมี 3 วิธี วิธีแรกได้แก่ การใช้ประสบการณ์จากโครงการก่อสร้างในอดีตไปใช้ในการประมาณระยะเวลาและต้นทุน ข้อดีของวิธีนี้คือผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำแต่เสียค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลารวบรวมข้อมูลนาน ไม่มีแบบแผนที่แน่นอน และไม่สามารถใช้ได้กับทุกโครงการก่อสร้าง วิธีที่ 2 คือการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงเช่นเดียวกับวิธีแรกแต่จำเป็นต้องกำหนดกรอบสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองให้เหมาะสมและต้องใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงในการคำนวณ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จาก

วิธีนี้จึงมีความซับซ้อนทำให้การสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้จริงในงานก่อสร้างทำได้ยาก วิธีที่ 3 คือการใช้แบบจำลองสถานการณ์ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงเช่นเดียวกันแต่นำไปใช้งานได้ง่ายกว่าอีกทั้งต้นทุนในการสร้างแบบจำลองต่ำกว่าสองวิธีแรกและมีความยืดหยุ่นสูง

แบบจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหาอีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาได้หลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้ในการประมาณระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้างเพื่อช่วยในการวางแผนงานก่อสร้างดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สำหรับเหตุผลสำคัญที่ทำให้มีการนำแบบจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการแก้ปัญหาสามารถสรุปได้ดังนี้ (บุรินทร์ ทั้งไพศาล, 2544)

(1) ปัญหามีความซับซ้อนยุ่งยากเกินกว่าที่จะอธิบายด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์หรือหลักการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ไม่สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างสมบูรณ์

(2) การใช้หลักการทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเนื่องจากผู้ที่เข้าใจในปัญหาหรือระบบอาจไม่เชี่ยวชาญพอทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

(3) การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ส่วนมากจะได้คำตอบเพียงคำตอบเดียวซึ่งอาจไม่ตรงกับสภาพความเป็นจริง

(4) การแก้ไขปัญหาด้วยวิธีการอื่นอาจมีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการใช้วิธีจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองสถานการณ์

(5) การใช้แบบจำลองสถานการณ์สามารถให้คำตอบที่รวดเร็วกว่าวิธีอื่นเนื่องจากใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์และสามารถใช้การแทนหน่วยของเวลาได้

2.1.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ Simulator และ Simulation Language (Law และ Kelton, 1991 อ้างถึงใน Martinez, 1996) ลักษณะของ Simulator จะเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการสร้างแบบจำลองโดยเฉพาะ มีจุดเด่นคือผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเขียนชุดคำสั่งเพื่อให้คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองทำให้ง่ายต่อการใช้งาน แต่มีข้อจำกัดคือสร้างแบบจำลองได้ตามที่โปรแกรมกำหนดไว้เท่านั้น สำหรับ Simulation Language นั้นเป็นโปรแกรมภาษาที่ใช้ในการเขียนชุดคำสั่งให้คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง ทำให้สามารถใช้งานได้ยืดหยุ่นและหลากหลายกว่า Simulator แต่มีข้อจำกัดคือผู้ใช้ต้องทราบไวยากรณ์สำหรับการเขียนชุดคำสั่งของ Simulation Language นั้น

วิธีจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มี 3 วิธี ได้แก่ Event Scheduling (ES), Process Interaction (PI) และ Activity Scanning (AS) (Martinez, 1996) Simulator และ Simulation Language สามารถนำเอาวิธีใดวิธีหนึ่งหรือทั้ง 3 วิธีไปประยุกต์ใช้งานร่วมกันได้โดย ในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

- **Event Scheduling (ES)** เป็นวิธีที่สถานภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับเหตุการณ์ที่เกิด เมื่อเหตุการณ์แรกจบลงเหตุการณ์ต่อมาก็จะเกิดขึ้นตามแผนงานที่กำหนดไว้ โดยทั่วไป Event Scheduling จะนำไปใช้งานร่วมกับ Process Interaction หรือ Activity Scanning

- **Process Interaction (PI)** เป็นวิธีที่ทำงานตามการไหลผ่านของทรัพยากรที่เป็นตัวรับบริการผ่านระบบการให้บริการในแบบจำลอง ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนย้ายโครงเหล็กจากที่กองเก็บสู่รถบรรทุกด้วย Gantry Crane โดยหลักการของ Process Interaction จะพิจารณาโครงเหล็กซึ่งเป็นทรัพยากรที่เป็นตัวรับบริการไหลผ่านเข้าสู่ Gantry Crane และรถบรรทุกซึ่งเป็นทรัพยากรที่เป็นตัวให้บริการ โดยกระบวนการเคลื่อนโครงเหล็กจากที่กองเก็บไปสู่รถบรรทุกจะเริ่มจากการที่โครงเหล็กครอบครอง Gantry Crane หลังจากนั้นจะรอจนกระทั่งรถบรรทุกว่าง เมื่อรถบรรทุกว่างโครงเหล็กจะครอบครองรถบรรทุกและเริ่มเคลื่อนย้ายจากที่กองเก็บไปสู่รถบรรทุก โดยให้ Gantry Crane ทำหน้าที่ยกโครงเหล็ก และรถบรรทุกทำหน้าที่รับโครงเหล็ก ตามลำดับ วิธี Process Interaction นั้นเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการจำลองสถานการณ์ที่มีกิจกรรมการดำเนินงานไม่มาก ส่วนทำการชนิดให้บริการจะอยู่กับที่และทำงานเฉพาะด้านอีกทั้งยังมีความสัมพันธ์กับส่วนทำการอื่นน้อย ในขณะที่ส่วนทำการที่รับบริการจะเคลื่อนที่ไหลผ่านเข้าสู่ส่วนทำการที่อยู่กับที่และรับบริการตามหน้าที่เฉพาะของส่วนทำการที่อยู่กับที่นั้น วิธีนี้ไม่เหมาะสำหรับการจำลองกระบวนการก่อสร้างแต่เหมาะสำหรับการจำลองกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองชนิดนี้หรือนำไปใช้ร่วมกับ Event Scheduling ได้แก่ GPSS, SLAM, SIMAN, Q-GERT และ SIMSCRIPT เป็นต้น

- **Activity Scanning (AS)** เป็นวิธีที่ทรัพยากรที่เป็นตัวรับบริการและให้บริการไม่แตกต่างกันเป็นเพียงส่วนทำการชนิดหนึ่งในแบบจำลองเท่านั้นซึ่งแตกต่างจากหลักการของ Process Interaction เมื่อพิจารณาตัวอย่างการเคลื่อนย้ายโครงเหล็กจากที่กองเก็บไปสู่รถบรรทุกด้วย Gantry Crane ด้วยวิธี Activity Scanning จะมีกิจกรรมที่เรียกว่า Load ซึ่งจะเริ่มทำงานได้เมื่อชนิดและจำนวนของส่วนทำการมีเพียงพอ นั่นคือ Load จะเริ่มทำงานได้เมื่อโครงเหล็กในที่กองเก็บ รถบรรทุก และ Gantry Crane มีจำนวนเพียงพอต่อความต้องการและไหลผ่านเข้าสู่กิจกรรม Load วิธีนี้เหมาะสำหรับจำลองกระบวนการก่อสร้างเนื่องจากสามารถรองรับ

กระบวนการที่มีจำนวนกิจกรรมการดำเนินงานมาก ทรัพยากรแต่ละชนิดมีการเคลื่อนที่และมีความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรสูงได้

โดยทั่วไปแบบจำลอง Activity Scanning จะนำไปใช้งานร่วมกับ Event Scheduling เรียกว่า Three-Phase AS วิธีนี้เป็นการแบ่งแยกระหว่าง Condition Activity (C-Activity หรือ Combi) และ Bound Activity (B-Activity หรือ Normal) และพัฒนาต่อมาเป็น Activity Cycle Diagram (ACD) เพื่อช่วยในการระบุความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมให้ง่ายยิ่งขึ้น โดย ACD จะประกอบด้วยกรอบสี่เหลี่ยมที่ใช้แทนกิจกรรมต่างๆ ในแบบจำลอง และในแต่ละกรอบจะเชื่อมกันด้วยลูกศรที่ใช้ระบุลำดับและความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม ตัวอย่างโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี ACD ได้แก่ GSP, HOCUS, CYCLONE, RESQUE, COOPS, CIPROS และ Stroboscope เป็นต้น

2.2 รายละเอียดโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในงานวิจัย

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Stroboscope (State and Resource Based Simulation of Construction Processes) ซึ่งเป็น Simulation Language Program (Matinez, 1996) ที่นำเอาแนวคิดของ ACD และ SQL (Structured Query Language) มาใช้ในการพัฒนาโปรแกรม โดย Stroboscope เป็นโปรแกรมประเภท General Purpose Simulation Programming Language ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อจำลองกระบวนการก่อสร้างที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะ ทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดได้ที่ http://www.strobos.ce.vt.ed โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายในกรณีที่นำโปรแกรมไปใช้เพื่อการศึกษา สำหรับปัจจัยต่างๆ ที่นำมาพิจารณาเลือกใช้โปรแกรม Stroboscope แสดงในตารางที่ 2.1

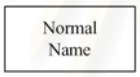
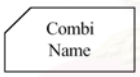
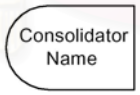
2.2.1 เครื่องมือพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Stroboscope

เครื่องมือพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Stroboscope สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้มี 6 ชนิด ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork, Queue, และ Link โดยรายละเอียดได้อธิบายในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาเลือกใช้โปรแกรม Stroboscope

ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณา	โปรแกรม Stroboscope
1. ราคาของโปรแกรม	ไม่เสียค่าใช้จ่ายกรณีใช้เพื่อการศึกษา
2. การจัดหาโปรแกรมมาใช้งาน	สามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้โดยตรง
3. ข้อกำหนดด้านฮาร์ดแวร์	ใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีความสามารถไม่สูงมากนัก
4. ขนาดของโปรแกรม	เป็นโปรแกรมที่มีขนาดเล็ก (8.05 MB)
5. เครื่องมือช่วยในการสร้างแบบจำลอง	มีเครื่องมือช่วยในการสร้างแบบจำลองหลากหลาย
6. ความสามารถของโปรแกรม	เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาสำหรับกระบวนการก่อสร้างที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะ

ตารางที่ 2.2 เครื่องมือพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Stroboscope

ชนิด	สัญลักษณ์	หน้าที่
Normal		เป็นเครื่องมือที่ใช้ในกิจกรรมที่สามารถทำงานได้ทันทีเมื่อกิจกรรมก่อนหน้าทำงานเสร็จเรียบร้อย
Combi		เป็นเครื่องมือที่ใช้ในกิจกรรมที่จะเริ่มทำงานได้เมื่อทรัพยากรที่ใช้มีจำนวนเพียงพอในการทำงาน
Consolidator		เป็นเครื่องมือที่ใช้ปล่อยทรัพยากรเพื่อให้กิจกรรมถัดไปที่อยู่ต่อจาก Consolidator สามารถทำงานได้ โดยจะปล่อยทรัพยากรเมื่อเงื่อนไขที่อยู่ใน Consolidator ผ่านตามที่กำหนดไว้
Fork		เป็นเครื่องมือที่ใช้เลือกเส้นทางการไหลผ่านของทรัพยากรในกรณีที่มีกิจกรรมทางเลือกโดยทรัพยากรจะไหลผ่านไปสู่กิจกรรมที่ถูกเลือกทั้งหมด
Queue		เป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บทรัพยากรสำหรับใช้ในกิจกรรม Combi
Link		เป็นเครื่องมือที่ใช้กำหนดเส้นทางการไหลของทรัพยากรในแบบจำลองสถานการณ์

2.2.2 กระบวนการทำงานของโปรแกรม Stroboscope

กระบวนการทำงานของโปรแกรม Stroboscope ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- **Simulation Clock** เป็นเวลาที่ใช้ภายในแบบจำลองสถานการณ์ การระบุหน่วยขึ้นอยู่กับการกำหนดของผู้ใช้ เช่น กำหนดให้ 1 หน่วย Simulation Clock เท่ากับ 1 วินาที 1 นาที หรือ 20 นาที เป็นต้น ค่าเริ่มต้นของ Simulation Clock จะเท่ากับศูนย์ และจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Stroboscope เริ่มทำงาน

- **Activity Instance Life-span** เป็นค่าที่ระบุระยะเวลาการทำงานของกิจกรรม (Duration) เพื่อใช้อ้างอิงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานของกิจกรรมในแบบจำลองสถานการณ์ เช่น กิจกรรม Load เริ่มทำงานเมื่อเวลา 10:30 น. (Start Time) มีระยะเวลาในการ Load 10 นาที (Duration) ดังนั้นกิจกรรมนี้จะสิ้นสุดในเวลา 10:40 น. (End Time)

- **Future Event List (FEL)** เป็นรายการที่ใช้เก็บค่าเริ่มต้นและสิ้นสุดของกิจกรรมที่กำลังทำงานโดยเรียงลำดับจากน้อยไปมากตามเวลาสิ้นสุดของกิจกรรม นั่นคือเมื่อกิจกรรมเริ่มทำงานข้อมูลจะถูกใส่เข้าไปใน FEL และจะถูกลบออกเมื่อเวลาใน Simulation Clock มีค่าเท่ากับเวลาสิ้นสุดของกิจกรรมนั้น

- **Current Event** เป็นกิจกรรมที่ทำงานมาจนถึงช่วงเวลาสิ้นสุดการทำงานใน Simulation Clock และกำลังจะถูกลบออกจาก FEL

- **Activity Instance Termination** ใช้ในกรณีที่กิจกรรมในแบบจำลองสถานการณ์สิ้นสุดการทำงาน โดยทรัพยากรที่กิจกรรมนั้นใช้หรือถือครองอยู่จะถูกโปรแกรม Stroboscope ส่งผ่านทรัพยากรให้กิจกรรมที่ทำงานต่อจากกิจกรรมนั้น พร้อมทั้งลบข้อมูลกิจกรรมนั้นออกจาก FEL และเก็บข้อมูลกิจกรรมที่ทำงานต่อจากกิจกรรมนั้นเข้ามาไว้แทนที่ใน FEL

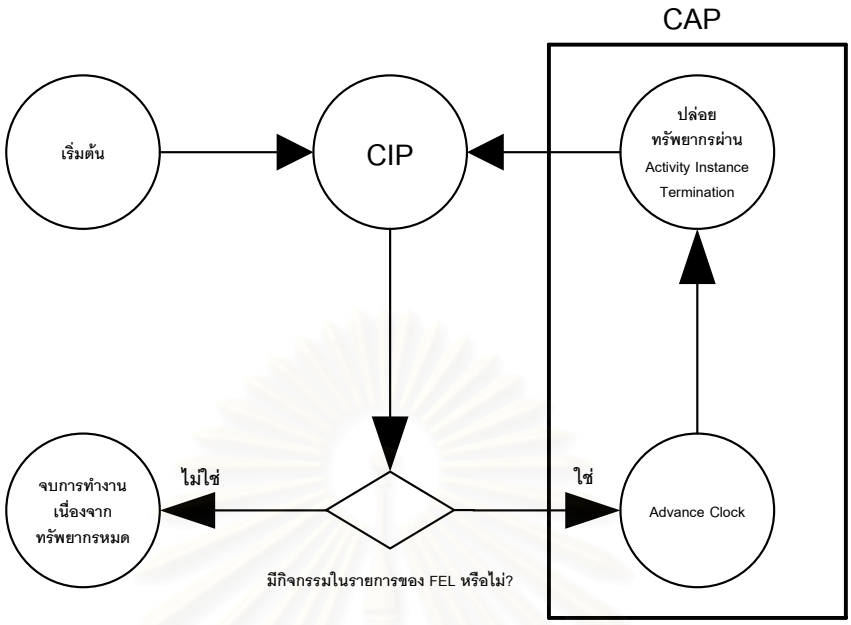
- **Combi Instantiation Phase (CIP)** เป็นกระบวนการทำงานของโปรแกรม Stroboscope สำหรับกิจกรรม Combi โดยทั่วไปโปรแกรม Stroboscope จะไม่สามารถระบุเวลาทำงานของกิจกรรม Combi ได้จนกระทั่งกิจกรรม Combi ถูกตรวจสอบโดยกระบวนการ CIP ซึ่งจะเริ่มทำงานเมื่อไม่มีกิจกรรมใดใน FEL เป็น Current Event ทำให้ไม่สามารถทำงานในกระบวนการถัดไปคือ Activity Instance Termination ได้ ดังนั้นโปรแกรม Stroboscope จึงเริ่มทำงานในกระบวนการ CIP โดยการส่งค่าเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานของกิจกรรม Combi ไปไว้ใน FEL และจะทำซ้ำจนกระทั่งทรัพยากรที่ใช้ในการทำงานมีจำนวนไม่เพียงพอหรือระยะเวลาการทำงานของกิจกรรม Combi เท่ากับศูนย์จึงให้กระบวนการ Clock Advance Phase (CAP) ทำงานต่อไป

- **Clock Advance Phase (CAP)** เป็นกระบวนการทำงานของโปรแกรม Stroboscope ที่ทำงานต่อจาก CIP โดย CAP จะเปลี่ยนเวลา ณ ปัจจุบันของแบบจำลองสถานการณ์ใน Simulation Clock ให้เท่ากับเวลาสิ้นสุดการทำงานของกิจกรรมที่อยู่บนสุดของรายการใน FEL และจะหยุดทำงานเมื่อไม่มีกิจกรรมใดใน FEL เป็น Current Event โดยจะสับเปลี่ยนให้ CIP ทำงานต่อไป

- **The Simulation Loop** เป็นการสับเปลี่ยนการทำงานระหว่าง CIP และ CAP นั่นคือเมื่อไม่มีกิจกรรมใดใน FEL เป็น Current Event โปรแกรม Stroboscope จะเข้าสู่กระบวนการทำงานของ CIP และเมื่อทรัพยากรที่ใช้ในการทำงานของกิจกรรม Combi มีจำนวนไม่เพียงพอหรือระยะเวลาการทำงานของกิจกรรม Combi เท่ากับศูนย์ก็จะให้ CAP ทำงานและปล่อยทรัพยากรที่ใช้สำหรับกิจกรรม Combi ออกมาผ่านกระบวนการ Activity Instance Termination โดยกระบวนการ CAP จะทำงานจนกระทั่งไม่มีกิจกรรมใดใน FEL เป็น Current Event หลังจากนั้น CIP จึงเริ่มทำงานอีกครั้งโดยนำทรัพยากรที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการ CAP ไปใช้ในกิจกรรม Combi

การทำงานของโปรแกรม Stroboscope จะสิ้นสุดเมื่อทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์หมดและไม่มีกิจกรรมอยู่ในรายการของ FEL ทำให้ไม่สามารถเริ่มกระบวนการ CIP และ CAP ได้หรือโปรแกรม Stroboscope ทำงานจนเงื่อนไขที่ผู้ใช้กำหนดไว้เสร็จสมบูรณ์ เช่น ทำงานจนกระทั่ง Simulation Clock เท่ากับเวลาที่กำหนดไว้ หรือจนกระทั่งจำนวนกิจกรรมที่ทำซ้ำในแบบจำลองสถานการณ์ครบตามจำนวนที่ผู้ใช้กำหนด เป็นต้น รูปที่ 2.1 แสดงวงรอบการทำงานของโปรแกรม Stroboscope

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 วงรอบการทำงานของโปรแกรม Stroboscope (Martinez, 1996)

2.3 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลงานวิจัยในอดีต บทความวิชาการ และเอกสารด้านการจัดการทางวิศวกรรม พบว่าการวางแผนงานก่อสร้างโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์สำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยนั้นมีอยู่จำกัด เนื่องจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในอดีตมีจำนวนไม่มากอีกทั้งการใช้แบบจำลองดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ทางด้านขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามการศึกษาผลงานวิจัยในต่างประเทศพบว่ามีผู้ที่ศึกษาพอสมควร ทั้งนี้เพราะแบบจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสำหรับใช้ในโครงการที่มีกิจกรรมซ้ำๆ กัน โดยใช้ในการประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) ต้นทุนในการก่อสร้างอุโมงค์ การวางแผนใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการเลือกวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถประเมินความเหมาะสมของโครงการภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันทำให้สามารถปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินงานให้สอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การสำรวจเชิงเอกสารเกี่ยวกับการจัดการด้านวิศวกรรมและการวางแผนงานก่อสร้างโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์สามารถแบ่งกลุ่มของการศึกษาได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ กลุ่มที่สองศึกษาเกี่ยวกับ

การนำโปรแกรมมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างทั้งในส่วนของงานก่อสร้างอุโมงค์และงานก่อสร้างทั่วไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงแรกและเป็นที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างได้แก่ โปรแกรม MicroCYCLONE พัฒนาโดย Halpin ในปี 1990 (1990a อ้างถึงใน Gonzalez-Quevedo และคณะ, 1993) เป็นโปรแกรมประเภท Simulation Language ที่ผู้ใช้งานต้องศึกษาภาษาเฉพาะของโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนชุดคำสั่งให้คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง โปรแกรม MicroCYCLONE มีจุดเด่นในด้านการใช้งานที่ง่าย เหมาะสำหรับจำลองสถานการณ์การก่อสร้างขนาดเล็กเพื่อใช้ในการหาขั้นตอนการก่อสร้างที่เหมาะสม และวางแผนการใช้ทรัพยากรที่ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด สำหรับเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MicroCYCLONE ประกอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน 6 ชนิด แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนี้

(1) Normal เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับกิจกรรมที่เป็นอิสระไม่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมอื่น นั่นคือ กิจกรรมที่เป็น Normal จะสามารถเริ่มทำงานได้ทันทีเมื่อกิจกรรมก่อนหน้าเสร็จเรียบร้อย

(2) Combi เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับกิจกรรมที่ต้องใช้ทรัพยากรในการทำงานโดยจะเริ่มทำงานเมื่อมีชนิดและจำนวนทรัพยากรเพียงพอ

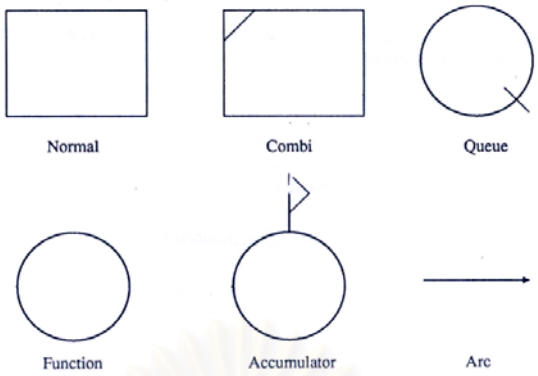
(3) Queue เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บทรัพยากรสำหรับใช้ในกิจกรรม Combi

(4) Function เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับรวมวงรอบการทำงานเข้าด้วยกัน

(5) Accumulator เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรวมเวลาทั้งหมดของวงรอบการทำงาน

(6) Arc เป็นเครื่องมือที่ใช้แสดงทิศทางการไหลของแบบจำลอง

อย่างไรก็ตามโปรแกรม MicroCYCLONE ไม่เหมาะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ เนื่องจากถูกออกแบบมาเพื่อรองรับกระบวนการก่อสร้างขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ดังนั้นผู้ใช้โปรแกรมจึงไม่สามารถกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างที่สลับซับซ้อนและมีการใช้ทรัพยากรจำนวนมากรวมทั้งไม่สามารถกำหนดคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้างได้



รูปที่ 2.2 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MicroCYCLONE (Farid และ Koning, 1994)

Martinez (1996) ได้พัฒนาโปรแกรม Stroboscope ซึ่งเป็น Simulation Language เช่นเดียวกับโปรแกรม MicroCYCLONE โดยโปรแกรม Stroboscope นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์สำหรับโครงการที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะ และมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าโปรแกรม MicroCYCLONE ดังนี้

(1) กำหนดทรัพยากรที่มีปริมาณการใช้งานในแต่ละครั้งไม่เท่ากันได้ เช่น ปริมาณดินที่ขุดได้ในแต่ละครั้งอาจไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความจุของที่ตักดินและประสิทธิภาพของรถตักดินในแต่ละรอบ เป็นต้น

(2) กำหนดเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่คงที่ได้ เช่น เวลาที่ใช้ในการขนดินจากหน้าอุโมงค์ไปทิ้งในการขุดเจาะอุโมงค์ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น

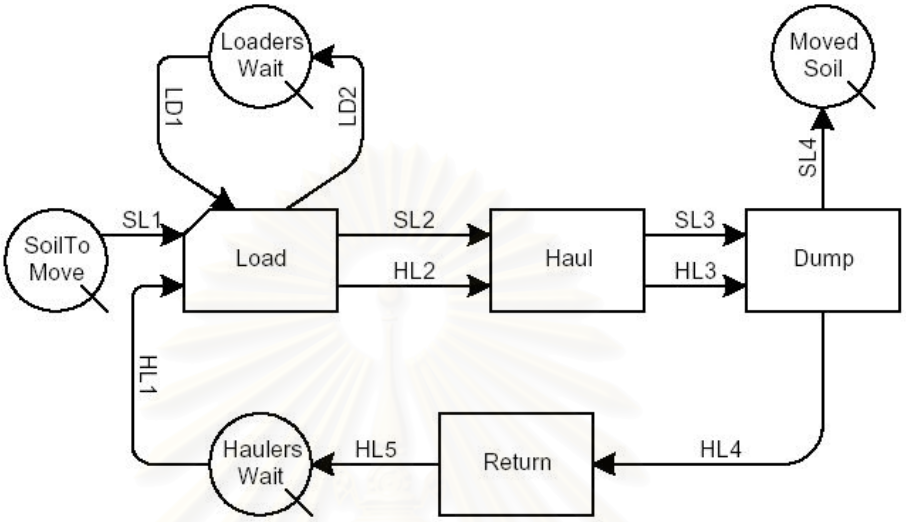
(3) ใช้ได้กับทรัพยากรที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนและไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ เช่น กองเหล็กซึ่งประกอบด้วยเหล็กหลายชนิดและหลายขนาด เป็นต้น

(4) กำหนดเงื่อนไขในการใช้ทรัพยากรและกำหนดคุณสมบัติของทรัพยากรได้ เช่น กำหนดคุณสมบัติของรถขนเหล็กให้สามารถขนเหล็กรูปพรรณที่มีความยาวได้ไม่เกิน 12 เมตร หรือกำหนดระวางบรรทุกของรถในแต่ละชนิดที่ใช้ในงานก่อสร้างได้ เป็นต้น

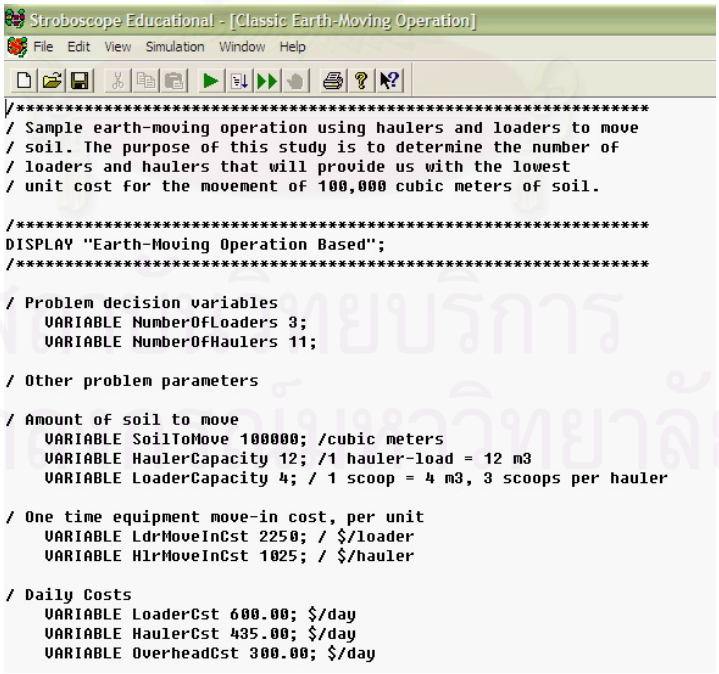
(5) สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมภาษา C, C++, Pascal และ FORTRAN เพื่อเขียนชุดคำสั่งเพิ่มเติมได้

รูปที่ 2.3 และ 2.4 เป็นตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดิน (Classic Earth-Moving Operation) และชุดคำสั่งสำหรับการจำลองสถานการณ์ที่สร้างโดยใช้โปรแกรม Stroboscope มีทรัพยากรหลัก 3 ชนิด ได้แก่ Loader (LD), Hauler (HL) ซึ่งเป็นทรัพยากร

ประเภทใช้งานไม่ต่อเนื่อง (Discrete Resource) และ Soil (SL) ซึ่งเป็นทรัพยากรประเภทมีปริมาณเป็นกลุ่มก้อน (Bulk Resource)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดินโดยใช้โปรแกรม Stroboscope (Martinez, 1996)



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดินโดยใช้โปรแกรม Stroboscope (Martinez, 1996)

แบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดินที่แสดงในรูปที่ 2.3 มี Combi 1 ตัวสำหรับขั้นตอนการตักดิน (Load) มี Normal 3 ตัวสำหรับขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง (Haul) การเทดิน (Dump) และการย้อนกลับมารับดิน (Return) มี Queue 4 ตัวสำหรับขั้นตอนการรอนำดินไปทิ้ง (SoilToMove) การรอตักดินของ Loader (LoadersWait) การรอรับดินของ Hauler (HaulersWait) และการรอทิ้งดิน (MovedSoil) สำหรับตัวเลขหน้าอักษรย่อแทนลำดับขั้นตอนการไหลของทรัพยากรแต่ละชนิด เช่น SL1 Link แทนการไหลผ่านของดินจากขั้นตอนการรอนำดินไปทิ้งไปสู่ขั้นตอนการตักดิน และ SL2 Link แทนการไหลผ่านของดินจากขั้นตอนการตักดินใส่ไปสู่ขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง เป็นต้น โดยแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนย้ายดินจะเริ่มทำงานได้เมื่อมี Loader อย่างน้อย 1 คันอยู่ใน LoadersWait Queue มี Hauler อย่างน้อย 1 คันอยู่ใน HaulersWait Queue และมี Soil ปริมาณหนึ่งอยู่ใน SoilToMove Queue เมื่อมีทรัพยากรครบตามที่กำหนด Loader จะตักดินใส่ Hauler ในขั้นตอน Load Combi หลังจากนั้นดินจะไหลผ่าน SL2 Link และ Hauler จะไหลผ่าน HL2 Link ไปสู่ Haul Normal ซึ่งเป็นขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอน Dump Normal ซึ่งเป็นการเทดินลงไปในที่ทิ้งดิน โดยดินจะไหลผ่าน SL3 Link และ Hauler จะไหลผ่าน HL3 Link ไปสู่ Dump Normal ต่อมาดินจะไหลผ่าน SL4 Link ไปสู่ MovedSoil Queue ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทิ้งดิน สำหรับ Hauler จะไหลผ่าน HL4 Link ไปสู่ Return Normal ซึ่งเป็นขั้นตอนการย้อนกลับมารับดิน และไหลผ่าน HL5 Link ไปสู่ HaulersWait Queue ซึ่งเป็นขั้นตอนการรอรับดินรอบต่อไป และเป็นการสิ้นสุดหนึ่งวงรอบการเคลื่อนย้ายดิน

โปรแกรม Stroboscope เป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่ายและมีจุดเด่นในการเข้าถึงคุณสมบัติของทรัพยากรและการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของกระบวนการก่อสร้าง เช่น ความไม่แน่นอนของจำนวนทรัพยากรที่ผลิตได้หรือที่ใช้ไปในกระบวนการก่อสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ใช้โปรแกรมยังสามารถเปลี่ยนแปลงแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรอุปกรณ์หรือทรัพยากร และลำดับขั้นตอนกระบวนการก่อสร้างได้อย่างอิสระ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Stroboscope นั้นมีรูปแบบเช่นเดียวกับโปรแกรม MicroCYCLONE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองสถานการณ์การก่อสร้าง ดังนั้นผู้ที่ใช้งานโปรแกรม MicroCYCLONE ได้จึงสามารถศึกษาการใช้งานโปรแกรม Stroboscope ได้ไม่ยาก

Ruwanpura และคณะ (2000) ได้พัฒนาโปรแกรม Simphony แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่เรียกว่า Simulator สำหรับจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM

โดยเฉพาะ โปรแกรม Simphony ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ พารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameter) ผลลัพธ์ และค่าทางสถิติ

(1) พารามิเตอร์นำเข้า ประกอบด้วยส่วนประกอบย่อย 2 ส่วน ได้แก่ Parent Elements และ Child Elements โดย Parent Elements ประกอบด้วยส่วนประกอบย่อย 4 ส่วน ได้แก่

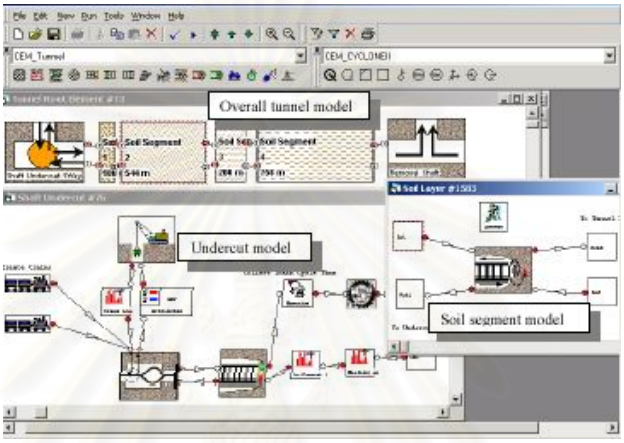
- ความยาวอุโมงค์
- จำนวนคนงานต่อรอบการทำงาน
- เวลาที่ใช้ในการเตรียมการช่วงเริ่มต้นการขุดเจาะอุโมงค์รอบใหม่
- เวลาที่เผื่อไว้สำหรับกิจกรรมต่างๆ เช่น เวลาหยุดงานเพื่อรับประทานอาหารกลางวัน เป็นต้น

สำหรับ Child Elements ประกอบด้วยส่วนประกอบย่อย 9 ส่วน ได้แก่

- Muck Cars ได้แก่ จำนวนและอัตราเร็วของขบวนรถจักรที่ใช้ในโครงการ จำนวนและความจุของรถขนถ่ายดินและรถขนส่งวัสดุ
- Shaft_Undercut ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการขนดินจากใต้ดินสู่พื้นดิน
- Shaft_Ground ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการขนส่งดาดผนังอุโมงค์จากพื้นดินลงสู่ใต้ดิน
- Waiting_Track ได้แก่ เวลาที่ขบวนรถจักรอยู่ใน Waiting_Track เพื่อรอเดินทางไปยังหน้าอุโมงค์
- Track_Undercut ได้แก่ กระบวนการทำงานทั้งหมดในแบบจำลองที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์โดยใช้ Track_Undercut
- Breakout_Track ได้แก่ กระบวนการทำงานทั้งหมดในแบบจำลองที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรในช่วงที่ออกจาก Track_Undercut ไปยัง Breakout_Track
- Intersection ได้แก่ กระบวนการทำงานทั้งหมดในแบบจำลองที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรในช่วงสับเปลี่ยนระหว่าง Waiting Track หรือ Breakout_Track ไปยัง Track_Undercut
- Tunnel Section ได้แก่ ลักษณะชั้นดินในแต่ละช่วงความยาวอุโมงค์
- TBM ได้แก่ ข้อมูลเกี่ยวกับ TBM ที่ใช้ในโครงการ การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ เวลาที่ใช้ในการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และเวลาที่ใช้ในการนำดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ที่ด้านหลัง TBM

(2) ผลลัพธ์ แสดงอัตราการทำงานของแต่ละกิจกรรม เวลาที่ใช้ในการรอทรัพยากรของแต่ละกิจกรรม และวงรอบการทำงานของกิจกรรมต่างๆ เช่น วงรอบการทำงานของขบวนรถจักร เป็นต้น

(3) ค่าทางสถิติ แสดงปริมาณของดินที่ขุดเจาะได้ ปริมาณของดินที่ขบวนรถจักรบรรทุกไปได้ในแต่ละเที่ยว และเวลาเดินทางเฉลี่ยของขบวนรถจักร เป็นต้น

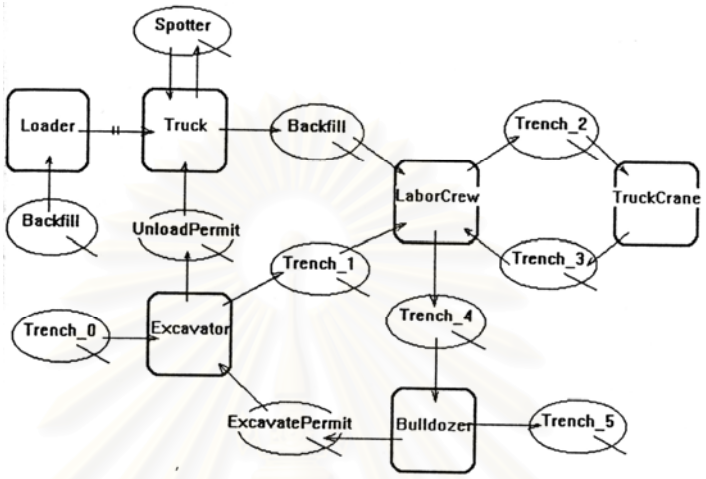


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้โปรแกรม Simphony (Fernando และคณะ, 2003)

โปรแกรม Simphony ที่พัฒนาโดย Ruwanpura และคณะ (2000) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวางแผนงานก่อสร้างโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับ TBM โดยเฉพาะอีกทั้งยังมีเครื่องมือช่วยในการสร้างแบบจำลองและมีการแสดงแบบจำลองในลักษณะของภาพการก่อสร้างอุโมงค์ ทำให้ผู้ใช้งานที่มีความเชี่ยวชาญในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ไม่มากนักสามารถนำโปรแกรมไปใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ได้ สำหรับการศึกษาถึงการนำโปรแกรมไปใช้ในโครงการก่อสร้างจริงพบว่าโครงการที่นำโปรแกรม Simphony ไปใช้ส่วนใหญ่เป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดกลางและขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนและมีการใช้ทรัพยากรไม่มาก เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม Simphony ที่ผู้ใช้งานไม่สามารถวางแผนงานก่อสร้างนอกขอบเขตที่โปรแกรมกำหนดไว้ได้ อย่างไรก็ตามโครงสร้างของโปรแกรมโดยเฉพาะพารามิเตอร์นำเข้าสามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมอื่นที่มีความสามารถสูงกว่าได้

Chua David และ Li (2001) ได้พัฒนาโปรแกรม RISim (Resource-Interacted Simulation) ซึ่งเป็น Simulator เช่นเดียวกับโปรแกรม Simphony ผู้ใช้สามารถนำเครื่องมือที่มีอยู่

ในตัวโปรแกรมมาสร้างผังโครงข่ายแบบจำลองสถานการณ์ได้ โดยในแต่ละปมของผังโครงข่าย RISim จะแสดงถึงชนิดของทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลอง รูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำที่สร้างโดยใช้โปรแกรม RISim

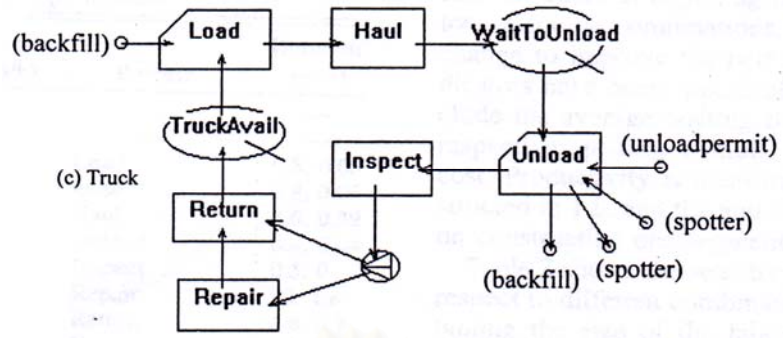


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำโดยใช้โปรแกรม RISim (Chua David และ Li, 2001)

ทรัพยากรที่ใช้ในโปรแกรม RISim มี 2 ประเภท ได้แก่

(1) Simple Resource เป็นทรัพยากรทั่วไปที่เป็นตัวรับบริการภายในแบบจำลองสถานการณ์ โดยทรัพยากรประเภทนี้สามารถกำหนดคุณสมบัติของทรัพยากรได้แต่ไม่สามารถสร้างผังโครงข่ายย่อยสำหรับกำหนดขั้นตอนการทำงานของทรัพยากรได้ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำแสดงในรูปที่ 2.6 ดินที่ขุดได้และท่อที่ใช้จะเป็น Simple Resource เป็นต้น

(2) Complex Resource เป็นทรัพยากรที่ให้บริการภายในแบบจำลองสถานการณ์ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดคุณสมบัติและสร้างผังโครงข่ายย่อยสำหรับกำหนดขั้นตอนการทำงานของทรัพยากรประเภทนี้โดยเฉพาะได้ ตัวอย่างเช่น แบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำแสดงในรูปที่ 2.6 Truck, Loader และ Excavator จะเป็น Complex Resources โดยทรัพยากรประเภทนี้ทุกตัวจะมีผังโครงข่ายย่อยสำหรับกำหนดขั้นตอนการทำงานโดยเฉพาะและจะเชื่อมกันด้วยลูกศรที่ทำหน้าที่ส่งผ่านทรัพยากรประเภท Simple Resource รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างผังโครงข่ายย่อยของ Truck ซึ่งเป็น Complex Resource ของแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างผังโครงข่ายย่อยของ Truck ในแบบจำลองสถานการณ์การวางท่อระบายน้ำ โดยใช้โปรแกรม RISim (Chua David และ Li, 2001)

Kim และ Gibson (2003) ได้พัฒนาโปรแกรม KMOS (Knowledge-embedded Modularized Simulation System) ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภท Simulator สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนงานก่อสร้างที่มีการติดต่อกับผู้ใช้งานในลักษณะกล่องโต้ตอบพร้อมคำอธิบายขั้นตอนการใช้โปรแกรมเพื่อลดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลอง โปรแกรม KMOS ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 6 ส่วน แสดงในรูปที่ 2.8 ได้แก่

(1) Knowledge Processing Module เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลของตัวโปรแกรมและแสดงขั้นตอนการโต้ตอบระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้โปรแกรมเพื่อช่วยในการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างแบบจำลอง หลังจากนั้นจึงทำการประมวลผลแบบจำลอง

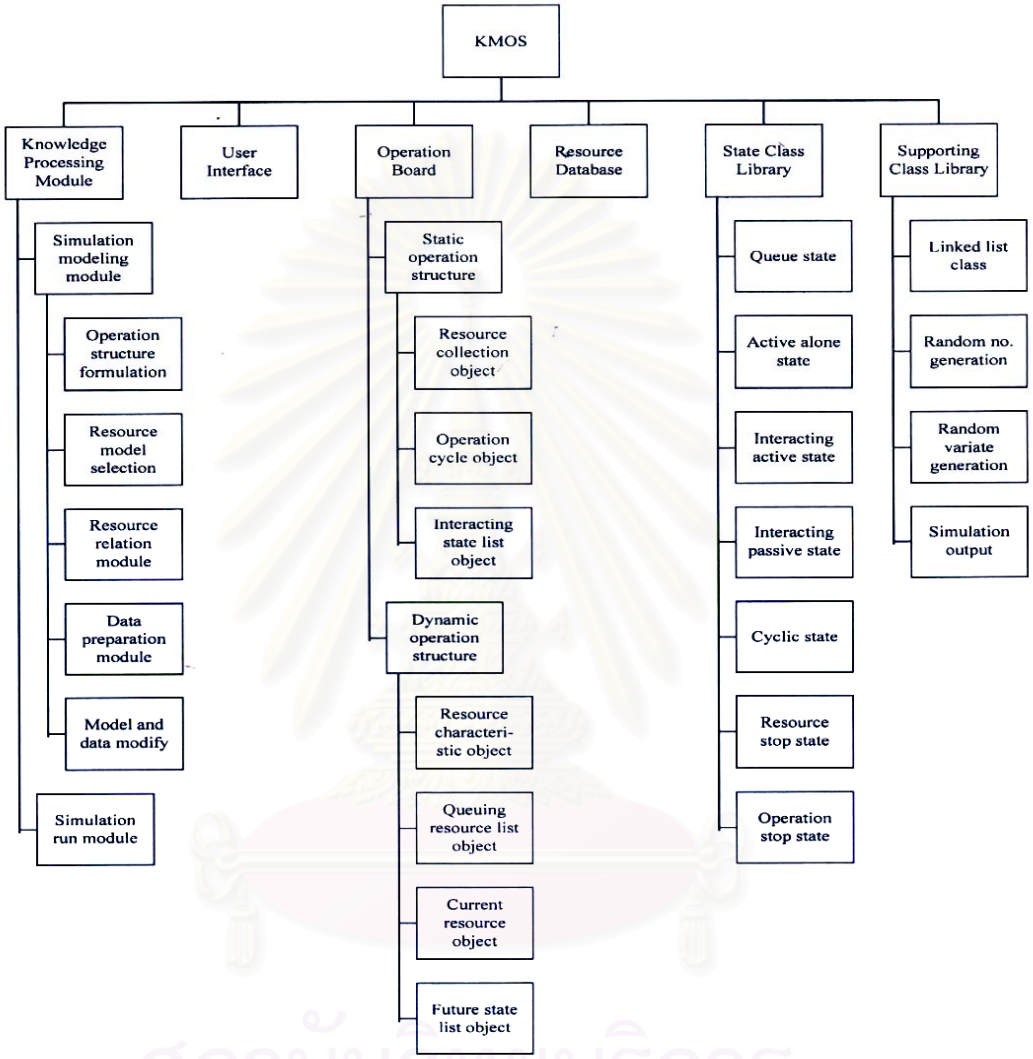
(2) User Interface ออกแบบมาสำหรับช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมทำงานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น มีลักษณะเป็นกล่องโต้ตอบต่างๆ พร้อมคำอธิบายที่ช่วยแนะนำลำดับขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม

(3) Operation Board ใช้ในการจัดการข้อมูลทรัพยากรในแบบจำลอง แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 Static Operation Structure เป็นส่วนที่ใช้รวบรวมและจัดกลุ่มตามคุณสมบัติของทรัพยากรแต่ละตัวในแบบจำลอง ได้แก่ ขั้นตอนการทำงาน วงรอบการไหล และความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลอง ส่วนที่ 2 Dynamic Operation Structure เป็นส่วนที่ใช้รวบรวมและเก็บค่าสถานะที่เปลี่ยนแปลงไปของทรัพยากรในระหว่างกระบวนการก่อสร้าง

(4) Resource Database เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลของทรัพยากรในแบบจำลอง

(5) State Class Library เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลเกี่ยวกับสถานะต่างๆ ของทรัพยากรที่ใช้ในโปรแกรม ได้แก่ Queue State, Active Alone State, Interactive Active State, Interactive Passive State, Cyclic State, Resource Stop State และ Operation Stop State

(6) Supporting Class Library เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลที่ช่วยสนับสนุนระบบการทำงานส่วนต่างๆ ของโปรแกรม



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโปรแกรม KMOS (Kim และ Gibson, 2003)

สถานะของทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้างสำหรับโปรแกรม KMOS แบ่งได้ 7 สถานะดังนี้

(1) Queue State ใช้เก็บทรัพยากรที่ต้องใช้ใน Interacting Active State และ Interacting Passive State

(2) Active Alone State ใช้สำหรับกิจกรรมที่สามารถทำงานได้ทันทีเมื่อกิจกรรมก่อนหน้าเสร็จเรียบร้อย

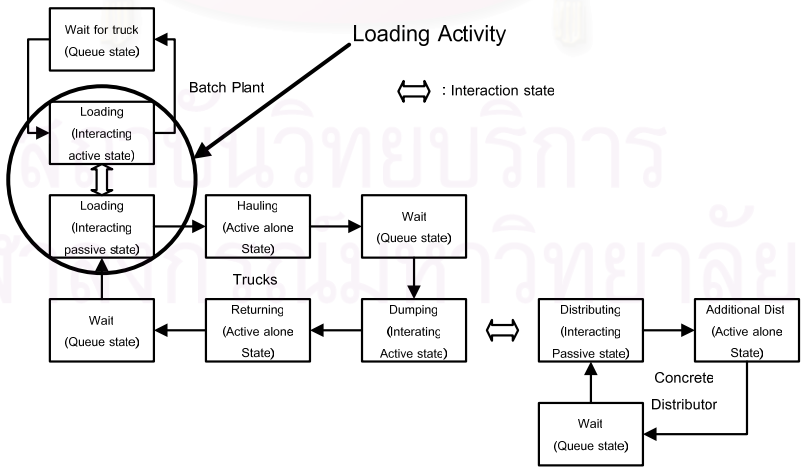
(3) Interactive Active State ใช้สำหรับกิจกรรมที่ต้องใช้ทรัพยากรในการทำงาน โดยทรัพยากรที่เข้าสู่ Interactive Active State จะทำหน้าที่บริการทรัพยากรที่เข้าสู่ Interactive Passive State อธิบายในรูปที่ 2.9 เป็นตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การขนส่งคอนกรีตจากโรงงานไปสู่ระบบลำเลียงคอนกรีตซึ่งประกอบด้วยทรัพยากรหลัก 3 ตัว ได้แก่ Batch Plant, Truck และ Concrete Distributor ในรูปที่ 2.9 กิจกรรม Loading จะเริ่มได้เมื่อ Batch Plant พร้อมที่จะทำงานและมี Truck อย่างน้อยหนึ่งคันรอรับคอนกรีต โดยกิจกรรม Loading ของ Batch Plant จะเป็น Interactive Active State ทำหน้าที่ Load คอนกรีตเข้าสู่กิจกรรม Loading ของ Truck ที่เป็น Interactive Passive State

(4) Interactive Passive State ใช้สำหรับกิจกรรมที่ต้องใช้ทรัพยากรในการทำงานเช่นเดียวกับ Interactive Active State แต่ทรัพยากรที่เข้าสู่ Interactive Passive State จะเป็นตัวรับบริการจากทรัพยากรที่อยู่ใน Interactive Active State

(5) Cyclic State ใช้สำหรับกิจกรรมที่มีการทำงานเป็นช่วงไม่ต่อเนื่องทุกวงรอบ เช่น กิจกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องจักรจะทำงานเมื่อถึงเวลาซ่อมบำรุงที่กำหนดไว้เท่านั้น เป็นต้น

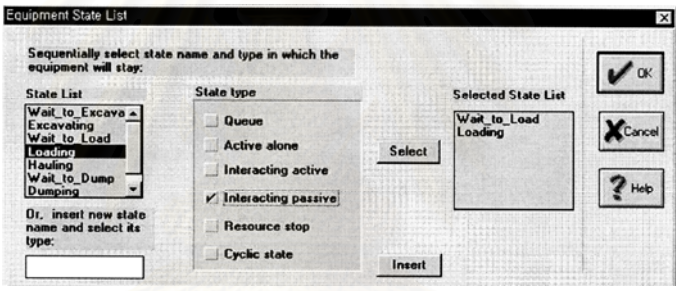
(6) Resource-Stop State ใช้ในกรณีที่กำหนดให้ทรัพยากรในแบบจำลองมีโอกาสที่จะหยุดทำงาน เช่น เครื่องจักรเสียและต้องหยุดซ่อม มี 2 สถานะย่อยคือ Resource Stop และ Fixed

(7) Operation-Stop State ใช้ในกรณีที่กำหนดให้แบบจำลองมีโอกาสหยุดเนื่องจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ฝนตกหนักอย่างรุนแรง เป็นต้น มี 2 สถานะย่อยคือ Operation Stop และ Operation Start



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแบบจำลองสถานการณ์การขนส่งคอนกรีตจากโรงงานไปสู่ระบบลำเลียงคอนกรีตโดยใช้โปรแกรม KMOS (Kim และ Gibson, 2003)

โปรแกรม RISim และ KMOS เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ที่เรียกว่า Simulator เช่นเดียวกับโปรแกรม Simphony โดยโปรแกรม KMOS เป็นโปรแกรมที่มีลักษณะเป็นกล่องโต้ตอบและมีระบบช่วยแนะนำขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์อย่างเป็นขั้นตอนเพื่อช่วยให้ใช้งานได้ง่าย ในขณะที่โปรแกรม RISim เป็นโปรแกรมที่มีเครื่องมือช่วยในการสร้างผังโครงข่ายของแบบจำลอง ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบและเปลี่ยนแปลงรูปแบบกระบวนการก่อสร้างได้ง่าย สำหรับข้อจำกัดของทั้ง 2 โปรแกรมนั้นพบว่ามีข้อจำกัดเช่นเดียวกับโปรแกรม Simphony คือผู้ใช้งานไม่สามารถวางแผนงานก่อสร้างนอกขอบเขตที่โปรแกรมกำหนดไว้ได้ และการนำเอาโปรแกรมไปใช้งานก็ไม่สะดวกเหมือนกับโปรแกรม Stroboscope ซึ่งสามารถดาว์นโหลดไปใช้งานได้โดยตรงทางอินเตอร์เน็ตและเป็นโปรแกรมที่ไม่เสียค่าใช้จ่ายในกรณีใช้เพื่อการศึกษา รูปที่ 2.10 แสดงรูปแบบกล่องโต้ตอบของโปรแกรม KMOS



รูปที่ 2.10 รูปแบบกล่องโต้ตอบของโปรแกรม KMOS (Kim และ Gibson, 2003)

2.3.2 การนำโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการวางแผนงานก่อสร้าง

การนำโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ไปใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนงานก่อสร้าง การใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานทั่วไป และการใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์ โดยในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

- **ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนงานก่อสร้าง**

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณสำหรับวางแผนงานก่อสร้างแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอนดังนี้ (Tommelein, Carr และ Odeh, 1994)

(1) กำหนดขอบเขตโครงการก่อสร้าง

(2) จัดทำโครงสร้างการแตกงานออกเป็นกิจกรรมย่อย

(3) เลือกวิธีการก่อสร้างในแต่ละกิจกรรม

(4) หาความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรม

(5) จัดสรรทรัพยากรที่จำเป็นเข้าสู่กิจกรรม

(6) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้ (Vanegas, Bravo และ Halpin, 1993)

- สร้างหน่วยสำหรับใช้เป็นตัวแทนของทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้าง เช่น เครื่องจักร คนงาน และวัสดุ เป็นต้น
- สร้างวงรอบการทำงานในแต่ละกิจกรรม
- รวมวงรอบการทำงานในแต่ละกิจกรรมเข้าด้วยกันเป็นวงรอบใหญ่

(7) ทำการประมวลผลเพื่อหาผลลัพธ์

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนงานก่อสร้างที่นำเสนอโดย Tommelein และคณะ (1994) และ Vanegas และคณะ (1993) เป็นแนวทางกว้างๆ ในการพัฒนาแบบจำลองเท่านั้น อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้ต่อไปได้

- **การใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานทั่วไป**

Hijazi, AbouRizk และ Halpin (1992), Luzt, Halpin และ Wilson (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้โปรแกรม MicroCYCLONE ร่วมกับแบบจำลองอัตราการเรียนรู้งานซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการพัฒนาความสามารถในการทำงานที่มีลักษณะงานซ้ำๆ กัน โดย Hijazi และคณะ (1992) ได้ใช้แบบจำลอง Stanford B Model, Dejone Model และ Cubic Model ในการคาดคะเนระยะเวลาที่ใช้ในงานก่อสร้างอาคารสูงในแต่ละชั้น ในขณะที่ Luzt และคณะ (1994) ใช้แบบจำลอง Boeing Curve Model คำนวณหาอัตราการทำงานของคนงานในการประกอบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ อัตราการทำงานของคนงานในโรงงานตัดหิน และการวางท่อระบายน้ำ

AbouRizk และ Dozzi (1993) ใช้โปรแกรม MicroCYCLONE สร้างแบบจำลองสถานการณ์สำหรับงานก่อสร้างสะพานข้ามแม่น้ำ Peace เมือง Edmonton ที่มีปัญหาเนื่องจากสัญญาก่อสร้างไม่ชัดเจนและแบบก่อสร้างมีข้อผิดพลาดทางหลักวิศวกรรม ทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงแบบและวิธีก่อสร้างตามสัญญาเดิม แบบจำลองถูกนำไปใช้ในการวางแผนหาวิธีการก่อสร้างที่เหมาะสมและใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างให้แก่ผู้รับเหมา

Farid และ Koning (1994) ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบอัตราการขุดและขนถ่ายดินและค่าใช้จ่ายที่ได้จากการใช้โปรแกรม Fleet ในการจำลองสถานการณ์การขุดและขนถ่ายดินกับค่าที่เกิดขึ้นจริง ผลที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม Fleet แตกต่างจากค่าที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากการจำลองสถานการณ์ใช้สมมติฐานที่ว่าการแจกแจงข้อมูลวงรอบการขุดและขนถ่ายดินมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลแต่ในสภาพความเป็นจริงวงรอบดังกล่าวมีการแจกแจงแบบเบต้า

AbouRizk และ Shi (1994) ใช้โปรแกรม MicroCYCLONE ในงานก่อสร้างโดยใช้ระบบประมวลผลอัตโนมัติวิเคราะห์หาจำนวนเครื่องจักรอุปกรณ์ที่จำเป็นในกระบวนการก่อสร้างที่ทำให้ค่าอัตราการทำงานมีค่าสูงสุด ค่าใช้จ่ายต่ำสุด และทำให้การใช้ทรัพยากรเกิดประโยชน์สูงสุด

บุรินทร์ ทั้งไพศาล (2544) และคมกฤษณ์ จิระสวัสดิ์ (2546) ใช้โปรแกรม Extend ในการจำลองสถานการณ์การจัดการการกระจายสินค้าในคลังสินค้า และจำลองสถานการณ์การขนส่งอ้อยจากไร่เข้าสู่โรงงานน้ำตาล ตามลำดับ

จิรวัฒน์ ดำริห์อนันต์ และศิวกร พ่วงพูล (2548) ใช้โปรแกรม Visual SimNet วิเคราะห์หาจำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมในการรับคอนกรีตบดอัดแน่น (Roller-Compacted Concrete) จาก Hopper เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างโครงการเขื่อนคลองท่าด่าน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าจำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมคือ 8 คัน หากใช้จำนวนรถบรรทุกที่น้อยกว่านี้ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการลำเลียงคอนกรีตบดอัดแน่นจาก Hopper ลดน้อยลง ในขณะที่การเพิ่มจำนวนรถบรรทุกก็ไม่ทำให้อัตราการทำงานเพิ่มขึ้นแต่กลับทำให้รถบรรทุกแต่ละคันเสียเวลาในแถวคอยมากขึ้นโดยไม่สร้างผลผลิตใดๆ ในแถวคอย

- **การใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์**

AbouRizk, Manavazhi และ Dozzi (1997) ศึกษาเกี่ยวกับการคาดคะเนอัตราการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้โปรแกรม SLAM II เปรียบเทียบระหว่างแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ตามสัญญาเดิมกับแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก

Nido และ Abraham (2000) ใช้โปรแกรม ProSidyc ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี Microtunneling ตามลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน

Fernando และคณะ (2003) ใช้โปรแกรม Simphony ในการวางแผนและตัดสินใจเลือกวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมโดยพิจารณาถึงอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละวิธี ค่าใช้จ่ายและเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง สำหรับโครงการที่ศึกษามีทั้งหมด 3 โครงการ ได้แก่ โครงการ South Edmonton Sanitary Sewer Tunnel (SESS), Calgary Trail Interchange Tunnel (CTIT) และ North Edmonton Sanitary Trunk Tunnel (NEST) สำหรับโครงการแรกใช้โปรแกรม Simphony ในการคำนวณหาอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และต้นทุนค่าใช้จ่ายในแต่ละแผนงานก่อสร้าง โครงการที่ 2 ใช้โปรแกรม Simphony ในการตัดสินใจเลือกจำนวนของขบวนรถจักรที่ทำให้โครงการมีต้นทุนค่าก่อสร้างน้อยที่สุด โครงการที่ 3 ใช้โปรแกรม Simphony ในการวางแผนเลือกวิธีการและขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ทำให้โครงการเสร็จตามระยะเวลาที่กำหนด

Veerasak Likhitruangsilp และ Ioannou (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณค่าอัตราและต้นทุนงานก่อสร้างอุโมงค์ Hanging Lake เมือง Colorado โดยใช้โปรแกรม Stroboscope ทำการเปรียบเทียบวิธีการและขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ออกแบบมาเพื่อหาวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมในแต่ละสภาพชั้นหิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 สรุปท้ายบท

บทนี้ได้แสดงรายละเอียดแนวคิดและทฤษฎีของแบบจำลองสถานการณ์ รายละเอียดของโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในงานวิจัย และได้ทำการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยพบว่าการใช้แบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยนั้นยังมีอยู่จำกัดเนื่องจากโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในอดีตมีจำนวนไม่มากนัก และเมื่อศึกษางานวิจัยในต่างประเทศพบว่าการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับวางแผนงานก่อสร้างของงานวิจัยที่ผ่านมานั้นได้นำเสนอแนวทางกว้างๆ ในการพัฒนาเท่านั้นและส่วนใหญ่ได้ใช้โปรแกรมประเภท Simulator ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยเฉพาะมาใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ จุดเด่นของโปรแกรมประเภทนี้คือสามารถใช้งานได้ง่าย ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเขียนชุดคำสั่งเพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการจำลองสถานการณ์ ดังนั้นผู้ที่มีความเชี่ยวชาญในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ไม่มากนักก็สามารถนำไปใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างได้ สำหรับข้อจำกัดของโปรแกรมประเภท Simulator คือผู้ใช้งานไม่สามารถสร้างแบบจำลองสถานการณ์นอกขอบเขตที่โปรแกรมกำหนดไว้ได้ ดังนั้นจึงพบว่าการนำโปรแกรมประเภทดังกล่าวไปใช้ในโครงการก่อสร้างจริงส่วนใหญ่เป็นโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขนาดกลางและขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนและมีการใช้ทรัพยากรไม่มากเนื่องจากข้อจำกัดที่กล่าวมาข้างต้น

สำหรับโปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์อีกประเภทหนึ่งได้แก่ Simulation Language ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษาที่ใช้ในการเขียนชุดคำสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำการจำลองสถานการณ์นั้นสามารถใช้งานได้ยืดหยุ่นและหลากหลายกว่าโปรแกรมประเภท Simulator โดยโปรแกรมประเภท Simulation Language ที่นิยมใช้ในอดีตได้แก่ โปรแกรม MicroCYCLONE อย่างไรก็ตามโปรแกรม MicroCYCLONE ไม่เหมาะสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์ เนื่องจากถูกออกแบบมาเพื่อรองรับกระบวนการก่อสร้างขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนไม่มาก ดังนั้นผู้ใช้จึงไม่สามารถกำหนดขั้นตอนการก่อสร้างที่สลับซับซ้อนและมีการใช้ทรัพยากรจำนวนมากรวมทั้งไม่สามารถกำหนดคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้างได้ สำหรับโปรแกรมประเภท Simulation Language อีกโปรแกรมหนึ่งที่กล่าวถึงและใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ โปรแกรม Stroboscope นั้นถูกออกแบบมาสำหรับโครงการที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะ สามารถใช้งานได้ง่ายและมีคุณสมบัติเด่นในด้านการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของกระบวนการก่อสร้าง ในขณะเดียวกันเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Stroboscope นั้นมีรูปแบบที่คล้ายกับโปรแกรม

MicroCYCLONE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการจำลองสถานการณ์การก่อสร้างทำให้ผู้ที่ใช้งานโปรแกรม MicroCYCLONE ได้สามารถศึกษาการใช้งานโปรแกรม Stroboscope ได้ไม่ยาก นอกจากนี้โปรแกรม Stroboscope ยังสามารถดาว์นโหลดไปใช้งานได้โดยตรงทางอินเตอร์เน็ตและไม่เสียค่าใช้จ่ายในกรณีใช้เพื่อการศึกษา

แบบจำลองสถานการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นถูกนำไปใช้งานในโครงการต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การใช้โปรแกรมสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนงานก่อสร้าง

ประเภทของงาน	การประยุกต์ใช้
งานก่อสร้างทั่วไป	• ประมาณระยะเวลาในงานก่อสร้างอาคารสูง (Hijazi และคณะ, 1992) • ประเมินเวลาและต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงการก่อสร้างสะพาน (AbouRizk และ Dozzi, 1993) • วิเคราะห์และปรับปรุงการจัดการการกระจายสินค้าในคลังสินค้า (บุรินทร์ ทั้งไพศาล, 2544) • วิเคราะห์และปรับปรุงการขนส่งอ้อยจากไร่เข้าสู่โรงงานน้ำตาล (คมกฤษณ์ จิระสวัสดิ์, 2546) • วิเคราะห์หาจำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมในการรับคอนกรีตบดอัดแน่น(Roller-Compacted Concrete) จาก Hopper เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้างโครงการก่อสร้างเขื่อน (จิรวัฒน์ ดำริห์อนันต์ และศิวกร พ่วงพูล, 2548)
งานก่อสร้างอุโมงค์	• เปรียบเทียบแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ตามสัญญาก่อสร้างเดิมกับแผนงานก่อสร้างทางเลือก (AbouRizk และคณะ, 1997) • ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ตามลักษณะชั้นดินที่แตกต่างกัน (Nido และ Abraham, 2000) • เลือกวิธีการก่อสร้างและเครื่องจักรอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์ (Fernando และคณะ, 2003)

บทที่ 3

กระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ Tunnel Boring Machine (TBM)

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในปัจจุบันนิยมใช้เครื่องจักรกลขุดเจาะอุโมงค์ที่เรียกว่า Tunnel Boring Machine (TBM) ซึ่งโดยทั่วไปการใช้ TBM จะเป็นการขุดเจาะครั้งเดียวเต็มหน้าตัดอุโมงค์ (Full Face Excavation) สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การพิจารณาเลือกใช้ TBM (เกรียงศักดิ์ แสงอาทิตย์, มิ่งศักดิ์ แสงวิไลพร และนริศ จันทราธรรมชาติ, 2541) ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่

(1) ศึกษาแบบก่อสร้าง ขนาด รูปร่าง ความยาว ความลึกของอุโมงค์ รัศมีความโค้ง ความลาดชันของอุโมงค์ และวิธีการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining)

(2) ศึกษาสภาพชั้นดิน ส่วนประกอบและความแตกต่างของชั้นดิน ระดับน้ำใต้ดินและความดันน้ำในโพรงดิน เสถียรภาพของหน้าดิน และค่าความซึมผ่านได้ของน้ำ

(3) ศึกษาสภาพแวดล้อมโดยรอบ แม่น้ำ ระบบสาธารณูปโภคใต้ดินอื่นๆ สิ่งก่อสร้างบนดินและใต้ดิน ระยะห่างจากบ้านเรือน ถนน การจราจร ความเหมาะสมของพื้นที่ทำการก่อสร้าง และแหล่งพลังงานที่สามารถหาได้

(4) ศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ ตารางเวลาการก่อสร้าง ความปลอดภัย สภาพการทำงาน และความเหมาะสมของการขนส่ง

(5) ศึกษาด้านการเงิน

(6) เลือกใช้ TBM ที่เหมาะสมกับโครงการ

3.2 ชนิดของ TBM แบ่งได้เป็น Open-Face TBM และ Closed-Face TBM มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 Open-Face TBM

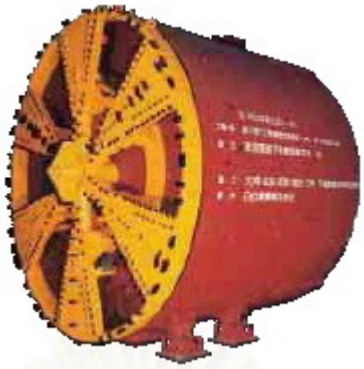
Open-Face TBM ได้แก่ Bucket Excavator, Boom Cutter และ Roadheader ชนิดพิเศษติดตั้งบนหัวเจาะโดยมีการควบคุมการทำงานและทิศทางด้วยมือหรือระบบอัตโนมัติ แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.1 เป็น TBM ที่เหมาะสำหรับดินหรือหินที่มีความแข็งแรงและไม่มีอุปสรรคจากน้ำที่ไหลเข้ามาในอุโมงค์ สำหรับการขุดเจาะนั้นสามารถขุดเจาะครั้งเดียวเต็มหน้าตัดอุโมงค์หรือขุดเจาะเพียงบางส่วนแล้วขยายให้เต็มหน้าตัดอุโมงค์ในภายหลังก็ได้

รูปที่ 3.1 Open-Face TBM (http://www.hitachi-c-m.com)

3.2.2 Closed-Face TBM

Closed-Face TBM แสดงในรูปที่ 3.2 เป็น TBM ที่ขุดเจาะโดยปิดหน้าดินทั้งหมด เพื่อป้องกันการพังทลายของหน้าดิน เหมาะสำหรับดินที่มีความเสถียรต่ำประเภทที่มีตะกอนหรือทรายมาก TBM ชนิดนี้สามารถแบ่งตามลักษณะการค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ได้ 4 ชนิดดังนี้ (บุญเทพ นาเนกรังสรรค์, 2543)

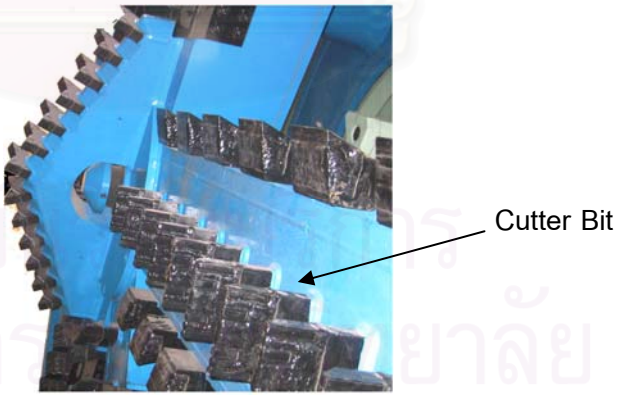
- **Mechanical Support** เป็น TBM ที่ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยการติดตั้งแผ่นเหล็กดันดิน (Breast Plate) ซึ่งถูกออกแบบให้มีการทำงานคล้ายสปริงที่บริเวณหน้าหัวเจาะ
- **Compressed Air Shield** เป็น TBM ที่อาศัยแรงอัดอากาศภายในห้องเจาะดินหน้าอุโมงค์ค้ำยันไม่ให้ดินและน้ำไหลเข้าไปในอุโมงค์
- **Slurry Shield** เป็น TBM ที่ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์โดยใช้ความดันของสารละลายซึ่งเป็นส่วนผสมของน้ำกับดินเหนียวหรือน้ำกับเบนโทไนท์
- **Earth Pressure Balance (EPB)** เป็น TBM ที่ใช้แรงดันดินในห้องพักดิน (Soil Chamber) ค้ำยันดินหน้า TBM ไม่ให้เกิดการพังทลาย โดยการควบคุมแรงดันดินในห้องพักดินให้มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันดินหน้า TBM เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างแรงดันดินทั้งสอง



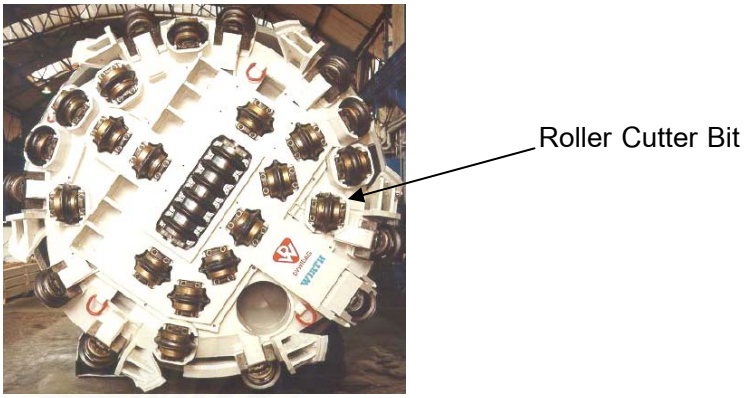
รูปที่ 3.2 Closed-Face TBM (http:// www.hitachi-c-m.com)

3.3 ชนิดฟันขุดเจาะของ Closed-Face TBM

ฟันขุดเจาะของ Closed-Face TBM มีการออกแบบมาโดยเฉพาะขึ้นอยู่กับการขุดเจาะว่าเป็นการขุดเจาะชั้นดินหรือชั้นหิน หากเป็นชั้นดิน Closed-Face TBM จะออกแบบโดยการติดตั้งใบพัด 4-6 แฉก ใบพัดแต่ละอันจะติดตั้งวงแหวนมีฟันที่เรียกว่า Cutter Bit (Cutting Teeth) แสดงในรูปที่ 3.3 สำหรับการขุดเจาะในชั้นหิน Closed-Face TBM จะติดตั้ง Roller Cutter Bit ซึ่งเป็นฟันชนิดที่ใช้ขุดเจาะหิน แสดงในรูปที่ 3.4 เนื้อเหล็กของฟันเป็นเหล็กผสม Carbon หรือ Tungsten Carbide หรือ Alloyed Steel ผสม Tungsten Carbide สำหรับชั้นหินที่แข็งมาก



รูปที่ 3.3 Cutter Bit (สำนักการระบายน้ำ, 2547)



รูปที่ 3.4 Roller Cutter Bit (Roller Disc Cutter) (http:// www.wirth-europe.com)

3.4 ส่วนประกอบหลักของ EPB TBM

TBM ชนิดค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุลที่เรียกว่า EPB ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน แสดงในรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังนี้

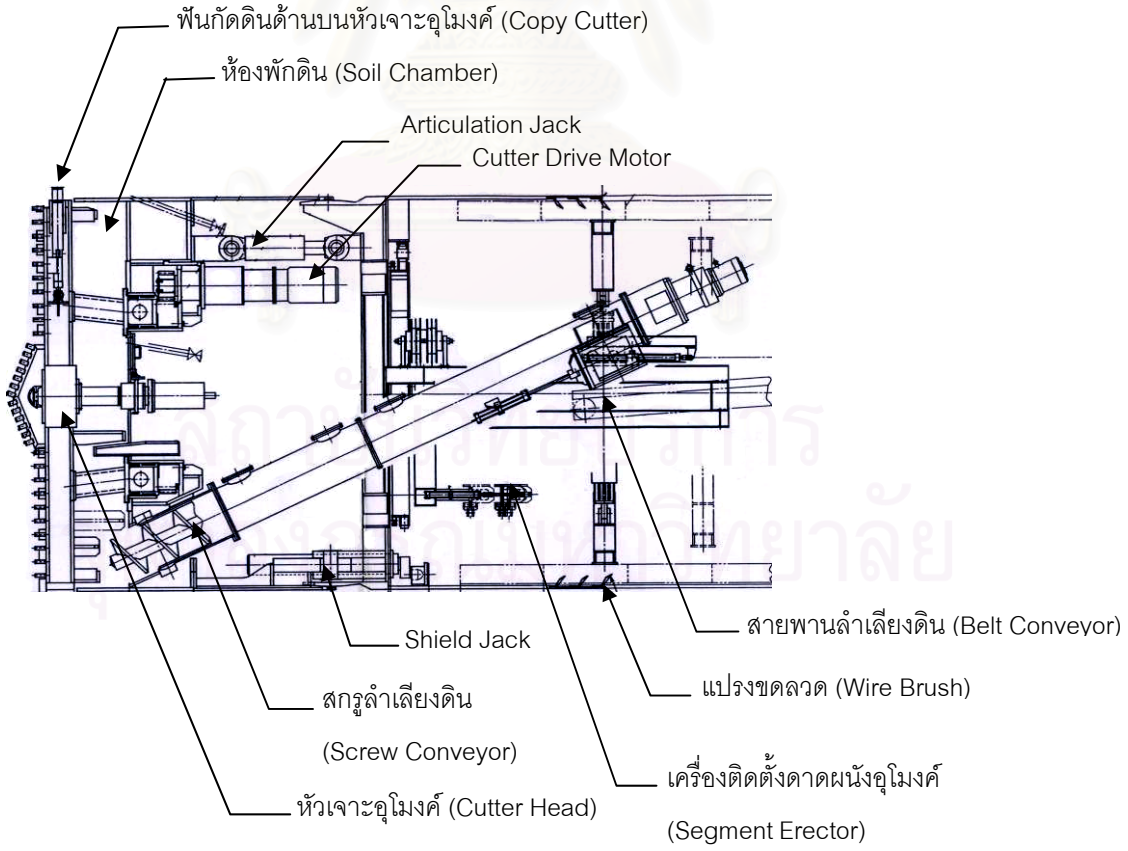
3.4.1 Front Body เป็นส่วนที่อยู่ด้านหน้าของ TBM ประกอบด้วย

- **หัวเจาะอุโมงค์** (Cutter Head) เป็นส่วนที่อยู่หน้าสุดของ TBM ใช้สำหรับขุดเจาะดินโดยการหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาสลับกันในแต่ละวงรอบ ชนิดของฟันที่ใช้ขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีหรือลักษณะชั้นดินที่ขุดเจาะ ในการขุดเจาะนั้นจะต้องขุดเจาะอุโมงค์ให้มีขนาดใหญ่กว่า TBM ประมาณ 2-3 นิ้ว เพื่อช่วยในการปรับทิศทางของ TBM ช่วยลดแรงเสียดทานและทำให้การขุดเจาะในแนวโค้งมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- **ฟันกัดดินด้านบนหัวเจาะอุโมงค์** (Copy Cutter) เป็นฟันที่ยืดตัวออกทางด้านรัศมีเพื่อเพิ่มการกัดหน้าดินให้เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเพื่อช่วยให้ TBM เลี้ยวโค้งได้มากขึ้น
- **หน่วยขับเคลื่อน** (Drive Unit) เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เรียกว่า Cutter Drive Motor ทำให้หัวเจาะอุโมงค์หมุนเพื่อขุดเจาะดิน
- **ห้องพักดิน** (Soil Chamber) ใช้ในการเก็บดินที่ถูกขุดเจาะก่อนส่งต่อให้สกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor) และสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) ต่อไป
- **สกรูลำเลียงดิน** (Screw Conveyor) เป็นส่วนที่ติดตั้งถัดจากห้องพักดิน มีลักษณะคล้ายใบพัดเรือยนต์ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า มีหน้าที่ลำเลียงดินจากห้องพักดินไปสู่สายพานลำเลียงดิน ที่ทางออกมีประตูที่เปิดและปิดด้วยระบบไฮดรอลิคอีกชั้นหนึ่ง อัตราเร็วของการลำเลียงดินขึ้นอยู่กับแรงดันดินในห้องพักดิน

3.4.2 Middle Body เป็นส่วนขับเคลื่อนเพื่อดัน TBM ไปข้างหน้าประกอบด้วย

- **Shield Jack** เป็นแม่แรงที่ใช้ในการถีบตัวไปด้านหน้าโดยอาศัยดาดผนังอุโมงค์เป็นตัวรับแรง จำนวนของ Shield Jack ขึ้นอยู่กับขนาดของ TBM
- **Articulated Steering Jack** เป็นส่วนที่ทำให้ TBM สามารถหักงอกลางลำตัวได้เพื่อให้ TBM สามารถเลี้ยวในรัศมีที่น้อยๆ ได้
- **เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Erector)** เป็นเครื่องมือสำหรับประกอบและติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ให้ครบเป็นวง

3.4.3 Rear Body เป็นส่วนที่รองรับดาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้วและกำลังประกอบก่อนที่ TBM จะเคลื่อนตัวไปด้านหน้าจนกระทั่งดาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบเสร็จแล้วหลุดออกจาก TBM โดยที่ด้านท้ายของ TBM จะมีแปรงขดลวด (Wire Brush) ทำหน้าที่ป้องกันการไหลซึมของน้ำและวัสดุที่ใช้อุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ไหลย้อนกลับเข้ามาใน TBM โดยที่แปรงขดลวดจะมีท่อสำหรับฉีดจาระบีชนิดพิเศษขณะขุดเจาะเพื่อป้องกันน้ำไหลย้อนกลับเข้ามาด้วย



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบหลักของ EPB TBM (Hitachi Zosen Corporation, 2546)

3.5 ระบบสนับสนุนการทำงานของ EPB TBM ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.6 ได้แก่ สายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) เครื่องค้ำยันดาดผนังอุโมงค์ (Ring Holder) Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment สุดท้ายได้แก่ Backup System มีรายละเอียดดังนี้

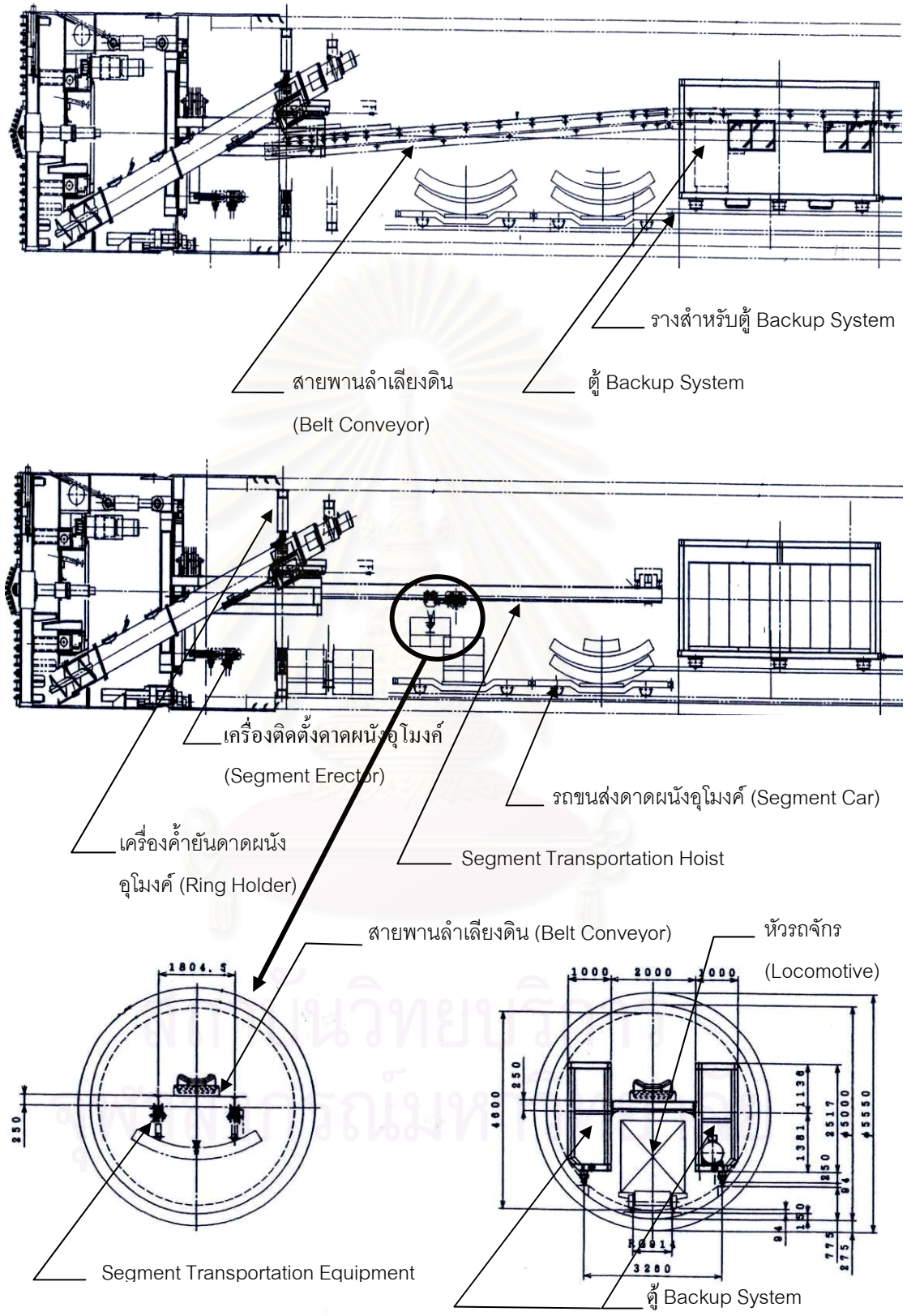
3.5.1 สายพานลำเลียงดิน แสดงในรูปที่ 3.7 เป็นอุปกรณ์ที่วางพาดระหว่างตู้ Backup System ใช้ในการนำดินไปทิ้งลงในรถขนถ่ายดิน (Muck Car) เพื่อลำเลียงออกไปสู่ภายนอกอุโมงค์ ความเร็วของการลำเลียงดินขึ้นอยู่กับแรงดันดินในห้องพักดิน

3.5.2 เครื่องค้ำยันดาดผนังอุโมงค์ แสดงในรูปที่ 3.8 เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยค้ำยันและรักษารูปทรงของดาดผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแต่ยังไม่ได้ทำการอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting) อยู่บริเวณด้านหลังเครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

3.5.3 Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment
เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งบริเวณส่วนท้ายของ TBM แสดงในรูปที่ 3.9 ประกอบด้วยคานคู่ที่เชื่อมระหว่างด้านหลัง TBM และตู้ Backup System คู่แรก สำหรับ Segment Transportation Equipment จะมีลักษณะเป็นรอกรางเลื่อนที่ใช้ในการลำเลียงดาดผนังอุโมงค์จากรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car) ไปเก็บไว้ในที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ที่เรียกว่า Hydraulic Support ซึ่งอยู่ด้านหลัง TBM ใกล้กับเครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์เพื่อรอติดตั้งต่อไป

3.5.4 Backup System แสดงในรูปที่ 3.10 ประกอบด้วยตู้ขนาดเล็กประมาณ 8-14 ตู้ อยู่ที่บริเวณด้านหลัง TBM ติดตั้งขนานเป็นคู่ไปตามความยาวอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 ระบบสนับสนุนการทำงานของ EPB TBM (Hitachi Zosen Corporation, 2546)

รูปที่ 3.7 สายพานลำเลียงดิน (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

รูปที่ 3.8 เครื่องค้ำยันดาดผนังอุโมงค์ (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

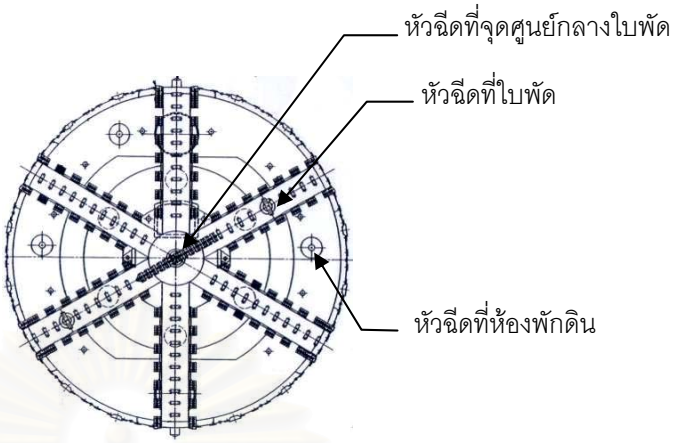
รูปที่ 3.9 Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

รูปที่ 3.10 ตู้ Backup System (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

3.6 การปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะของ EPB TBM

การขุดเจาะอุโมงค์ด้วย TBM ที่มีการค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB นั้นหากดินที่ขุดเจาะเป็นดินเหนียวแข็งจะต้องฉีดน้ำเข้าไปลดความแข็งแรงของดินหน้าหัวเจาะเพื่อให้ดินไหลเข้าไปในสกรูลำเลียงดินได้ง่าย ในกรณีที่ขุดเจาะในชั้นทรายหรือชั้นดินเหนียวปนทรายจะต้องฉีดน้ำผสมโฟมอินทรีย์ (Organic Foam) หรือเบนโทไนท์เพื่อป้องกันดินหน้าหัวเจาะพังและป้องกันน้ำไหลทะลักเข้าสู่หัวเจาะ โดยหัวฉีดจะถูกติดตั้งที่ใบพัดและที่ห้องพักดินแสดงในรูปที่ 3.11 สามารถสรุปหลักเกณฑ์ในการปรับสภาพดินได้ดังนี้ (ชินวุฒิ ชาญฉายา, 2543)

- **ชั้นดินเหนียวแข็ง** (Stiff Clay) ต้องอัดฉีดน้ำเข้าไปเพื่อย่อยสลายดินให้อ่อนตัวลงเพราะดินก้อนใหญ่จะทำให้สกรูลำเลียงดินอุดตันได้
- **ชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง** (Medium Clay) เป็นชั้นดินที่เหมาะสมกับ EPB TBM ปัญหาที่เกิดขึ้นมีน้อย ดินที่ออกมาจะเป็นแท่งยาวต่อเนื่อง
- **ชั้นทรายปนดินเหนียว** (Sandy Clay) ต้องฉีดน้ำผสมโฟมอินทรีย์หรือเบนโทไนท์เข้าไปผสมเพื่อป้องกันไม่ให้ดินหน้า TBM พังและป้องกันไม่ให้น้ำไหลทะลักเข้าสู่ TBM
- **กรณีพบน้ำใต้ดิน** (Ground Water) หากน้ำใต้ดินทำให้สภาพดินอ่อนตัวมากต้องฉีดน้ำยาประเภท Quick Setting Compound หรือทำ Grout Treatment อย่างเร่งด่วนเพื่อป้องกันไม่ให้ดินหน้าหัวเจาะทะลักเข้ามาในสกรูลำเลียงดินและป้องกันไม่ให้ดินที่อยู่บริเวณด้านบนหัวเจาะทรุดตัวมากเกินไป



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งหัวฉีดสารละลายปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะของ EPB TBM (Hitachi Zosen Corporation, 2546)

3.7 อัตราการลำเลียงดินของสกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดิน

อัตราการลำเลียงดินของสกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดินขึ้นอยู่กับแรงดัน Face Pressure ซึ่งเป็นแรงลัพธ์ของแรงดันดินในห้องพักดิน หาก Face Pressure ต่ำจะส่งผลให้แรงดันดินหน้า TBM สูงกว่าแรงดันดินในห้องพักดิน ดังนั้นจึงต้องลดแรงดันดินที่หน้า TBM โดยการเพิ่มอัตราเร็วการยืดขา Shield Jack และเพิ่มอัตราการลำเลียงดินของสกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดิน ในขณะเดียวกันหาก Face Pressure สูงแสดงว่ากำลังขุดเจาะในชั้นดินแข็งทำให้แรงดันดินในห้องพักดินสูงกว่าแรงดันดินที่หน้า TBM ดังนั้นจึงต้องลดอัตราเร็วของการยืดขา Shield Jack และลดอัตราการลำเลียงดินของสกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดิน

3.8 การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting)

การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์เป็นวิธีการเติมวัสดุเข้าไปในช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างดาดผนังอุโมงค์ด้านหลัง TBM (Tail Void) กับดินที่อยู่โดยรอบเพื่อป้องกันการสูญเสียมวลดินและลดการทรุดตัวของดินอีกทั้งยังป้องกันการไหลซึมของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ โดยจะอัดฉีดทิ้งระยะประมาณ 3 ดาดผนังอุโมงค์ ตัวอย่างเช่น ขณะเริ่มขุดเจาะที่ดาดผนังอุโมงค์ลำดับที่ 10 ก็จะเริ่มอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ลำดับที่ 7 เป็นต้น วัสดุที่นำไปใช้งานจะต้องไม่เกิดการแยกตัว มีความสามารถในการทำงานได้ดี เกิดการหดตัวน้อย กำลังเพิ่มขึ้นเร็วและมีค่ามากกว่ากำลังของดิน และเป็นวัสดุที่ทึบน้ำสามารถป้องกันการซึมของน้ำได้ ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุที่เรียกว่า

Clay-Cement โดยมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพเป็นที่ต้องการ และมีความสามารถทำงานได้ดี

การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์มี 2 รูปแบบคือ การอุดช่องว่างแบบไม่ต่อเนื่องที่เรียกว่า Separate Grouting Method เป็นการอัดฉีดวัสดุด้วยแรงดันไปตามท่อผ่านรูที่เตรียมไว้ในดาดผนังอุโมงค์ (Grout Hole) ท้ายสุดที่เคลื่อนที่ออกจาก TBM โดยไม่จำเป็นต้องทำการอุดช่องว่างให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของ TBM สำหรับรูปแบบที่ 2 เป็นการอุดช่องว่างแบบต่อเนื่องที่เรียกว่า Simultaneous Grouting Method โดยวัสดุจะถูกยิงผ่านอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ที่ตู้ Backup System ซึ่งอยู่บริเวณด้านหลัง TBM ตลอดเวลาที่ TBM มีการเคลื่อนที่ อัตราการอัดฉีดสามารถทำได้ด้วยอัตราคงที่หรือปรับเพิ่มขึ้น/ลดลงให้สอดคล้องกับอัตราการเคลื่อนที่ของ TBM โดยทั่วไปการอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ทั้ง 2 รูปแบบจะทำ 2 ครั้งคือ Primary Grouting และ Secondary Grouting มีรายละเอียดดังนี้

3.8.1 Primary Grouting จะเริ่มดำเนินการในขณะที่ดาดผนังอุโมงค์ที่ทำการติดตั้งเป็นวงรอบเรียบร้อยแล้วกำลังเคลื่อนตัวผ่านส่วนท้ายของ TBM มีรายละเอียดดังนี้

(1) ติดตั้ง Injection Pipe และ Grouting House เข้ากับช่อง Grout Hole และเริ่มทำการอัดฉีดโดยใช้แรงดันประมาณ 2-3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร โดยทำการบันทึกปริมาณของวัสดุที่ใช้ทุกครั้ง

(2) หลังจากที่ทำการอัดฉีดเสร็จเรียบร้อยจะทำการปิดช่อง Grout Hole ด้วย Grout Hole Plug และเป็นการสิ้นสุดการทำงานของตำแหน่งนี้

(3) ย้ายการทำ Primary Grouting ไปที่ตำแหน่งถัดไป

3.8.2 Secondary Grouting จะเริ่มดำเนินการหลังจากการทำ Primary Grouting เสร็จเรียบร้อยแล้ว สำหรับการอุดช่องว่างแบบต่อเนื่องนั้นจะต้องทำก่อนที่ขบวนตู้ Backup System ที่บรรจุเครื่องมือและอุปกรณ์จะเคลื่อนผ่านตำแหน่งที่ต้องการ การอัดฉีดใช้แรงดันประมาณ 2-3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และใช้เครื่องอัดฉีดเครื่องเดียวกับ Primary Grouting (อาจใช้ Hand-Operated Grout Pump แทนได้ในกรณีที่เกิดเหตุขัดข้อง) มีรายละเอียดดังนี้

(1) เลือกตำแหน่งของดาดผนังอุโมงค์ที่จะทำการอุดช่องว่างโดยเลือกตำแหน่งของ Grout Hole ที่มีรอยน้ำซึมหรือรั่วหรือสุ่มตัวอย่างจำนวน 5 วงต่อการทำ Secondary Grouting 1 ครั้ง

(2) เปิด Grout Hole Plug พร้อมทำความสะอาดช่อง Grout Hole ใช้สว่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 28 มม. ยาว 400 มม. เจาะทะลุผ่านตำแหน่งที่จะทำการอัดฉีด (ยกเว้นตำแหน่ง Key Segment)

(3) ติดตั้ง Injection Pipe และ Grout Hose เข้ากับช่อง Grout Hole และเริ่มทำการอัดฉีดโดยใช้แรงดันประมาณ 2-3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ทำการบันทึกปริมาณวัสดุที่ใช้ทุกครั้ง

(4) เคลื่อนย้ายอุปกรณ์ต่างๆ ไปยังตำแหน่งที่จะทำการอุดช่องว่างตำแหน่งถัดไปโดยไม่ต้องถอด Injection Pipe ออกจากตำแหน่งเดิมจนกระทั่งวัสดุแข็งตัวเพราะอาจทำให้วัสดุที่ยังเป็นสารละลายอยู่ไหลออกมาได้

(5) ติดตั้ง Grout Hole Plug กลับคืนเหมือนเดิม เป็นการสิ้นสุดการทำงาน ณ ตำแหน่งนี้ หลังจากนั้นจึงย้ายตำแหน่งการทำ Secondary Grouting ไปยังตำแหน่งถัดไป

รูปที่ 3.12 และ 3.13 แสดงการอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์และโรงงานสำหรับใช้ผลิตวัสดุอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ซึ่งตั้งอยู่บริเวณปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์ ตามลำดับ

รูปที่ 3.12 การอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Metropolitan Rapid Transit Authority [MRTA], 2546)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.13 โรงงานสำหรับใช้ผลิตวัสดุอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

3.9 การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

ดาดผนังอุโมงค์เป็นโครงสร้างที่ทำหน้าที่ค้ำยันและรับแรงภายนอกรอบอุโมงค์ที่เกิดจากแรงดันดินและแรงดันน้ำใต้ดินโดยจะใช้ Normal Ring สำหรับอุโมงค์ในแนวเส้นตรงและ Tapered Ring สำหรับแนวโค้ง การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดดังนี้

3.9.1 Primary Segment Lining แสดงในรูปที่ 3.14 เป็นดาดผนังอุโมงค์ที่ติดตั้งโดยใช้เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ โดยจะสลับให้ดาดผนังอุโมงค์ที่อยู่ติดกันมีช่องว่างไม่ตรงกัน และเพื่อให้ทำการติดตั้งได้ง่ายจึงเริ่มติดตั้งจากดาดผนังอุโมงค์ส่วนล่างตามด้วยส่วนกลางและส่วนบนตามลำดับ ชิ้นสุดท้ายจะเป็น Key มีลักษณะเป็นลิ่มโดยจะติดตั้งที่ด้านบนของอุโมงค์เนื่องจากเป็นส่วนที่ประกอบเป็นชิ้นสุดท้ายของดาดผนังอุโมงค์ นอกจากนี้ดาดผนังอุโมงค์ทุกชิ้นจะติดยางกันซึมที่ขอบชนิดพิเศษซึ่งมีคุณสมบัติสามารถพองตัวเมื่อถูกน้ำช่วยปิดรอยต่อตลอดเวลาเพื่อป้องกันน้ำเข้าอุโมงค์

รูปที่ 3.14 ดาดผนังอุโมงค์ที่ประกอบครบเป็นวง (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

3.9.2 Secondary Segment Lining เป็นดาดผนังอุโมงค์ที่เสริมเข้าไปเพื่อช่วยให้ผิวด้านในของอุโมงค์เรียบขึ้นและป้องกันน้ำซึมผ่านเข้าไปภายในอุโมงค์ โดยจะติดตั้งที่ด้านในของ Primary Segment Lining ลักษณะโครงสร้างมีทั้งคอนกรีตเสริมเหล็ก (ท่อหล่อในที่และท่อหล่อสำเร็จ) และท่อเหล็ก ความหนาขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความสามารถในการทำงานได้ของอุโมงค์

3.10 การนำดินไปทิ้งและขนส่งดาดผนังอุโมงค์

ดินที่ขุดเจาะได้จะถูกนำไปทิ้งนอกอุโมงค์โดยใช้ Gantry Crane แสดงในรูปที่ 3.15 ยกรถขนถ่ายดินขึ้นไปบนพื้นดินเพื่อนำดินไปทิ้งที่บ่อพักดินทีละคัน และเมื่อนำดินไปทิ้งเสร็จเรียบร้อย Gantry Crane จะยกรถขนถ่ายดินลงไปไว้ในอุโมงค์เพื่อประกอบเป็นขบวนรถจักรต่อไป หลังจากนำดินไปทิ้งครบทุกคันแล้ว Gantry Crane จะนำดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่จากที่กองเก็บพร้อมทั้งวัสดุที่ใช้ในการขุดเจาะและประกอบผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์เพื่อเตรียมไว้ล่วงหน้าสำหรับขบวนรถจักรขบวนต่อไป

ขบวนรถจักรที่ใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ประกอบด้วยหัวรถจักร (Locomotive) แสดงในรูปที่ 3.16 รถขนถ่ายดินและรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์แสดงในรูปที่ 3.17 จำนวนรถขนถ่ายดินที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณดินต่อหนึ่งระยะขุดเจาะอุโมงค์ที่กำหนดโดยแต่ละคันสามารถบรรจุดินได้ 5-7 ลบ.ม. สำหรับรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์นั้นโดยทั่วไปจะใช้ 2 คัน บรรจุดาดผนังอุโมงค์ได้คันละ 3 ชิ้น

รูปที่ 3.15 Gantry Crane (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

รูปที่ 3.16 หัวรถจักร (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

รูปที่ 3.17 รถขนถ่ายดินและรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

3.11 การต่อรางสำหรับขบวนรถจักรและรางสำหรับตู้ Backup System

การต่อรางสำหรับขบวนรถจักรและตู้ Backup System จะไม่ต่อพร้อมกันโดยการต่อรางสำหรับตู้ Backup System จะทำการต่อเมื่อรางด้านหลังพ้นระยะตู้ Backup System ท้ายสุด โดยจะนำรางด้านหลังที่พ้นระยะมาต่อที่ด้านหน้าและสามารถให้คนงานที่ประจำอยู่ด้านหลัง TBM ทำการต่อได้ในขณะที่ TBM กำลังขุดเจาะ ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ ในขณะที่การต่อรางสำหรับขบวนรถจักรนั้นจะเริ่มได้เมื่อด้านหลัง TBM มีระยะเพียงพอในการต่อรางและจะต้องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยแล้วเท่านั้น จึงทำให้การต่อรางสำหรับขบวนรถจักรมีผลต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ สำหรับรางที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดจะมี 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดความยาว 3 เมตรสำหรับทางโค้ง ขนาดความยาว 5 เมตร และ 7 เมตรสำหรับทางตรง

3.12 การสำรวจและตรวจสอบอุโมงค์

การสำรวจและตรวจสอบอุโมงค์แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ (ถาวร แก้วญานะ และ บารมินทร์ เจริญพานิช, 2544)

3.12.1 การสำรวจแนวอุโมงค์และแนวระดับ

การสำรวจแนวอุโมงค์และแนวระดับสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ประกอบด้วยหน่วยสำคัญ 2 หน่วยคือ หน่วยเป้ารับแสงเลเซอร์และหน่วยวัดสภาวะของเครื่องเจาะ แต่ละหน่วยอาศัยเซ็นเซอร์ตรวจสอบแล้วส่งต่อไปยังหน่วยรวบรวมข้อมูลและหน่วยควบคุมการทำงาน หน่วยเป้ารับแสงเลเซอร์เป็นหน่วยที่ใช้รับแสงเลเซอร์ที่ยิงมาจากกล้องแนวใช้แสงเลเซอร์โดยจะวัดพิกัดและมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์แล้วส่งข้อมูลไปคำนวณหาตำแหน่งหัวเจาะ หน่วยวัดสภาวะของเครื่องเจาะจะวัดขนาดและทิศทางการหมุนรอบตัวเองและการก้มหรือเงยของแกนเครื่องเจาะ หลังจากนั้นจึงให้ช่างสำรวจทำการตรวจสอบเปรียบเทียบอีกครั้ง สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจแนวอุโมงค์และแนวระดับมีดังนี้

- **กล้องแนวใช้แสงเลเซอร์** เป็นกล้องที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นแนวเล็งไปกระทบเป้ารับแสงเพื่อหาระยะทางและทิศทางโดยจะต้องทราบพิกัดฉากและระดับของจุดตั้งกล้อง
- **หน่วยรับแสงเลเซอร์** ทำด้วยโลหะรูปทรงกระบอก ด้านหน้าเป็นเป้าหรือจอรับแสงเลเซอร์คือเป้าที่หนึ่ง และภายในกระบอกมีจอรับแสงคือเป้าที่สอง หน่วยนี้จะติดตั้งที่ด้านท้ายของ TBM ในตำแหน่งที่กล้องสามารถมองเห็นได้ และสามารถหมุนในระนาบดิ่งและขยับไปทางซ้ายหรือขวาได้เพื่อให้รับแสงเลเซอร์ตลอดเวลาที่ขุดเจาะอุโมงค์
- **หน่วยวัดสภาวะ** TBM มีลักษณะเป็นกล่องโลหะสี่เหลี่ยมผืนผ้าวางในแนวตั้งติดตั้งใน TBM ภายในกล่องมีเซนเซอร์หรือหลอดไฟรับสภาวะของ TBM แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งต่อไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง หน้าที่ของหน่วยวัดสภาวะของ TBM คือวัดการหมุนตัวและการก้มหรือเงยของ TBM โดยบอกเป็นมุมองศาหรือระยะที่บอกเป็นมิลลิเมตร/ระยะดิ่ง 1 เมตร
- **หน่วยรวบรวมข้อมูล** เป็นกล่องโลหะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ภายในห้องบังคับการของ TBM มีหน้าที่ดังนี้

(1) กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยรับแสงเลเซอร์

(2) กลั่นกรองและรวบรวมข้อมูลจากหน่วยวัดสภาวะของ TBM

(3) จัดหากำลังไฟฟ้าให้กับหน่วยรับแสงเลเซอร์

(4) เตรียมส่งข้อมูลไปยังหน่วยที่เกี่ยวข้อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **หน่วยควบคุมการทำงาน** เป็นหน่วยสุดท้ายของระบบนำทางมีจอแสดงผล หน่วยประเมินผล และโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อคำนวณค่าที่จำเป็น เช่น ตำแหน่งหัวเจาะและจุดเลเซอร์ ณ ขณะนั้น ขนาดและทิศทางการหมุนตัว ขนาดและทิศทางการเอียงของ TBM และสามารถป้อนข้อมูลต่างๆ ได้ เช่น ค่า Offset ทางราบและทางดิ่ง เป็นต้น

3.12.2 การตรวจสอบทางธรณีวิทยา

การตรวจสอบทางธรณีวิทยาจะใช้อุปกรณ์ในการตรวจสอบดังนี้

- Surface Settlement Point ใช้ตรวจสอบการทรุดตัวที่ผิวดิน
- Building Settlement Point ใช้ตรวจสอบการทรุดตัวของอาคารบริเวณใกล้เคียง
- Inclinometer ใช้ตรวจสอบการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นดิน
- Extensometer ใช้ตรวจสอบการทรุดตัวของชั้นดินที่ความลึกต่างๆ
- Convergence Bolt ใช้ตรวจสอบการเสียรูปของอุโมงค์

3.13 สรุปท้ายบท

บทนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ TBM ซึ่งประกอบด้วยการพิจารณาเลือกใช้ TBM การแบ่งชนิดของ TBM เป็น 2 ชนิด ได้แก่ Open-Face TBM และ Closed-Face TBM โดย Closed-Face TBM สามารถแบ่งได้ 4 ชนิดคือ Mechanical Support, Compressed Air Shield, Slurry Shield และ EPB ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ต่อมาได้ศึกษาถึงชนิดฟันขุดเจาะของ Closed-Face TBM ซึ่งมี 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ ชนิดที่ใช้ในงานขุดเจาะหินและชนิดที่ใช้ในงานขุดเจาะดิน หลังจากนั้นจึงได้ศึกษาลงไปในรายละเอียดของเทคโนโลยีและกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ Closed-Face TBM ประเภทค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีก่อสร้างอุโมงค์ที่งานวิจัยนี้ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ในขั้นตอนต่อไป

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

บทที่ 4 ได้แสดงรายละเอียดขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากที่ได้ศึกษาและรวบรวมเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและได้ทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์เรียบร้อยแล้ว มีรายละเอียดดังนี้

4.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ขึ้นมา 2 ประเภทได้แก่ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ซึ่งเป็นแบบจำลองสถานการณ์อย่างง่าย และแบบจำลองสถานการณ์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ได้แก่ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยกำหนดขั้นตอนการพัฒนาเป็น 6 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.1 มีรายละเอียดดังนี้

(1) วิเคราะห์หาระดับชั้นการจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

(2) เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameter) ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

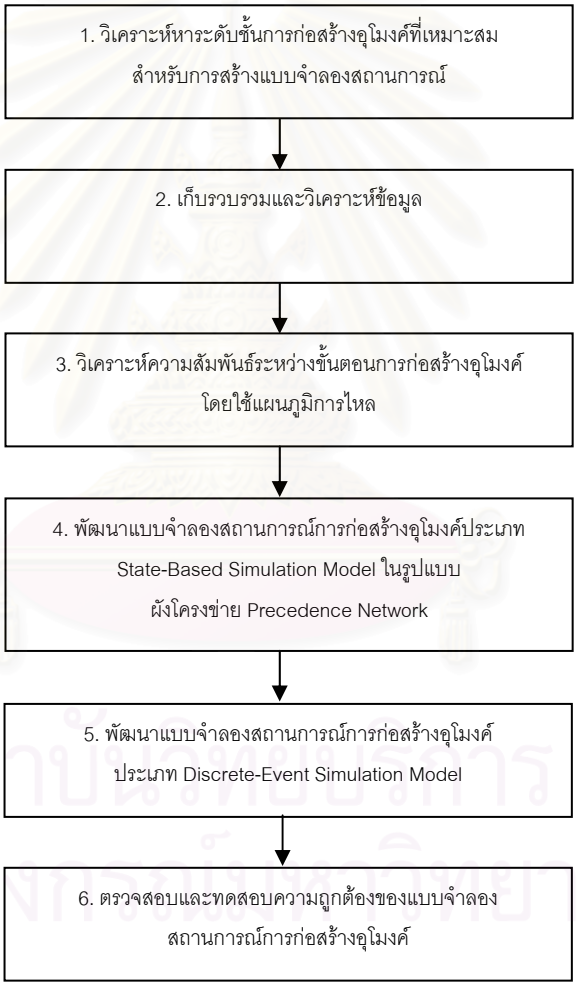
(3) ใช้แผนภูมิการไหล (Flow Chart) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

(4) พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network โดยใช้โปรแกรม ProbSched ทำการจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่มีการใช้ทรัพยากรแตกต่างกัน และนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวไปใช้ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) ในขั้นต้นด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic ตามลำดับ

(5) พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยใช้โปรแกรม Stroboscope ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่ายและไม่เสียค่าใช้จ่ายมาใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ สำหรับค่าความไม่แน่นอนต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการก่อสร้าง เช่น ความล่าช้าเนื่องจากขบวนรถจักรตกราง ความล่าช้าเนื่องจากการ

ขาดวัสดุ และเครื่องจักรเสียจนต้องหยุดทำงาน เป็นต้น จะใช้วิธีการประมาณความน่าจะเป็น (Probabilistic Estimating Method) มาช่วยในการประมาณเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

(6) ตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) และทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model และ Discrete-Event Simulation Model เพื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมของแบบจำลองสถานการณ์ว่าตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ และสร้างความเชื่อมั่นว่าค่าที่ได้มีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

4.2 การวิเคราะห์ระดับชั้นการจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์สำหรับโครงการก่อสร้างนั้นผู้พัฒนาจะต้องคำนึงถึงระดับชั้นการจัดการซึ่งมีทั้งหมด 6 ระดับแสดงในรูปที่ 4.2 ได้แก่

(1) ระดับองค์กร (Organization Level)

(2) ระดับโครงการ (Project Level)

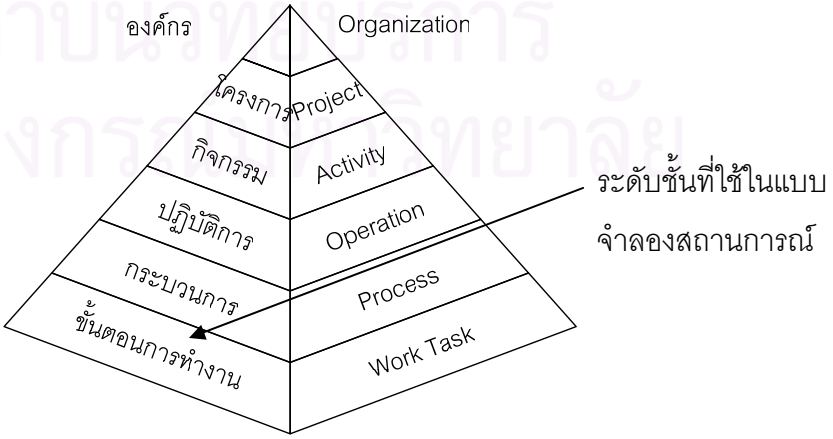
(3) ระดับกิจกรรม (Activity Level)

(4) ระดับปฏิบัติการ (Operation Level)

(5) ระดับกระบวนการทำงาน (Process Level)

(6) ระดับขั้นตอนการทำงาน (Work Task Level)

โดยทั่วไปผู้บริหารระดับสูงมักจะมุ่งเน้นความสนใจไปที่ระดับองค์กรและระดับโครงการ เนื่องจากผู้บริหารในระดับนี้จะสนใจว่าต้นทุนและระยะเวลาก่อสร้างในแต่ละโครงการอยู่ภายใต้แผนงานที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยไม่มุ่งเน้นไปในรายละเอียดของโครงการว่าต้องทำอย่างไรจึงจะสามารถทำได้ตามแผนงานที่วางไว้มากนัก ในขณะที่ผู้บริหารระดับกลางและระดับล่างจะมุ่งเน้นความสนใจไปที่ระดับชั้นการจัดการที่ต่ำกว่า ได้แก่ ระดับปฏิบัติการ ระดับกระบวนการทำงาน และระดับขั้นตอนการทำงาน เนื่องจากผู้บริหารระดับนี้เป็นระดับที่ต้องจัดการงานก่อสร้างภายในโครงการ ดังนั้นจึงมุ่งความสนใจไปที่วิธีการก่อสร้างเพื่อที่จะได้ทำการจัดสรรทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะทำให้เวลาสูญเปล่า (Idle Time) ของทรัพยากรในโครงการลดน้อยลง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในระดับขั้นตอนการทำงานเพื่อให้ผู้ใช้ที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนงานโครงการสามารถนำไปใช้ในการทำงานจริงได้



รูปที่ 4.2 ระดับชั้นการจัดการงานก่อสร้าง

4.3 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้าในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในกรณีที่ใช้แบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนก่อนการก่อสร้างอุโมงค์นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากโครงการในอดีตที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกับโครงการที่ศึกษาหรือจากการสัมภาษณ์วิศวกรผู้เชี่ยวชาญ แต่ในกรณีที่ใช้แบบจำลองสถานการณ์สำหรับการปรับปรุงแผนการดำเนินงานของโครงการก่อสร้างที่ได้เริ่มดำเนินการไปแล้วบางส่วนนั้นสามารถใช้ข้อมูลของโครงการที่ศึกษาในส่วนที่ดำเนินการเสร็จสมบูรณ์แล้วได้ สำหรับการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย แหล่งที่มาของข้อมูล ประเภทของข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล

แหล่งที่มาของข้อมูลสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้

(1) ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการ เช่น ข้อมูลคุณสมบัติของ Tunnel Boring Machine (TBM) ข้อมูลคุณสมบัติของหัวรถจักร (Locomotive) และข้อมูลตู้ Backup System เป็นต้น

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการหรือจากโครงการในอดีตที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกันกับโครงการที่ศึกษา เช่น บันทึกการทำงานของ TBM (TBM Record) บันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Excavation Record) รายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ (Segment Inspection Report) และรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด (Tunneling Work Shift Report) เป็นต้น

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ที่โครงการได้วางแผนไว้

(4) ข้อมูลจากสถิติการทำงานที่ได้บันทึกไว้และจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการหรือจากโครงการในอดีตที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกันกับโครงการที่ศึกษา

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีรูปแบบเดียวกันกับโครงการที่ศึกษา

4.3.2 **ประเภทของข้อมูล**

ข้อมูลที่ใช้สามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ข้อมูลด้านเทคนิคและแผนงานโครงการ ข้อมูลสถิติการทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง และข้อมูลสถิติเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อการก่อสร้างอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

- **ข้อมูลด้านเทคนิคและแผนงานโครงการ**

(1) ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

(2) แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละช่วงของโครงการ ได้แก่

- แผนงานช่วง Initial Drive เป็นแผนงานช่วงเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์
- แผนงานช่วง Main Drive เป็นแผนงานหลัก การทำงานจะต่อเนื่องเป็นวงรอบ

(3) แผนงานสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น แผนงานเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) แผนงานติดตั้งและเคลื่อนย้ายรางพักตามระยะทางที่กำหนด และแผนงานซ่อมบำรุงเครื่องจักร เป็นต้น โดยแผนงานสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละโครงการอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแผนงานและสภาพแวดล้อมของโครงการนั้นๆ

(4) สภาพชั้นดินที่ก่อสร้าง

(5) แนวเส้นทางการก่อสร้าง

- ขนาดของอุโมงค์
- ความยาวของอุโมงค์
- เส้นทางการเคลื่อนที่ของ TBM

(6) รายละเอียดเครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่

- จำนวนและอัตราการขุดเจาะของ TBM
- จำนวนและอัตราเร็วของหัวรถจักร
- จำนวนและอัตราการทำงานของ Gantry Crane
- จำนวนและความจุของรถขนถ่ายดิน (Muck Car) และรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car)
- จำนวนและมิติของตู้ Backup System

(7) ผลัดการทำงานต่อวันและจำนวนคนงานต่อผลัดการทำงาน

(8) มิติและตำแหน่งของรางพัก

(9) มิติและตำแหน่งของปล่องขนถ่ายดิน (Shaft)

(10) กฎการเดินทางของขบวนรถจักร (Train Policy) ภายในอุโมงค์

- **ข้อมูลสถิติการทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง** แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ข้อมูลกลุ่มแรกเป็นขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ในปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์และบนพื้นดิน ได้แก่

(1) เวลาที่ใช้นำดินไปทิ้ง

(2) เวลาที่ใช้บรรจุดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) ชุดใหม่

(3) เวลาที่ใช้ติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร

(4) เวลาที่ใช้เปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับหัวรถจักร

(5) เวลาที่ใช้ตรวจสอบเครื่องจักรอุปกรณ์เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด

(6) เวลาที่ใช้เตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ เช่น การเปลี่ยนกลุ่มคนงานและถ่ายทอดงานในช่วงจบผลัดการทำงาน การตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องจักรก่อนทำงาน เป็นต้น

(7) เวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์และบนพื้นดิน

ข้อมูลกลุ่มที่ 2 เป็นขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในอุโมงค์ ได้แก่

(1) เวลาที่ใช้ขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM

(2) เวลาที่ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่ด้านหลัง TBM เพื่อรอติดตั้ง

(3) เวลาที่ใช้ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

(4) เวลาที่ใช้ตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

(5) เวลาที่ใช้ต่อรางสำหรับขบวนรถจักร

(6) เวลาที่ใช้ต่อรางสำหรับตู้ Backup System

(7) เวลาที่ขบวนรถจักรใช้เดินทางภายในอุโมงค์ระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์

(8) เวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ที่อยู่ภายในอุโมงค์

- **ข้อมูลสถิติเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อการก่อสร้างอุโมงค์**

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อการก่อสร้างอุโมงค์สามารถเก็บรวบรวมได้จากข้อมูลโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในอดีตและจากการสัมภาษณ์วิศวกรที่มีประสบการณ์ในงานก่อสร้างอุโมงค์ที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกันกับโครงการที่ศึกษา โดยพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวและพารามิเตอร์นำเข้าการแจกแจงข้อมูลเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้น สำหรับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในโครงการก่อสร้างอุโมงค์และมีผลกระทบต่อการก่อสร้างอุโมงค์มีดังนี้

(1) ขบวนรถจักรตกราง

(2) Gantry Crane ขัดข้อง

(3) TBM และระบบสนับสนุนการขุดเจาะขัดข้อง

(4) เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Erector) และระบบสนับสนุนการการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ขัดข้อง

(5) การใช้เครื่องจักรสำรองที่มีความสามารถในการทำงานต่ำกว่าเครื่องจักรหลักที่อยู่ในระหว่างการซ่อมแซมทำให้ประสิทธิภาพการก่อสร้างอุโมงค์ลดลง

(6) อื่นๆ เช่น ฝนตกหนักจน Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้ ระบบไฟฟ้าภายในอุโมงค์ขัดข้อง เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter) ขัดข้อง การส่งชนิดของดาดผนังอุโมงค์ผิดพลาด ระบบท่อส่งน้ำและท่ออากาศภายในอุโมงค์ขัดข้อง เป็นต้น

4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

การวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับประเมินระยะเวลาทำงานในแบบจำลองสถานการณ์ โดยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จะใช้ฐานนิยม (Mode) ทำการประเมินค่าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ สำหรับแบบจำลองสถานการณ์ประเภท State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic และแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model จะทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการแจกแจงของข้อมูล โดยแบ่งกลุ่มข้อมูลที่วิเคราะห์เป็น 2 กลุ่มดังนี้

- **ข้อมูลสถิติการทำงานของโครงการที่ได้บันทึกไว้และจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้าง**

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าการแจกแจงของข้อมูลจะต้องทำการวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ต้องการศึกษาโดยใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5%

$$n = \left[\frac{\frac{k}{s}\sqrt{n'\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}{\sum x_i} \right]^2 \qquad (4.1)$$

เมื่อ n = จำนวนครั้งที่ต้องจับเวลา (เพื่อให้ได้ระดับความเชื่อมั่นและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนด)

n' = จำนวนครั้งที่ได้จับเวลาตัวอย่างจริง

s = เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (Limit of Error)

k = ค่าสัมประสิทธิ์กำหนดตามระดับความเชื่อมั่น แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า k ที่ใช้ในสมการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่าง

ระดับความเชื่อมั่น	ค่า k
68.30	1
95.50	2
99.70	3

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์หาค่าการแจกแจงของข้อมูลโดยใช้การทดสอบสมมติฐานด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่า Goodness of Fit Test โดยใช้วิธีการทดสอบ Chi-Square ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% โดยจะยอมรับว่ามีการแจกแจงตามที่คาดการณ์ไว้เมื่อ $\chi^2 < \chi^2_{\alpha,k-m-1}$ หรือ P-Value > 0.05 สำหรับค่า χ^2 คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4.2

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \qquad (4.2)$$

เมื่อ χ^2 = ค่าที่ได้จากการทดสอบ

$\chi^2_{\alpha,k-m-1}$ = ค่าที่ได้จากตารางค่าวิกฤตของการแจกแจง Chi-Square

P-Value = ระดับนัยสำคัญต่ำสุดที่สามารถปฏิเสธว่าข้อมูลที่ทดสอบมีการแจกแจงต่างจากที่คาดไว้

O_i = ความถี่หรือจำนวนครั้งที่เกิดในช่วงระดับชั้นที่ i ที่เกิดขึ้นจริงของกลุ่มตัวอย่างขนาด n

E_i = ความถี่หรือจำนวนครั้งที่เกิดในช่วงระดับชั้นที่ i ที่คาดว่าจะเกิด

α = ระดับนัยสำคัญ (Significance Level)

k = จำนวนช่วงระดับชั้นที่ศึกษา

m = จำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องประมาณค่า

d.f. = องศาเสรี (Degree of freedom) มีค่าเท่ากับ $k - m - 1$

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงสำหรับงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์เฉพาะการแจกแจงที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรม ProbSched และ Stroboscope ได้เท่านั้น ได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform Distribution) การแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแบบแกมม่า และการแจกแจงแบบเบต้า ในกรณีที่พบว่าการแจกแจงที่ทดสอบไม่ตรงตามการแจกแจงที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จะใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) ซึ่งเป็นเทคนิคการประมาณค่า 3 จุดรูปแบบหนึ่งไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยหลักการของ PERT นั้นจะนำเอาวิธีทางสถิติและความน่าจะเป็นไปใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนก่อสร้าง แสดงสมการที่ใช้ในสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$D_i = \frac{OPT_i + 4ML_i + PES_i}{6} \qquad (4.3)$$

$$V_i = \frac{\left| PES_i - OPT_i \right|}{6} \qquad (4.4)$$

เมื่อ D_i = ระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการก่อสร้าง i

V_i = ความแปรปรวนของขั้นตอนการก่อสร้าง i

OPT_i = Optimistic Duration เป็นระยะเวลาทำงานเร็วที่สุดที่เกิดขึ้นในขั้นตอน i

PES_i = Pessimistic Duration เป็นระยะเวลาทำงานช้าที่สุดที่เกิดขึ้นในขั้นตอน i

ML_i = Most Likely Duration เป็นระยะเวลาทำงานปกติที่เกิดขึ้นในขั้นตอน i

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **ข้อมูลสถิติการทำงานของโครงการในกรณีที่มีจำนวนกลุ่มตัวอย่างไม่เพียงพอในการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงและข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์**

ข้อมูลกลุ่มที่ไม่สามารถจับเวลาขั้นตอนการทำงานและไม่มีบันทึกไว้ในเอกสารโครงการจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์วิศวกรที่มีประสบการณ์โครงการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้ TBM ที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกันกับโครงการที่ศึกษา หลังจากนั้นจึงใช้ PERT ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง และในกรณีที่มีข้อมูลแต่ไม่เพียงพอในการวิเคราะห์หาค่าการแจกแจงก็จะใช้ PERT ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกัน

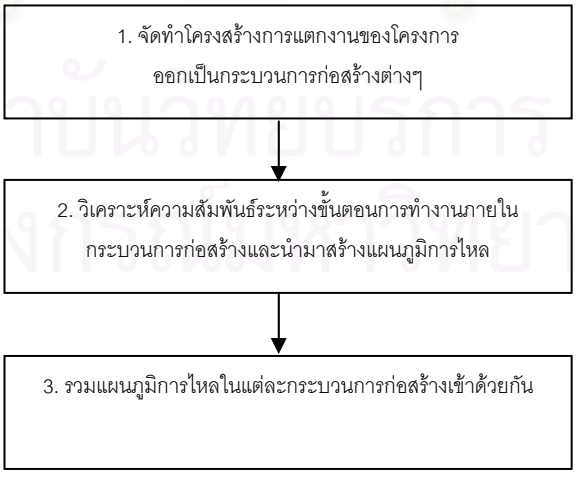
4.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้แผนภูมิการไหล

การใช้แผนภูมิการไหลเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 4.3 ได้แก่

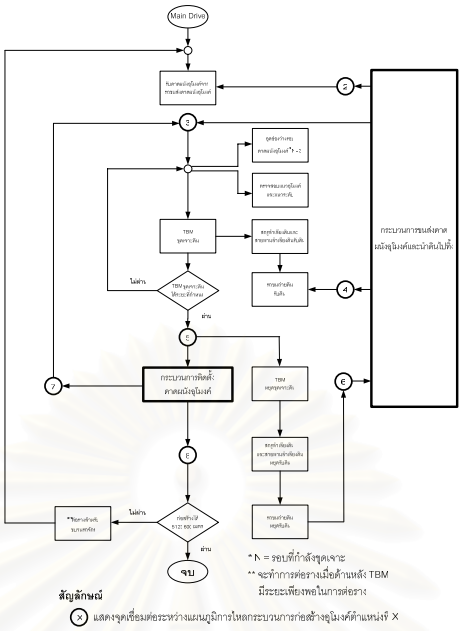
(1) จัดทำโครงสร้างการแตกงาน (Work Breakdown Structure, WBS) ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ออกเป็นกระบวนการก่อสร้างต่างๆ ได้แก่ กระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ กระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง

(2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการทำงานภายในกระบวนการก่อสร้างและนำไปสร้างแผนภูมิการไหลในแต่ละกระบวนการก่อสร้างดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.4

(3) รวมแผนภูมิการไหลในแต่ละกระบวนการก่อสร้างเข้าด้วยกันเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ทั้งระบบ



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้แผนภูมิการไหล

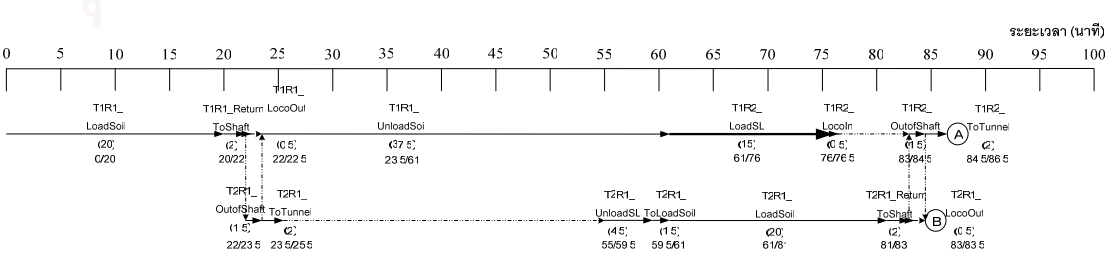


รูปที่ 4.4 ตัวอย่างแผนภูมิการไหล

4.5 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

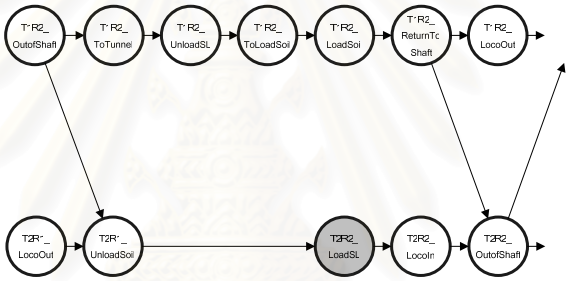
การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model มีขั้นตอนการพัฒนา 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) นำความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแผนภูมิการไหล ข้อมูลโครงการ และพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ประเมินค่าโดยใช้ฐานนิยมของโครงการที่ศึกษามาสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่มีการใช้ทรัพยากรแตกต่างกันเพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตรวจสอบความถูกต้องตามหลักตรรกะของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

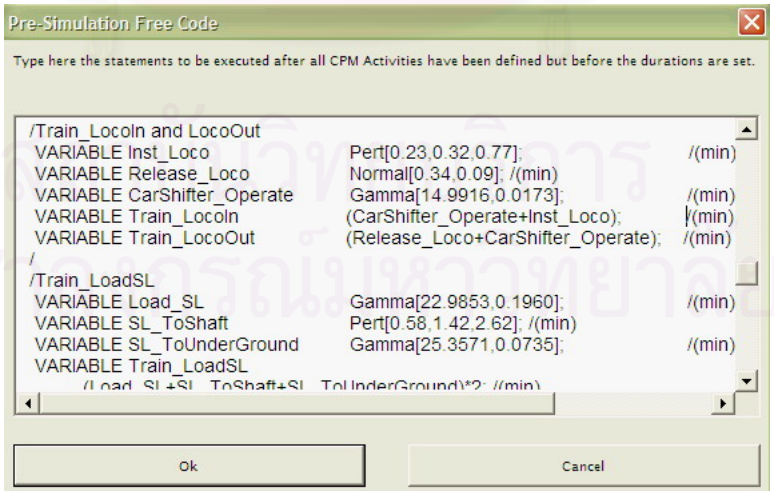


รูปที่ 4.5 ตัวอย่างผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network

(2) นำโปรแกรม ProbSched ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมของโปรแกรม Stroboscope มาสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ทำการสร้างให้มีรายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตำแหน่งก่อสร้างเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.6 สำหรับการสร้างชุดคำสั่งของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวด้วยโปรแกรม ProbSched แสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.7 นั้นจะใช้คำสั่งเดียวกับที่ใช้ในโปรแกรม Stroboscope เช่น คำสั่ง VARIABLE ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่มีค่าคงที่ สมการ และเงื่อนไขที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการก่อสร้างอุโมงค์ คำสั่ง DURATION ใช้กำหนดระยะเวลาทำงานที่ใช้แต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์ เป็นต้น



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผังโครงข่าย Precedence Network



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม ProbSched

(3) ขั้นตอนต่อไปจะนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้ประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic ตามลำดับ โดยค่าประมาณที่ได้เป็นเพียงค่าประมาณอย่างหยาบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขั้นต้นเท่านั้น สำหรับค่าพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้นั้นในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จะใช้ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ประเมินโดยใช้ฐานนิยมเช่นเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้น และในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic นั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงของข้อมูลร่วมกับการใช้ PERT ทำการประเมินค่าดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

4.6 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ในขั้นแรกจะทำการสร้างผังโครงข่ายเพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยลักษณะของผังโครงข่ายจะประกอบด้วยสัญลักษณ์ของแบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork, Queue และ Link หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลโครงการและพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการที่ศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลร่วมกับการใช้ PERT ประเมินค่าดังที่ได้อธิบายรายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลไว้ในหัวข้อที่ 4.3.3 มาสร้างชุดคำสั่งของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้โปรแกรม Stroboscope และเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองสถานการณ์งานวิจัยนี้จึงได้แบ่งกลุ่มชุดคำสั่งออกเป็น 10 กลุ่มตามหน้าที่การทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 Resource and Decision Parameters เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการจัดเก็บข้อมูลของโครงการเพื่อใช้จัดสรรทรัพยากรและวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น ชนิดและจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น แบ่งกลุ่มชุดคำสั่งย่อยออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการจัดเก็บข้อมูลมีรายละเอียดดังนี้

- **Constant Parameters** ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่มีค่าคงที่ สมการ และเงื่อนไขที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้คำสั่ง

VARIABLE ตัวอย่างข้อมูลที่จัดเก็บเช่น จำนวน TBM และขบวนรถจักรที่ใช้ในโครงการ ตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์เริ่มต้นและสิ้นสุดโครงการ เป็นต้น

การใช้คำสั่ง VARIABLE และตัวอย่างการใช้มีดังนี้ (ค่าหลังเครื่องหมาย / ใช้ในการอธิบายแบบจำลองสถานการณ์เท่านั้นไม่มีผลต่อการคำนวณภายในแบบจำลองสถานการณ์)

VARIABLE ชื่อพารามิเตอร์ ค่า;

VARIABLE NumTBMs 1; /Number of TBMs

- **Array Parameters** ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่มีการอ้างอิงในรูปแบบของตารางโดยใช้คำสั่ง ARRAY สำหรับข้อมูลที่จัดเก็บได้แก่

(1) อัตราขุดเจาะอุโมงค์ตามสภาพชั้นดินที่แตกต่างกันของ TBM

(2) ระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ซึ่งมี 2 ระยะ ได้แก่ ระยะการขุดเจาะอุโมงค์ทางตรงและทางโค้ง

(3) อื่นๆ เช่น ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ภายในอุโมงค์ ระยะห่างระหว่างรางพักภายในแบบจำลองสถานการณ์ และตำแหน่งการขุดเจาะอุโมงค์ที่นำไปใช้ในการกำหนดแผนการทำงานในแต่ละช่วงการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น

การใช้คำสั่ง ARRAY มีรูปแบบดังนี้

ARRAY ชื่อพารามิเตอร์ จำนวนแถว จำนวนหลัก

{

ค่า (1, 1)	ค่า (1, 2)	⋯	ค่า (1, จำนวนหลัก)
ค่า (2, 1)	ค่า (2, 2)	⋯	ค่า (2, จำนวนหลัก)
⋮	⋮		⋮
ค่า (จำนวนแถว, 1)	ค่า (จำนวนแถว, 2)	⋯	ค่า (จำนวนแถว, จำนวนหลัก) };

ตัวอย่างการใช้คำสั่ง ARRAY มีดังนี้

ARRAY ExcRateTable 3 3 {

46	61	70
50	66	70
33	51	70 }; /(mm/min)

4.6.2 Auxiliary Parameters เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้สร้างพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลและสมการที่ใช้คำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้คำสั่ง COLLECTOR, SAVEVALUE และ VARIABLE แบ่งกลุ่มชุดคำสั่งย่อยออกเป็น 3 กลุ่มตามหน้าที่การทำงาน มีรายละเอียดดังนี้

- Collector Parameters ใช้สร้างพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลสำหรับการรวบรวมผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ทางสถิติในขั้นตอนต่อไป สำหรับผลลัพธ์ที่ต้องการจัดเก็บนั้นได้แก่ ผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาทำงานของขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ การใช้คำสั่ง COLLECTOR นั้นจะต้องใช้ร่วมกับคำสั่ง COLLECT เพื่อกำหนดให้ COLLECTOR เก็บรวบรวมค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยเครื่องหมาย * ที่อยู่ด้านหลังชื่อพารามิเตอร์ประเภท COLLECTOR นั้นจะกำหนดให้คำสั่ง CLEAR ซึ่งใช้ลบค่าเริ่มต้นและผลลัพธ์ทั้งหมดในแบบจำลองสถานการณ์ไม่ทำการลบค่าที่เก็บไว้ใน COLLECTOR ที่มีเครื่องหมายดังกล่าว (การใช้คำสั่ง COLLECT ที่กล่าวมาข้างต้นจะอยู่ในกลุ่มชุดคำสั่ง QUEUE Initialization and Simulating ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป)

การใช้คำสั่ง COLLECTOR และ COLLECT มีรูปแบบดังนี้

COLLECTOR ชื่อพารามิเตอร์*;
COLLECT ชื่อพารามิเตอร์ที่ต้องการสั่งให้เก็บค่า ค่าที่ต้องการจัดเก็บ;

ตัวอย่างการใช้คำสั่ง COLLECTOR และ COLLECT มีดังนี้

COLLECTOR Est_WorkingTime*; /Estimation Working Time (Day)
COLLECT Est_WorkingTime 'SimTime/60/24';

- Initial Value of the Auxiliary Parameters ใช้สร้างและกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่า ณ เวลาหรือระหว่างช่วงการก่อสร้างภายในแบบจำลองสถานการณ์โดยใช้คำสั่งของโปรแกรม Stroboscope ทำการเปลี่ยนแปลงค่าในภายหลังได้ ตัวอย่างเช่น พารามิเตอร์เก็บค่าสภาพชั้นดินที่ขุดเจาะในปัจจุบัน พารามิเตอร์เก็บค่าตำแหน่งการก่อสร้างในปัจจุบัน พารามิเตอร์เก็บค่าระยะห่างระหว่างรางพักและพารามิเตอร์เก็บค่าจำนวนขบวนรถจักรที่ใช้ภายในอุโมงค์ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อก่อสร้างอุโมงค์ได้ระยะทางมากขึ้น เป็นต้น สำหรับคำสั่งที่ใช้ในการสร้างและกำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่คำสั่ง SAVEVALUE

การใช้คำสั่ง SAVEVALUE และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

SAVEVALUE ชื่อพารามิเตอร์ ค่าเริ่มต้น;

SAVEVALUE TimeToRemoveMRail 0; /Time to Remove MRail

- **Condition and Equation of Auxiliary Parameters** ใช้สร้างพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลในรูปแบบของเงื่อนไขและสมการที่ใช้คำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์

4.6.3 Resource Types เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ มี 2 ประเภทได้แก่ Generic Resource Type และ Characterized Resource Type มีรายละเอียดดังนี้

- **Generic Resource Type** ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรทั่วไปที่ไม่มีคุณสมบัติเฉพาะโดยใช้คำสั่ง GENTYPE

การใช้คำสั่ง GENTYPE และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

GENTYPE ชื่อพารามิเตอร์ทรัพยากร;

GENTYPE TBM;

- **Characterized Resource Type** ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรที่สามารถกำหนดคุณสมบัติเฉพาะได้โดยใช้คำสั่ง CHARTYPE และใช้ร่วมกับคำสั่งต่างๆ ดังนี้

(1) SUBTYPE ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรย่อยของทรัพยากรประเภท Characterized Resource Type โดยจะทำการเก็บค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในคำสั่ง CHARTYPE เช่น ชื่อรุ่น ความเร็ว และความจุของขบวนรถจักร เป็นต้น

(2) SAVEPROP ใช้สร้างพารามิเตอร์เพื่อเก็บค่าที่ต้องการใช้ในการประมวลผลทรัพยากรประเภท Characterized Resource Type แต่ละตัวโดยเฉพาะ

(3) VARPROP ใช้สร้างพารามิเตอร์เพื่อเก็บค่าผลลัพธ์ของสมการที่กำหนดสำหรับใช้ในการประมวลผลทรัพยากรประเภท Characterized Resource Type แต่ละตัวโดยเฉพาะ

การใช้คำสั่ง CHARTYPE, SUBTYPE, SAVEPROP และ VARPROP มีรูปแบบดังนี้

CHARTYPE ชื่อพารามิเตอร์ทรัพยากร คุณสมบัติ 1 คุณสมบัติ 2 …;

SUBTYPE ชื่อพารามิเตอร์ทรัพยากร ชื่อพารามิเตอร์ ค่าคุณสมบัติ 1 ค่าคุณสมบัติ 2 …;

SAVEPROP ชื่อพารามิเตอร์ทรัพยากร ชื่อพารามิเตอร์;

VARPROP ชื่อพารามิเตอร์ทรัพยากร ชื่อพารามิเตอร์ สมการที่กำหนด;

ตัวอย่างการใช้คำสั่ง CHARTYPE, SUBTYPE, SAVEPROP และ VARPROP มีดังนี้

CHARTYPE Train IntDstToChangeBattery;/ (m)

SUBTYPE Train Xiandai 15000;

SAVEPROP Train TrainDst;

VARPROP Train BatteryStatus 'IntDstToChangeBattery - TrainDst';

4.6.4 Network Nodes เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้สร้างพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ตามผังโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ โดยแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์จะแสดงด้วยสัญลักษณ์แบบจำลองสถานการณ์ของโปรแกรม Stroboscope ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork และ Queue

การใช้คำสั่ง NORMAL, COMBI, CONSOLIDATOR, FORK และ QUEUE มีรูปแบบดังนี้

NORMAL ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์;

COMBI ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์;

CONSOLIDATOR ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์;

FORK ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ชื่อทรัพยากรที่ไหลผ่าน;

QUEUE ชื่อพารามิเตอร์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ชื่อทรัพยากรที่ไหลผ่าน;

ตัวอย่างการใช้คำสั่ง NORMAL, COMBI, CONSOLIDATOR, FORK และ QUEUE มีดังนี้

NORMAL ChangeBattery;

COMBI LoadSL;

CONSOLIDATOR ChangeCondition;

FORK ChangeBatteryDone Train;

QUEUE WaitToUnloadSoil Train;

4.6.5 Network Links เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้ระบุความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ตามผังโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ และใช้ระบุทรัพยากรที่ไหลผ่าน Link โดย Link แต่ละตัวจะอนุญาตให้ทรัพยากรไหลผ่านได้ชนิดเดียวเท่านั้น

การใช้คำสั่ง LINK มี 2 รูปแบบดังนี้

(1) กรณีที่ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ปลาย Link เป็น Combi และ Fork

LINK ชื่อพารามิเตอร์ ขั้นตอนการก่อสร้างที่ต้น Link ขั้นตอนการก่อสร้างที่ปลาย Link;

(2) กรณีที่ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ปลาย Link ไม่ใช่ Combi และ Fork

LINK ชื่อพารามิเตอร์ ขั้นตอนการก่อสร้างที่ต้น Link ขั้นตอนการก่อสร้างที่ปลาย Link ชื่อทรัพยากรที่ไหลผ่าน;

ตัวอย่างการใช้คำสั่ง LINK ทั้ง 2 รูปแบบมีดังนี้

LINK Tr1 TrainStorage ReleaseTrain;

LINK Tr25 ChangeCondition HaulToLoadSoil Train;

4.6.6 General Section of the Tunneling Simulation เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมการทำงานทั่วไปภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เพื่อให้มีความถูกต้องตามหลักตรรกะและวิธีการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น การกำหนดความสำคัญของขั้นตอนการทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีการแย่งชิงทรัพยากรชนิดเดียวกัน การควบคุมกฎการทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น แบ่งกลุ่มชุดคำสั่งย่อยออกเป็น 3 กลุ่มมีรายละเอียดดังนี้

- **Priority of the Haul-Return in Tunnel** เป็นกลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่ใช้กำหนดลำดับความสำคัญของการเดินทางภายในอุโมงค์ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ซึ่งจะต้องใช้รางและรางพักร่วมกัน โดยใช้คำสั่ง PRIORITY ควบคุมให้ Queue ปล่อยรางและรางพักให้กับขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Combi ซึ่งเป็นขั้นตอนการเดินทางภายในอุโมงค์ของขบวนรถจักรที่มีความสำคัญมากกว่าได้เดินทางไปก่อน

การใช้คำสั่ง PRIORITY และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

PRIORITY ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Combi ค่าลำดับความสำคัญ;
PRIORITY ReturnOutofDRail 1;

- **Releasing Resources** เป็นกลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่กำหนดให้แบบจำลองสถานการณ์ปล่อยทรัพยากรออกมา ณ ขั้นตอนการทำงานที่กำหนดเพื่อให้สามารถจำลองสถานการณ์ได้ถูกต้องตามหลักการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้คำสั่ง RELEASEAMT ซึ่งใช้สำหรับสร้างและปล่อยทรัพยากรผ่าน Link ที่ให้ทรัพยากรนั้นไหลผ่านเมื่อขั้นตอนการทำงานต้น Link ทำงานเสร็จเรียบร้อย

การใช้คำสั่ง RELEASEAMT และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

RELEASEAMT ชื่อพารามิเตอร์ประเภท Link ค่า;
RELEASEAMT SDRail2 1;

- **Tunneling Policies** เป็นกลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่ใช้กำหนดกฎการทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์เพื่อให้มีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับโครงการที่ศึกษา

สำหรับคำสั่งทั่วไปของโปรแกรม Stroboscope ที่ใช้ควบคุมการทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์มี 7 คำสั่งดังนี้

(1) SEMAPHORE ใช้ควบคุมให้ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Combi ทำงานเมื่อเงื่อนไขที่กำหนดไว้ผ่าน

การใช้คำสั่ง SEMAPHORE และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

SEMAPHORE ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Combi เงื่อนไขที่กำหนด;
SEMAPHORE Excavate 'CurExcDst < FinExcDst &
SwitchTunneling == 1
!SetUpForNextShift.CurInst';

(2) CONSOLIDATEWHEN ใช้ควบคุมให้ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Consolidator ปล่อยทรัพยากรเมื่อเงื่อนไขที่กำหนดไว้ผ่าน

การใช้คำสั่ง CONSOLIDATEWHEN และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

CONSOLIDATEWHEN ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Consolidator เงื่อนไขที่กำหนด;

CONSOLIDATEWHEN ChangeCondition '(ChangeCondition.Train.Count == 1)';

(3) STRENGTH ใช้กำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจเลือกเส้นทางการไหลของทรัพยากรที่ออกจาก Fork

การใช้คำสั่ง STRENGTH และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

STRENGTH ชื่อพารามิเตอร์ประเภท Link ที่ออกจาก Fork เงื่อนไขที่กำหนด;

STRENGTH Tr7 'LocoIn.Train.BatteryStatus > 0';

(4) ONEND ใช้ควบคุมให้แบบจำลองสถานการณ์ทำงานตามที่กำหนดเมื่อขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator ที่ระบุไว้ใน ONEND นั้นทำงานเสร็จและปล่อยทรัพยากรผ่าน Link เรียบร้อยแล้ว

การใช้คำสั่ง ONEND และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

ONEND ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator พารามิเตอร์ที่กำหนด คำสั่งที่ให้ทำงาน;

ONEND ChangeCutterBits SwitchTunneling 1;

(5) BEFOREEND ใช้ควบคุมให้แบบจำลองสถานการณ์ทำงานตามที่กำหนดเมื่อขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator ที่ระบุไว้ใน BEFOREEND นั้นทำงานเสร็จเรียบร้อยแต่ยังไม่ได้ส่งทรัพยากรผ่าน Link ไปให้ขั้นตอนถัดไป

การใช้คำสั่ง BEFOREEND และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

BEFOREEND ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator พารามิเตอร์ที่กำหนด คำสั่งที่ให้ทำงาน;

BEFOREEND ReleaseLoco NumCurWorkingTrains 'NumCurWorkingTrains + 1';

(6) ONSTART ใช้ควบคุมให้แบบจำลองสถานการณ์ทำงานตามที่กำหนดเมื่อขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator ที่ระบุไว้ใน ONSTART นั้นเริ่มทำงาน

การใช้คำสั่ง ONSTART และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

ONSTART ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal, Combi และ Consolidator พารามิเตอร์ที่กำหนด คำสั่งที่ให้ทำงาน;

ONSTART Excavate CurExcDst 'CurExcDst + ExcLength'; /(m)

(7) ONRELEASE ใช้ควบคุมให้แบบจำลองสถานการณ์ทำงานตามที่กำหนดเมื่อมีทรัพยากรไหลผ่านเข้าสู่ Link ที่กำหนดและยังไม่ได้ไหลเข้าสู่ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ปลาย Link นั้น

การใช้คำสั่ง ONRELEASE และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

ONRELEASE ชื่อพารามิเตอร์ประเภท Link พารามิเตอร์ที่กำหนด คำสั่งที่ให้ทำงาน;

ONRELEASE Tr22 TrainDst 'TrainDst + (CurExcDst * 2)';

4.6.7 Specific Section of the Tunneling Simulation เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุมการทำงานที่ได้จัดกลุ่มเป็นกลุ่มย่อยตามความเหมาะสมในแต่ละโครงการก่อสร้างอุโมงค์ โดยกลุ่มชุดคำสั่งกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างการทำงานแตกต่างกันในแต่ละโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแผนงานก่อสร้างในแต่ละโครงการ กลุ่มชุดคำสั่งกลุ่มนี้จะประกอบด้วยกลุ่มชุดคำสั่งย่อยต่างๆ ที่ใช้ควบคุมการทำงานที่มีลักษณะเฉพาะภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ ตัวอย่างเช่น กลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการทำงานของกระบวนการสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ กลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการทำงานของขบวนรถจักรและหัวรถจักร และกลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการจัดตำแหน่งของรางพัก เป็นต้น สำหรับคำสั่งที่ใช้จะนำเอาคำสั่งของโปรแกรม Stroboscope ที่ได้อธิบายข้างต้นมาทำการสร้าง

4.6.8 Tunneling Durations เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้กำหนดระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีรูปแบบเป็น Normal และ Combi สำหรับ Consolidator, Fork และ Queue นั้นไม่สามารถกำหนดระยะเวลาทำงานได้ คำสั่งที่ใช้ได้แก่ DURATION โดยสามารถ

กำหนดรูปแบบระยะเวลาการทำงานได้ 4 รูปแบบคือ ค่าคงที่ สมการ การแจกแจงของข้อมูล และ PERT

การใช้คำสั่ง DURATION และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

DURATION ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Normal และ Combi ค่า;

DURATION ChangeBattery Pert[10,15,20]; /(min)

4.6.9 QUEUE Initialization and Simulating เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้กำหนดจำนวนรอบสำหรับการจำลองสถานการณ์ ใช้คำสั่ง INIT ตั้งค่าเริ่มต้นจำนวนทรัพยากรที่อยู่ใน Queue ใช้คำสั่ง COLLECT กำหนดค่าผลลัพธ์ที่ต้องการเก็บใน COLLECTOR หลังจากจำลองสถานการณ์เสร็จเรียบร้อย และสุดท้ายจะเป็นการระบุเงื่อนไขสิ้นสุดการจำลองสถานการณ์ในแต่ละรอบโดยใช้คำสั่ง SIMULATEUNTIL

การใช้คำสั่ง INIT และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

INIT ชื่อพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Queue ค่าเริ่มต้น;

INIT TBMUnits NumTBMs;

การใช้คำสั่ง COLLECT และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

COLLECT ชื่อพารามิเตอร์ที่ต้องการสั่งให้เก็บค่า ค่าที่ต้องการจัดเก็บ;

COLLECT Est_AdvanceRate '(CurExcDst - InitExcDst)/SimTime * ShiftLength';

การใช้คำสั่ง SIMULATEUNTIL และตัวอย่างการใช้มีดังนี้

SIMULATEUNTIL เงื่อนไขสิ้นสุดการจำลองสถานการณ์;

SIMULATEUNTIL 'CurExcDst >= FinExcDst &
Excavate.TotInst == InspectSL.TotInst &
SwitchTunneling != 0';

4.6.10 Printing Results เป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้กำหนดให้แบบจำลองสถานการณ์แสดงผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งมี 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่ 1 แสดงค่าประมาณของเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างอุโมงค์

และค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ กลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่ 2 แสดงค่าผลลัพธ์ทางสถิติ และกลุ่มชุดคำสั่งย่อยที่ 3 แสดงรายละเอียดข้อมูลทั่วไปของโครงการก่อสร้างอุโมงค์

4.7 การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้แบบจำลองสถานการณ์ว่าผลที่ได้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้งานจริงได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ มี 2 ขั้นตอนได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบความถูกต้อง

4.7.1 การตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบความถูกต้องเป็นการพิจารณาถึงพฤติกรรมของแบบจำลองสถานการณ์ว่าตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ มีรายละเอียดดังนี้

- **การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท** State-Based Simulation Model

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model จะทำการตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยการสอบถามความคิดเห็นของวิศวกรที่มีประสบการณ์และมีความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

- **การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท** Discrete-Event Simulation Model

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model มีขั้นตอนการตรวจสอบ 4 ขั้นตอนแสดงในรูปที่ 4.8 ได้แก่

(1) ตรวจสอบขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองสถานการณ์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยการสอบถามความคิดเห็นของวิศวกรที่มีประสบการณ์และมีความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์

(2) ติดตามลำดับขั้นตอนการทำงานโดยใช้วิธี Trace Simulation ของโปรแกรม Stroboscope เพื่อพิจารณาขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองสถานการณ์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ว่ามีการทำงานตรงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยส่วนหนึ่งของผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยวิธี Trace Simulation แสดงในรูปที่ 4.9

(3) ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยการจำลองสถานการณ์แล้วนำผลลัพธ์ที่ทราบค่าแน่นอน เช่น จำนวนขบวนรถจักร จำนวนและตำแหน่งของรางพัก เป็นต้น มาตรวจสอบว่าค่าที่ได้ตรงตามที่กำหนดไว้หรือไม่

(4) นำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ไปสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญโปรแกรม Stroboscope

4.7.2 การทดสอบความถูกต้อง

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เป็นการสร้างความเชื่อมั่นว่าแบบจำลองสถานการณ์ที่พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถใช้เป็นตัวแทนของกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ได้ และผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยทำการทดสอบค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองสถานการณ์กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจริงภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกันด้วยวิธีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) แสดงในสมการที่ 4.5

$$\text{MAPE} = \sum_{i=1}^{n} \left| (e_i / x_i) \times 100 \right| / n \qquad (4.5)$$

เมื่อ e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากโครงการที่ศึกษาที่ตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ i

x_i = ค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จริงที่ได้จากโครงการที่ศึกษา

n = จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการตรวจสอบแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

```
895.1196:NEWTIME
        END:            CheckLoco(2)S:     887.2888 E:     895.1196
        ASSIGN:     Xiandai(1).TimeToCheckLoco :=       2.0000
        ASSIGN:     Xiandai(1).SwitchCheckLoco :=       0.0000
        RECEIVE:       WaitToLocoOut<--- Xiandai #1
                                        |--          TimeIn = 895.1196
                                        |--  TimeToCheckLoco = 2.0000
                                        |--  SwitchCheckLoco = 0.0000
                                        |--         TrainDst = 1778.7800
        ATTEMPT:       ReleaseTrainFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:        ReleaseLocoFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:      HaulOutofShaftFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:            LocoOutSuccess
        RECEIVE:            LocoOut<--- Xiandai #1
                                        |--          TimeIn = 895.1196
                                        |--  TimeToCheckLoco = 2.0000
                                        |--  SwitchCheckLoco = 0.0000
                                        |--         TrainDst = 1778.7800
        RECEIVE:            LocoOut<--- 1 units of Cs
        START:           LocoOut(8)S:     895.1196 E:     895.9604
        ATTEMPT:            LocoOutFailed, not enough via Tr46, MCS now off
        ATTEMPT:       ReleaseTrainFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:        ReleaseLocoFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:      HaulOutofShaftFailed due to Semaphore, MCS still on

895.9604:NEWTIME
        END:             LocoOut(8)S:     895.1196 E:     895.9604
        RECEIVE:          LocoUnits<--- 1 units of Locomotive
        RECEIVE:    WaitToUnloadSoil<--- Xiandai #1
                                        |--          TimeIn = 895.9604
                                        |--  TimeToCheckLoco = 2.0000
                                        |--  SwitchCheckLoco = 0.0000
                                        |--         TrainDst = 1778.7800
        ATTEMPT:       ReleaseTrainFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:        ReleaseLocoFailed due to Semaphore, MCS still on
        ATTEMPT:             LocoInFailed, not enough via Tr5, MCS now off
```

รูปที่ 4.9 ตัวอย่างการตรวจสอบด้วยวิธี Trace Simulation ของโปรแกรม Stroboscope

4.8 สรุปท้ายบท

บทนี้ได้อธิบายรายละเอียดขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในงานวิจัยนี้ซึ่งมี 2 ประเภทได้แก่ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model และแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทแรกเป็นแบบจำลองสถานการณ์อย่างง่ายสำหรับใช้ในการวิเคราะห์โครงการในขั้นต้นเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทที่สองเป็นแบบจำลองสถานการณ์ที่มีความซับซ้อนสูง ทำการพัฒนาได้ยากกว่าแบบจำลองสถานการณ์ประเภทแรกแต่ก็มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงกว่าเช่นกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

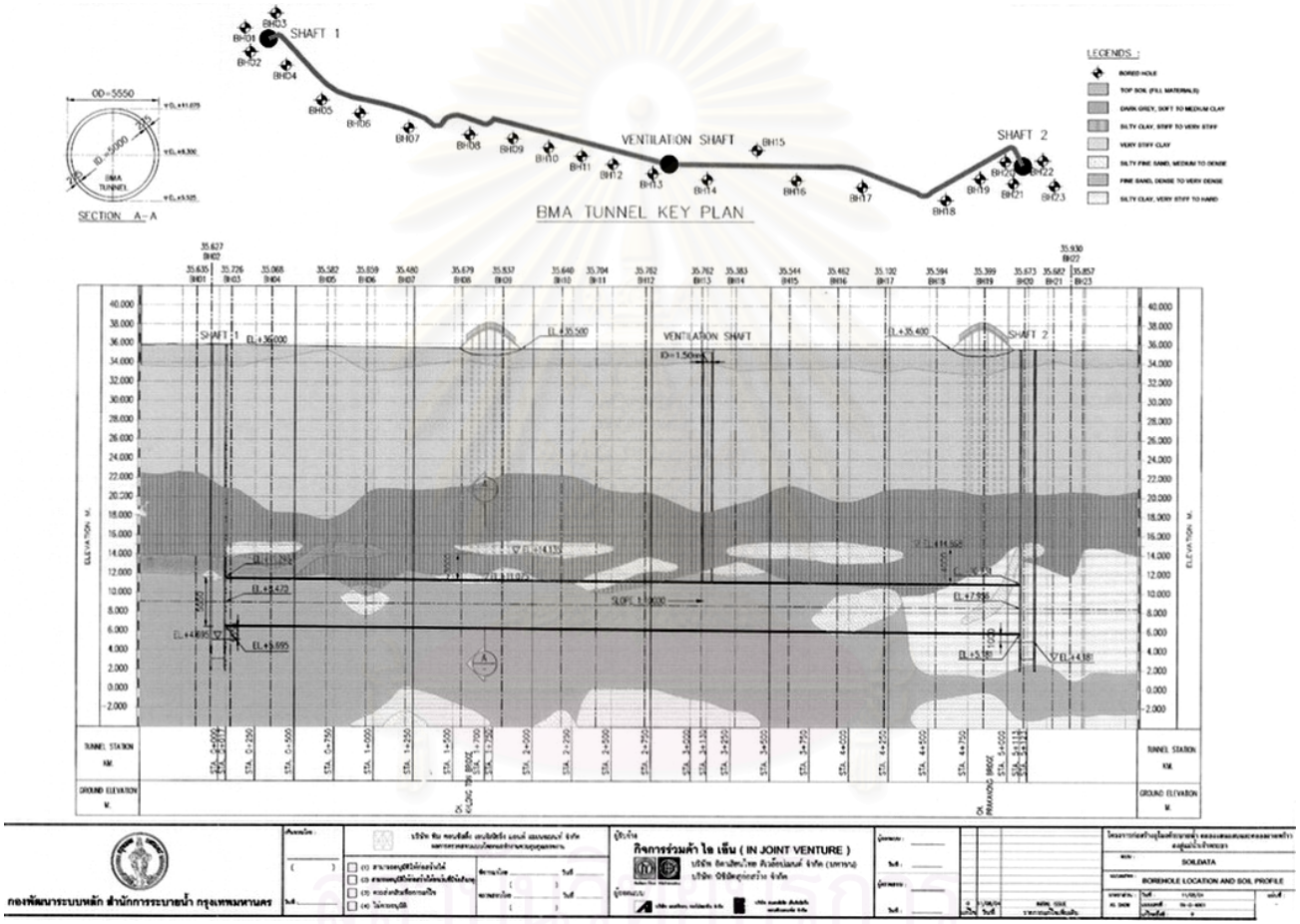
บทที่ 5

การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา

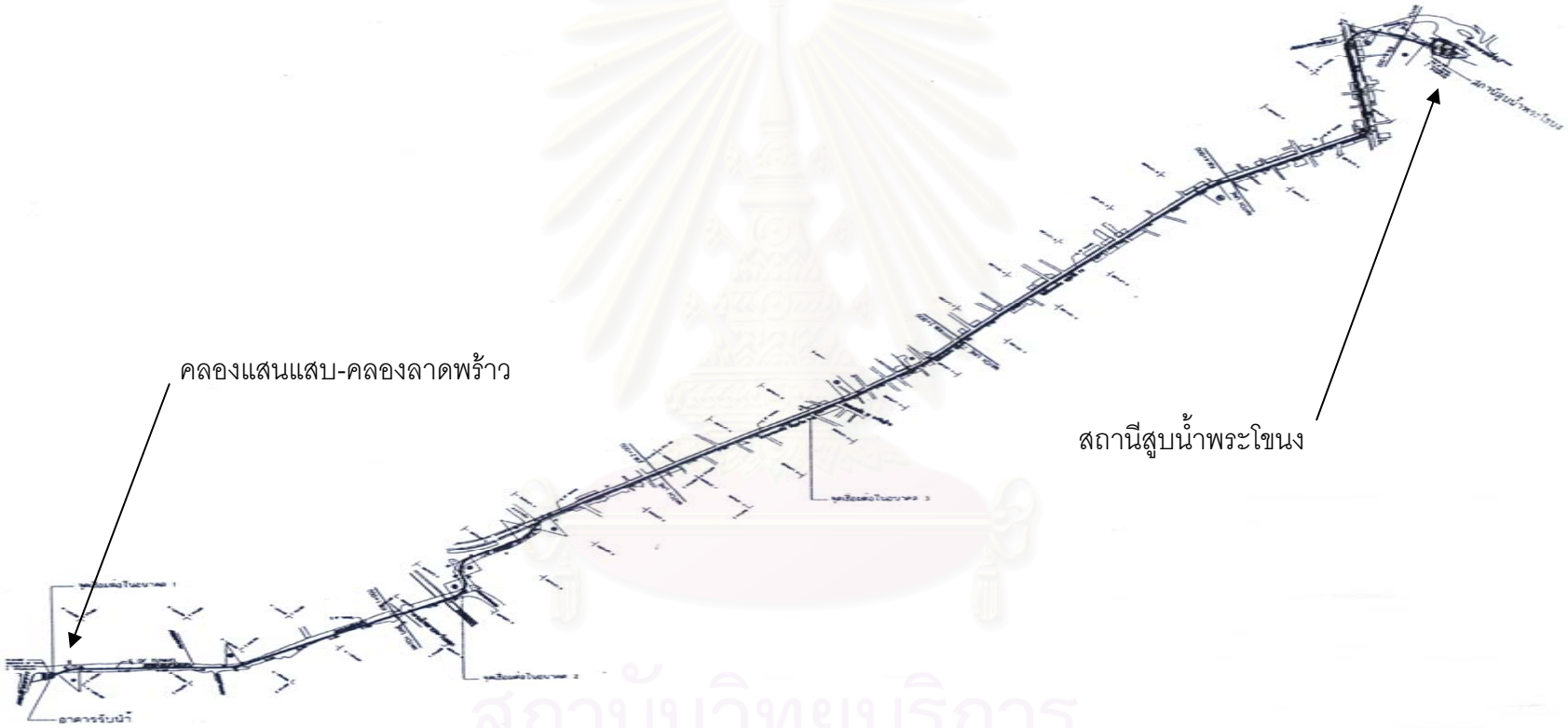
หลังจากที่ได้วางแผนขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำขั้นตอนดังกล่าวไปใช้กับโครงการกรณีศึกษา โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร เป็นโครงการกรณีศึกษา สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้แสดงข้อมูลและผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameter) ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลทั่วไปของโครงการกรณีศึกษา รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงสภาพชั้นดินของโครงการและแนวเส้นทางก่อสร้าง ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการกรณีศึกษา

หัวข้อ	รายละเอียด
ระยะทาง	5,123.60 เมตร
ความลึกอุโมงค์	27.225 เมตรจากผิวดินถึงกึ่งกลางอุโมงค์
วิธีก่อสร้างอุโมงค์	Tunnel Boring Machine (TBM) ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุลที่เรียกว่าระบบ Earth Pressure Balance (EPB)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	5.55 เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	5 เมตร
บริษัทก่อสร้าง	กิจการร่วมค้า Italian-Thai Development และ Nishimatsu Construction (IN Joint Venture)
ระยะเวลาก่อสร้าง	1,440 วัน
ค่าก่อสร้างทั้งหมด	2,094,995,800 บาท



รูปที่ 5.1 สภาพชั้นดินโครงการกรณีศึกษา (สำนักการระบายน้ำ, 2548)



รูปที่ 5.2 แนวเส้นทางโครงการกรณีศึกษา (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา

บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาได้วิเคราะห์โครงการโดยใช้วิธี Deterministic แสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ในการวางแผนงานก่อสร้าง ณ ตำแหน่งต่างๆ เพื่อวิเคราะห์หาจำนวนขบวนรถจักร จำนวนและตำแหน่งของรางพักที่เหมาะสม โดยรายละเอียดของวิธีที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้จะอธิบายโดยการแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์โครงการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ในรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวิเคราะห์โครงการ

สำหรับพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปที่ 5.3 เป็นค่าที่ได้จากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานของโครงการกรณีศึกษาและจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

(1) การทำงานที่หน้าอุโมงค์

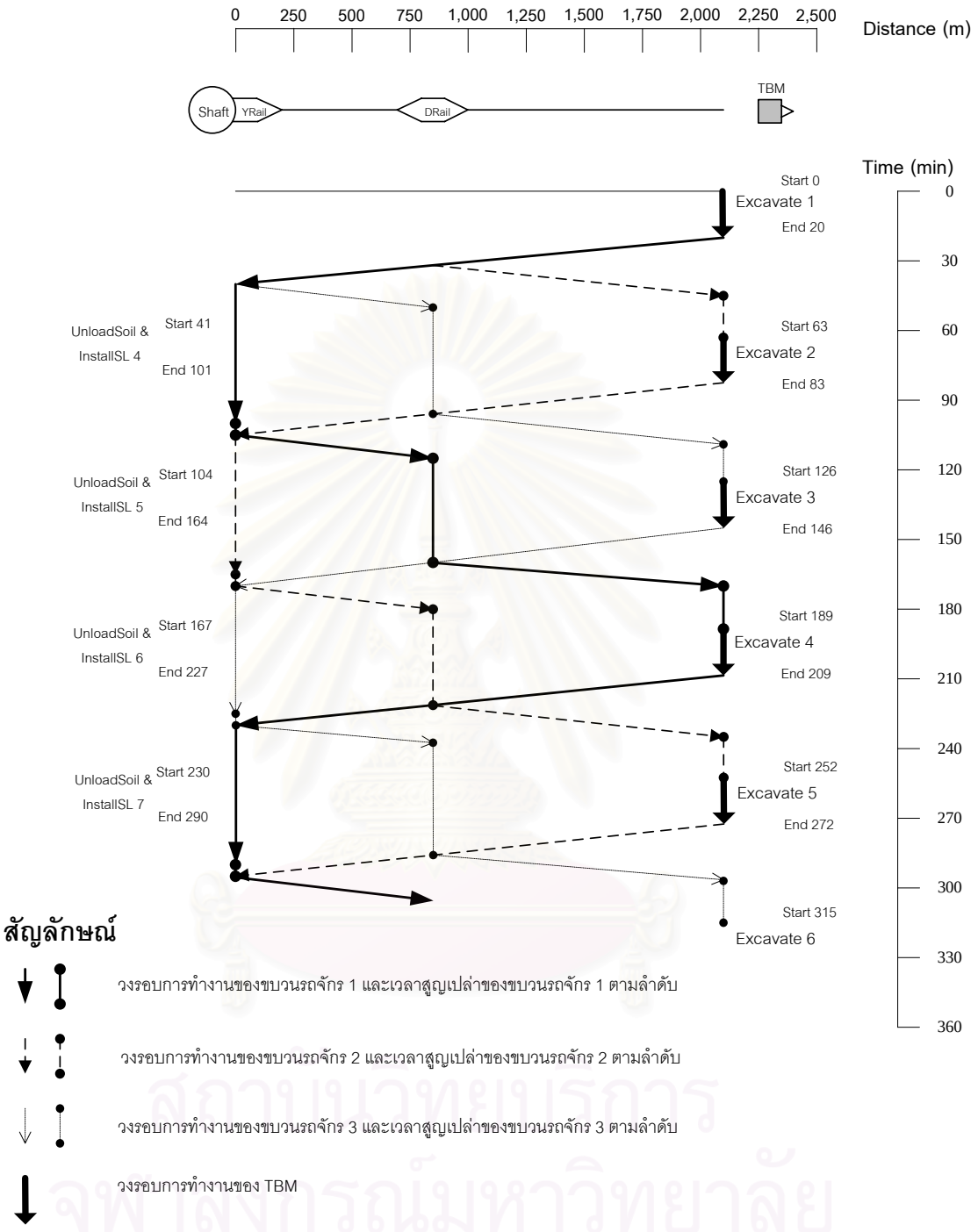
TBM ขุดเจาะในชั้น Fine Sand ระยะ 1.20 เมตร/รอบ	: 20 นาที
ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining)	: 35 นาที
ต่อรางสำหรับขบวนรถจักร	
และตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ ฯลฯ	: 8 นาที (เฉลี่ยต่อรอบ)
รวม	: **63 นาที**

(2) การทำงานที่ปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์

นำดินไปทิ้ง	: 6 x 6 = 35 นาที
บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่	: 8 x 2 = 15 นาที
เปลี่ยนแบตเตอรี่	
และตรวจสอบหัวรถจักร (Locomotive) ฯลฯ	: 10 นาที (เฉลี่ยต่อรอบ)
รวม	: **60 นาที**

(3) อัตราเร็วขบวนรถจักร : 100 เมตร/นาที

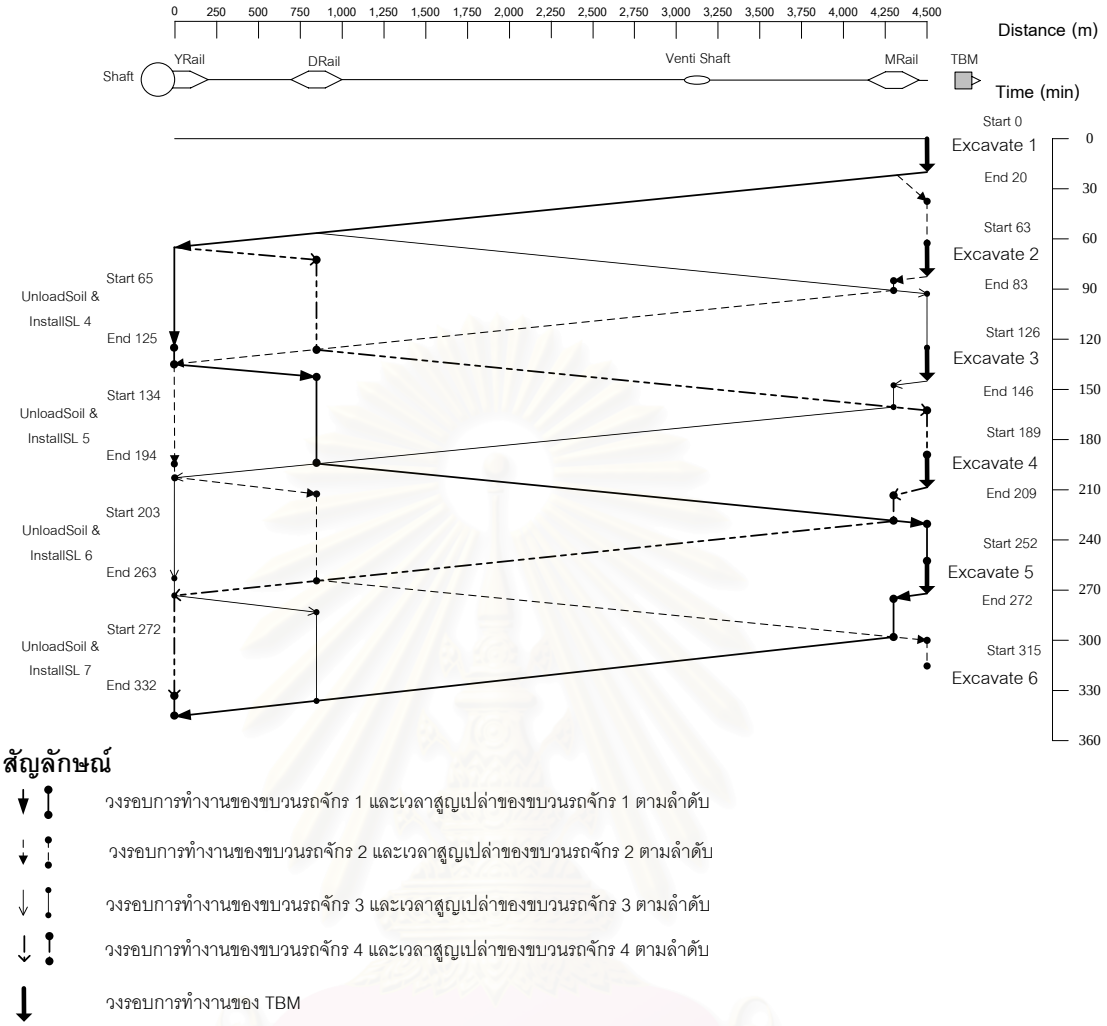
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 วิธีที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างช่วง Main Drive ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์

จากรูปที่ 5.3 หลังจาก TBM ขุดเจาะอุโมงค์รอบที่ 1 เสร็จเรียบร้อย ขบวนรถจักร 1 ที่บรรทุกดินจากการขุดเจาะอุโมงค์รอบนั้นก็จะเดินทางออกจากหน้าอุโมงค์เพื่อบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้ง เมื่อขบวนรถจักร 1 เดินทางเข้าไปในรางพัก Double Rail (DRail) ซึ่งเป็นรางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ขบวนรถจักร 2 ที่รออยู่ก็จะเดินทางต่อไปที่หน้าอุโมงค์เพื่อขนส่งดาดผนังอุโมงค์และรับดินสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์รอบต่อไป ในขณะเดียวกันขบวนรถจักร 1 ก็จะเดินทางต่อไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ และเมื่อขบวนรถจักร 1 เดินทางไปถึงแล้ว ขบวนรถจักร 3 ที่รออยู่ในรางพักรูปตัว Y ที่เรียกว่ารางพัก YRail ก็จะเดินทางต่อไปที่รางพัก DRail และหยุดรอจนกระทั่งขบวนรถจักร 2 ที่บรรทุกดินจากหน้าอุโมงค์เดินทางไปถึงรางพัก DRail และเมื่อขบวนรถจักร 2 เข้าไปในรางพัก DRail แล้ว ขบวนรถจักร 3 ก็จะเดินทางต่อไปที่หน้าอุโมงค์ ในขณะเดียวกันขบวนรถจักร 2 ก็จะเดินทางต่อไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์และเมื่อขบวนรถจักร 2 เดินทางไปถึงแล้ว ขบวนรถจักร 1 ที่รออยู่ในรางพัก YRail พร้อมทั้งได้บรรทุกดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และรถขนถ่ายดิน (Muck Car) เปล่าก็จะเดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ไปหยุดรออยู่ที่รางพัก DRail เพื่อที่จะรอเดินทางต่อไปที่หน้าอุโมงค์ ในขณะที่ขบวนรถจักร 2 ก็จะทำการบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง และรอเพื่อที่จะเดินทางไปที่หน้าอุโมงค์ต่อไป สำหรับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) ช่วง Main Drive ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ ที่วิเคราะห์โดยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาสามารถประมาณค่าได้ 13.71 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง

เนื่องจากวิธี Deterministic ที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างเป็นวิธีที่นำเอาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์บางขั้นตอนมาวิเคราะห์เท่านั้น อีกทั้งวิธีดังกล่าวมีสมมติฐานว่าข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมีความแน่นอนจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ได้ ดังนั้นเพื่อให้การประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงควรเพิ่มรายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และควรวิเคราะห์โดยใช้วิธี Probabilistic ซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาค่าความไม่แน่นอนในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมาใช้ในการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.4 วิธีที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างช่วง Main Drive ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์

5.2 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล

การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลของโครงการกรณีศึกษาในบทนี้จะถูกนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้าในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา โดยจะทำการจัดกลุ่มตามแหล่งที่มาของข้อมูลดังที่ได้อธิบายในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล ได้แก่

(1) ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา

(4) ข้อมูลจากสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB

5.2.1 ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา

ข้อมูลด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษาเป็นข้อมูลองค์ประกอบของระบบสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษาซึ่งจะนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ให้มีความถูกต้องและมีการทำงานเช่นเดียวกับระบบจริงมากที่สุด ประกอบด้วยข้อมูลสภาพชั้นดินของโครงการกรณีศึกษา ข้อมูลแนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ข้อมูลปล่องขนถ่ายดิน ข้อมูล TBM ข้อมูลขบวนรถจักร ข้อมูลตู้ Backup System ข้อมูลรางพักที่ใช้ มีรายละเอียดดังนี้

- **สภาพชั้นดินของโครงการกรณีศึกษา**

จากการสำรวจสภาพชั้นดินของโครงการกรณีศึกษาพบว่าส่วนใหญ่ชั้นดินที่ขุดเจาะเป็นชั้น Fine Sand แต่จะมีการเปลี่ยนสภาพชั้นดินเป็น Silty Fine Sand และ Silty Clay ที่ตำแหน่งปลายอุโมงค์ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลสภาพชั้นดินของโครงการกรณีศึกษา

ชนิดของดิน	ตำแหน่งต้นทาง (กิโลเมตร)	ตำแหน่งปลายทาง (กิโลเมตร)	ระยะทาง (กิโลเมตร)	ร้อยละ
Fine Sand (แน่น-แน่นมาก)	0.017	3.750	3.733	73.10
Silty Fine Sand (ปานกลาง-แน่น)	3.750	4.333	0.583	11.42
Silty Clay (แข็ง-แข็งมาก)	4.333	5.123	0.790	15.48

- **แนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง** Main Drive

ข้อมูลแนวเส้นทางการก่อสร้างที่ได้จากการสำรวจโดยบริษัทผู้รับเหมาแสดงในตารางที่ 5.3 ถูกนำไปใช้ในการกำหนดแนวเส้นทางและระยะขุดเจาะอุโมงค์ในแต่ละรอบของ TBM และถูกนำไปใช้ในการวางแผนการผลิตชนิดของดาดผนังอุโมงค์ให้ตรงกับความต้องการที่หน้างาน โดยแสดงพารามิเตอร์นำเข้าระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบของ TBM ซึ่งมี 2 ระยะคือ 1.20 เมตร สำหรับการขุดเจาะทางตรง และ 0.60 เมตรสำหรับการขุดเจาะทางโค้งไว้ในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลแนวเส้นทางการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive

ตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive (เมตร)	ระยะก่อสร้างทางตรง (เมตร)	ระยะก่อสร้างทางโค้ง (เมตร)
173.078-1,218.798	1,045.720	
1,218.799-1,305.943		87.144
1,305.944-1,309.546	3.602	
1,309.547-1,391.282		81.735
1,391.283-1,569.030	177.747	
1,569.031-1,611.100		42.069
1,611.101-1,626.713	15.612	
1,626.714-1,665.778		39.064
1,665.779-4,446.093	2,780.314	
4,446.094-4,497.779		51.685
4,497.780-4,852.072	354.292	
4,852.073-4,961.456		109.383
4,961.457-5,075.551	114.094	
5,075.552-5,099.591		24.039
5,099.592-5,123.600	24.022	
รวม	4518.481	435.119

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์นำเข้าระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบของ TBM

พารามิเตอร์นำเข้า	ระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบ (เมตร)	
	ทางตรง	ทางโค้ง
ExcLength	1.20	0.60

- **ปล่องขนถ่ายดิน**

ปล่องขนถ่ายดินที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยปล่องขนถ่ายดินหลัก (Main Shaft) ที่ต้นและปลายอุโมงค์แสดงในรูปที่ 5.5 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 เมตร และปล่องระบายอากาศ (Ventilation Shaft) เป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.20 เมตร ติดตั้งที่ตำแหน่งก่อสร้าง 3,126 เมตร จากต้นอุโมงค์ ทำหน้าที่เป็นท่อระบายอากาศ ท่อฉุกเฉิน และใช้เป็นท่อสำหรับลงไปเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) ที่หัวเจาะอุโมงค์ของ TBM

รูปที่ 5.5 ปล่องขนถ่ายดินหลักที่ต้นอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา

- TBM

โครงการกรณีศึกษาใช้ TBM ประเภทค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุล ที่เรียกว่า Earth Pressure Balance หรือ EPB ผลิตโดยบริษัท Hitachi Zosen ประเทศญี่ปุ่น แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ข้อมูล TBM ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา

หัวข้อ	รายละเอียด	
มิติ TBM	เส้นผ่านศูนย์กลางขุดเจาะ	5.73 เมตร
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	5.70 เมตร
	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	5.61 เมตร
	ความยาวทั้งหมดไม่รวม Working Deck และสกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor)	8.51 เมตร
	น้ำหนัก	211 ตัน
ข้อมูลด้านเทคนิคของ TBM	อัตราการยืดตัวสูงสุดขณะขุดเจาะ	0.10 เมตร/นาที
	อัตราการยืดตัวสูงสุดที่ยอมให้ใช้ในโครงการ	0.07 เมตร/นาที
	อัตราการหดตัวสูงสุด	1.70 เมตร/นาที
	ระยะยืดตัวสูงสุด TBM	1.65 เมตร
	ระยะยืดตัวทางตรงที่ใช้ในโครงการ	1.20 เมตร
	ระยะยืดตัวทางโค้งที่ใช้ในโครงการ	0.60 เมตร
	ระยะยืดตัวสูงสุดของฟันกัดดิน (Copy Cutter)	30 เซนติเมตร
ระยะอ้างอิงจาก TBM	ระยะจากหลัง TBM ถึงระยะปลายสุดของ Segment Transportation Hoist	12 เมตร
	ระยะจากหลัง TBM ถึงหลังตู้ Backup System ตู้สุดท้าย	64.50 เมตร
	ระยะจากหลัง TBM ถึงสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) ที่ปล่อยดินสู่รถขนถ่ายดิน	51.30 เมตร

- **ขบวนรถจักร**

ขบวนรถจักร 1 ขบวนประกอบด้วยหัวรถจักร 1 คัน รถขนถ่ายดิน 6 คัน และรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car) 2 คัน โดยในบางรอบจะมีการติดตั้งตู้ใส่น้ำทิ้งจากหน้าอุโมงค์และตู้ใส่วัสดุอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ไปกับขบวนรถจักรด้วย มีความยาวทั้งหมดประมาณ 52.40 เมตร โครงการกรณีศึกษาใช้ขบวนรถจักรทั้งหมด 4 ขบวน หัวรถจักร 5 คันสำหรับรับดิน

และขนส่งดาดผนังอุโมงค์จากต้นอุโมงค์ไปยังหน้าอุโมงค์ 4 คัน และทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน ผลิตโดยบริษัท Xiandai ประเทศจีน แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลขบวนรถจักรที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา

หัวข้อ	รายละเอียด	
มิติหัวรถจักร	ความยาว	9.91 เมตร
	ความกว้าง	1.50 เมตร
	น้ำหนัก	12 ตัน
มิติรถขนถ่ายดิน	ความยาว	4.90 เมตร
	ความกว้าง	1.50 เมตร
	ความจุ	7.20 ลบ.ม
มิติรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์	ความยาว	3.60 เมตร
	ความกว้าง	1.36 เมตร
	ความจุ	3 ชิ้น
มิติและข้อมูลด้านเทคนิคของขบวนรถจักร	ความยาว	52.40 เมตร
	ระยะห่างระหว่างตู้ในขบวนรถจักร	0.12 เมตร
	อัตราเร็วสูงสุด	8.00 กิโลเมตร/ชั่วโมง
	อัตราเร็วสูงสุดที่ยอมให้ใช้ในโครงการ	6.50 กิโลเมตร/ชั่วโมง
	ระยะทางสูงสุดต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในแต่ละครั้ง	30,720 เมตร

- **ตู้** Backup System

ตู้ Backup System ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษามีทั้งหมด 14 ตู้ทำการติดตั้งเป็นคู่ขนานกัน 7 คู่ มีความยาวทั้งหมด 52.50 เมตร ระยะห่างระหว่างด้านหลัง TBM กับตู้ Backup System คู่แรก 12 เมตร เคลื่อนที่โดยใช้ TBM ลากจูงตามรางที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ สำหรับตู้ Backup System คู่ที่ 1 ขวาจะเป็น Control Room ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หัวเจาะอุโมงค์ (Cutter Head) สกรูลำเลียงดิน สายพานลำเลียงดิน และ Shield Jack เป็นต้น สำหรับตู้คู่ที่ 1 ซ้ายเป็น Power Unit ตู้ Backup System คู่ที่ 2 ขวาเป็น Control Panel ซ้ายเป็น Grease Pump Unit

ใช้เก็บจาระบีชนิดพิเศษและส่งแรงอัดฉีดจาระบีไปยังท่อที่ตำแหน่งแปรงขดลวด (Wire Brush) ด้านท้าย TBM ในขณะขุดเจาะ ตู้ Backup System คู่ที่ 3 ขวาเป็น 1,500 KVA Transformer ซ้ายเป็น Grout Tank ใช้เก็บวัสดุอุดช่องว่างระหว่างดาดผนังอุโมงค์กับชั้นดินโดยรอบ สำหรับตู้ Backup System คู่ที่เหลือจะติดตั้งอุปกรณ์สนับสนุนการขุดเจาะ ได้แก่ Foam/Polymer Injection ใช้ในการปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะ Grout Pump ใช้อัดฉีดวัสดุอุดช่องว่างระหว่างดาดผนังอุโมงค์ Air Condition, Vacuum Pump และ Drainage Tank สรุปรายละเอียดในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลตู้ Backup System ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา

หัวข้อ	รายละเอียด	
มิติตู้ Backup System	ความยาว	6 เมตร
	ความกว้าง	1 เมตร
	ความยาวจากหน้า Backup System	
	ตู้แรกถึงหลัง Backup System ตู้สุดท้าย	52.50 เมตร
ข้อมูลด้านเทคนิคของตู้ Backup System	ขวา	ซ้าย
	คู่ที่ 1 Control Room	Power Unit
	คู่ที่ 2 Control Panel	Grease Pump Unit
ข้อมูลด้านเทคนิคของตู้ Backup System	ขวา	ซ้าย
	คู่ที่ 3 1,500 KVA Transformer	Grout Tank
	คู่ที่ 4 Form/Polymer Injection	Grout Pump
	คู่ที่ 5 Air Condition	Air Condition
	คู่ที่ 6 Vacuum Pump	Drainage Tank
	คู่ที่ 7 โครงเปล่าเก็บ HV Cable	โครงเปล่าเก็บ HV Cable

- **รางสำหรับขบวนรถจักรและรางพัก**

รางที่ใช้สำหรับขบวนรถจักรในโครงการกรณีศึกษามี 2 ขนาด ได้แก่ รางขนาดความยาว 3 เมตรสำหรับทางโค้ง และรางขนาดความยาว 5 เมตรสำหรับทางตรง โดยจะทำการต่อรางเมื่อระยะด้านหลัง TBM มากกว่าหรือเท่ากับ 6 เมตร ซึ่งเพียงพอในการต่อรางความยาว 5 เมตร

สำหรับรางพักที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ รางพัก YRail ซึ่งเป็นรางพักรูปตัว Y ที่ต้นอุโมงค์ รางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่ารางพัก Double Rail (DRail) และรางพักชนิดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่ารางพัก Movable Type Double Rail (MRail) โดยรางพัก DRail และรางพัก MRail จะมีขนาดและลักษณะเหมือนกันแต่รางพัก MRail จะถูกออกแบบให้ฐานรองรับรางพักสามารถเลื่อนไปตามรางสำหรับขบวนรถจักรได้ ในขณะที่รางพัก YRail จะมีความยาวช่วงทางตรงเท่ากับรางพัก DRail และ MRail แต่ด้านที่หันเข้าหาปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์จะเป็นปลายเปิด และด้านที่หันเข้าหาอุโมงค์จะเป็นรูปตัว Y มีขนาดและลักษณะเดียวกับรางพัก DRail และ MRail แสดงรายละเอียดของรางสำหรับขบวนรถจักรและรางพักในตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลรางสำหรับขบวนรถจักรและรางพักที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา

หัวข้อ	รายละเอียด	
มิติและข้อมูลด้านเทคนิคของรางสำหรับขบวนรถจักร	ความยาวที่ใช้ช่วงทางตรง	5 เมตร
	ความยาวที่ใช้ช่วงทางโค้ง	3 เมตร
มิติรางพัก	ความยาวช่วงทางตรง	60 เมตร
	ความยาวช่วงตัว Y	10.80 เมตร/ด้าน
	ความยาวช่วง Slope 1 %	25.20 เมตร/ด้าน
	ความยาวรวมระยะ Slope ของรางพัก DRail และ MRail	132 เมตร
	ความยาวรวมระยะ Slope ของรางพัก YRail	105 เมตร
	ความสูงจากรางสำหรับขบวนรถจักร	0.45 เมตร

5.2.2 ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

ข้อมูลการทำงานจากเอกสารบันทึกการทำงานโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM (TBM Record) ข้อมูลระยะทางที่ก่อสร้างได้ต่อวันจากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ (Segment Inspection Report) และบันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Excavation Record) และข้อมูลการทำงานภายใน

อุโมงค์จากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด (Tunneling Work Shift Report) มีรายละเอียดดังนี้

- **อัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM**

บันทึกการทำงานของ TBM แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.6 ใช้ในการวิเคราะห์ค่าอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM โดยข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลการก่อสร้างช่วง Main Drive ทำการขุดเจาะในชั้น Fine Sand ที่ระดับความลึก 27.225 เมตรจากพื้นดิน ตำแหน่งก่อสร้างระหว่าง 173.078 เมตร ถึง 797.382 เมตรจากต้นอุโมงค์ รวมระยะทางก่อสร้าง 624.304 เมตร TBM มีอัตราการขุดเจาะอุโมงค์เฉลี่ย 60.62 มิลลิเมตร/นาที ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.87 มิลลิเมตร/นาที

การวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ต้องการศึกษาได้ใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ±5% ได้ค่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างน้อยที่สุดที่ต้องจัดเก็บจำนวน 7 กลุ่มตัวอย่าง ซึ่งน้อยกว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ได้จัดเก็บจริง โดยทำการจัดเก็บกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 515 กลุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สามารถเป็นตัวแทนของประชากรที่ศึกษาได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ที่ได้จากบันทึกการทำงานของ TBM ได้ใช้สมการที่ 4.2 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ±5% แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.9 โดยพบว่าการแจกแจงข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM มีการแจกแจงแตกต่างจากการแจกแจงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การแจกแจงปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้า อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ที่กำหนด ดังนั้นพารามิเตอร์นำเข้าของข้อมูลดังกล่าวจะทำการประเมินค่าโดยใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ 5.10

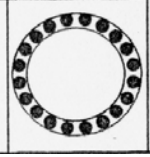
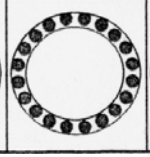
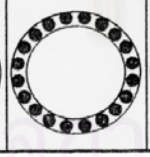
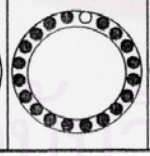
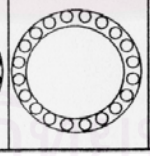
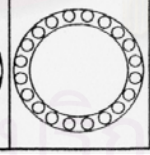
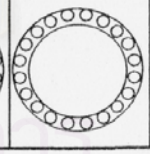
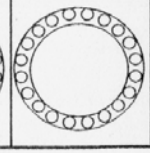
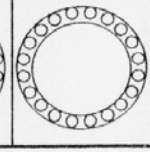
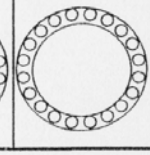
ตารางที่ 5.9 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
ExcRate	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 60.62 S.D. = 3.87	1	24.9474	0.0000
	เอกรูป (Uniform)	Min = 46 Max = 70	2	422.0777	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.02	3	5,888.5606	0.0000
	แกมม่า	α = 237.6472 β = 0.2551	1	31.6761	0.0000
	เบต้า	α = 0.9502 β = 0.1470	2	2,563.8041	0.0000

ตารางที่ 5.10 พารามิเตอร์นำเข้าอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของดินที่ขุดเจาะ	ระดับความลึกจากพื้นดิน (เมตร)	อัตราการขุดเจาะอุโมงค์ (มิลลิเมตร/นาที)	
			ชนิด	ค่า
ExcRate	Fine Sand	27.225	PERT	46/61/70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

		122 Ring	123 Ring	124 Ring	125 Ring							Total
Exca Start Time	(hh:mm:ss)	08:44:58	11:45:07	14:43:59	17:23:43							
Exca End Time	(hh:mm:ss)	09:19:28	12:18:47	15:11:24	17:52:02							
Gross Exca Time	(min)	34.5	33.7	27.4	28.3							
Net Exva Time	(min)	26.1	26.4	25.3	26.3							
Net Stroke	(mm)	1214	1219	1197	1214							
	()	0	0	0	0							
Earth Pres Left	(kPa)	145	83	162	151							
Earth Pres Right	(kPa)	87	129	86	87							
Thrust Force	(kN)	10799	11418	11580	12006							
Cutter Torque	(kN-m)	2504	2884	2503	2326							
Jack Speed Avg	(mm/min)	50	49	51	50							
Screw Rotate	(Rotate)	22082	22278	22478	22676							
Screw Press	(MPa)	2.8	4.7	2.7	2.3							
Shield Press	(MPa)	13.2	14.2	13.8	15.2							
Tail seal Press	(MPa)	1.3	1.3	1.3	1.3							
Gate Open Stroke	(%)	100	100	100	100							
Screw Revolution	(rpm)	8.0	7.5	7.9	7.5							
Chainage (Head)	(m)	113.184	114.398	115.589	116.797							
Re-Body Bearing	(deg)	224.19	224.29	224.22	224.23							
Pitching	(deg)	-0.01	-0.05	-0.09	-0.13							
Rolling	(deg)	0.63	-0.32	0.43	0.97							
Jack Diff (R-L)	(mm)	9	-4	8	8							
Bearing Displace	(deg/R)	-0.09	0.07	-0.04	-0.01							
	()	0	0	0	0							
Grout A Flow	(L/min)	52	57	56	44							
Grout B Flow	(L/min)	4	4	4	3							
Grout Pressure	(MPa)	0.21	0.25	0.24	0.23							
Grt Vol A (R)	(m3)	1.676	2.196	1.593	1.790							
Grt Vol B (R)	(m3)	0.133	0.172	0.126	0.141							
Grt Vol A+B (R)	(m3)	1.809	2.368	1.719	1.931							
Add Fill Rate	(%)	2	2	2	2							
Add Vol (R)	(m3)	0.587	0.554	0.469	0.507							
Muck Vol(Ring)	(m3)	27.661	26.062	26.600	26.329							
Jack Pattern												

รูปที่ 5.6 บันทึกการทำงานของ TBM (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

- **อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ต่อผลัดของโครงการจากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์และบันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์**

อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ต่อผลัดของโครงการที่ได้จากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์และบันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ เป็นข้อมูลที่รวบรวมและวิเคราะห์เพื่อทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้นมาโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จริงกับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วง Main Drive ตั้งแต่วันที่ 3 เมษายน พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2548 ที่ตำแหน่ง 204.524 เมตร ถึง 1,606.429 เมตรจากต้นอุโมงค์ ก่อสร้างในชั้น Fine Sand ที่ระดับความลึก 27.225 เมตร รวมระยะทางก่อสร้าง 1,401.905 เมตร แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ข้อมูลอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ต่อผลัดของโครงการจากบันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และจากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์

ตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร)	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง)	
		ค่าเฉลี่ย	SD
204.524-1,606.429	151	9.53	2.94

- **บันทึกการทำงานประจำผลัดจากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด**

ตัวอย่างของรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัดแสดงในรูปที่ 5.9 เป็นเอกสารบันทึกเวลาอย่างง่ายสำหรับขั้นตอนการทำงานที่หน้าอุโมงค์ เช่น เวลาที่ขุดเจาะในแต่ละรอบของ TBM เวลาที่ใช้ในการอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting) และเวลาที่ใช้ในการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ เป็นต้น นอกจากนี้รายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัดยังใช้บันทึกเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ เช่น TBM ร้อนจนต้องหยุดทำงาน Gantry Crane และเครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Erector) ขัดข้อง ขบวนรถจักรตกราง และเวลาที่ฝนตกหนักจน Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้ เป็นต้น

SEGMENT INSPECTION : AFTER ERECTION

Date : 02/04/05
Shift : Day / Night
Time : 20:00 - 05:00

NO.	ITEM	PROGRESS (rings)										TOTAL	REMARK
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	RING NO.	220	221	222	223	224	225	226					
2	TYPE	ST-1	ST-1	ST-1	ST-1	ST-1	ST-1	ST-1					
3	KEY POSITION	K-3	K-2	K-16	K-2	K-16	K-2	K-16					
4	GAP												
4.1	L (mm.)	15	15	15	15	15	13	15					
4.2	R (mm.)	22	22	25	28	28	30	32					
4.3	T (mm.)	20	18	20	20	20	20	30					
4.4	B (mm.)	55	50	60	52	60	60	48					
5	ROLLING (mm.)	20L	20L	20L	20L	20L	20L	20L					
6	STEP (mm.)	4	4	4	4	4	4	4					
7	CRACKING / SPALLING	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO					
8	BOLT TIGHTENNING (TORQUE)	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES					
9	PRIMARY GROUTING VOLUMN (m.3)												
9.1	SOLUTION PART-A												
9.2	SOLUTION PART-B												
10	SENCONDARY GROUTING VOLUMN (m.3)												

Checked by
IN JV Foreman : _____
Date : 02/04/05

Verify by
IN JV Engineer : _____
Date : 7/4/05

Witness (Optional) by
TEAM : _____
Date : 7-4-05

Witness (Optional) by
BMA : _____
Date : _____

รูปที่ 5.7 รายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

Excavation Record

Ring No	Condition & Copy Injection		Rec Date	Net Stroke	Net Time	Jack Speed	Cutter Current	Cutter Torque	Cut Rev	Shield Press	Thrust Force	Scrw Rev.	EPB AVR	Pitchg	Rolling	Art H Angle	Art V Angle	Grout Volm	Soil Volm	Remarks
ring				mm	min	mm/min	A	kN-m	rpm	MPa	kN	rpm	kPa	deg	deg	deg	deg	%	%	
400			23-Apr	1209	21.9	60	645	2485	1.1	16.6	13117	8.8	95	-0.08	-0.70	0.00	0.19	133%	104%	
401			23-Apr	1198	21.9	60	675	2663	1.1	16.6	13130	8.4	116	-0.07	0.22	-0.01	0.15	115%	105%	
402			23-Apr	1214	22.3	59	721	2937	1.1	16.5	13007	8.6	104	-0.07	-1.09	0.01	0.15	124%	103%	
403			23-Apr	1203	22.9	57	729	2982	1.1	16.8	13219	8.8	121	-0.07	-0.02	-0.01	0.15	132%	104%	
404			23-Apr	1206	23.6	55	706	2848	1.1	16.1	13746	8.7	119	-0.11	0.56	0.00	0.16	135%	104%	
405			23-Apr	1214	21.9	60	669	2627	1.1	16.6	13105	8.8	101	-0.11	-0.51	0.01	0.09	132%	103%	
406			23-Apr	1205	21.4	61	635	2423	1.1	15.9	12746	9.5	107	-0.11	0.48	-0.01	0.08	125%	104%	
407			23-Apr	1210	20.8	63	632	2406	1.1	14.8	12659	9.3	95	-0.12	-0.34	0.00	0.07	115%	104%	
408			23-Apr	1209	20.5	64	643	2471	1.1	15.6	12975	9.7	107	-0.12	0.38	0.02	0.07	116%	104%	
409			23-Apr	1206	20.2	65	668	2619	1.1	15.0	12561	9.5	102	-0.17	-0.38	-0.01	0.09	123%	104%	
410			23-Apr	1206	20.3	65	707	2849	1.1	15.1	12606	9.7	118	-0.21	0.73	0.02	0.10	112%	104%	
411			23-Apr	1205	20.5	64	703	2828	1.1	16.2	12784	9.7	121	-0.18	1.47	0.02	0.10	126%	104%	
412			23-Apr	1208	20.6	64	623	2354	1.1	15.6	12332	9.2	95	-0.15	0.39	0.00	0.18	124%	104%	
413			23-Apr	1207	20.8	63	641	2463	1.1	15.9	12577	9.2	96	-0.10	-0.16	0.01	0.26	124%	104%	
414			23-Apr	1204	20.8	63	688	2742	1.1	15.8	12728	9.2	108	-0.05	0.98	-0.01	0.27	124%	104%	
415			23-Apr	1202	20.5	63	710	2870	1.1	15.5	12318	9.1	103	-0.07	-0.19	-0.04	0.16	126%	104%	
416		Foam 2%	24-Apr	1210	20.8	63	804	3430	1.1	15.3	12860	9.4	126	-0.08	1.31	0.01	0.15	113%	104%	
417		SLF20	24-Apr	1205	22.0	59	738	3034	1.1	15.4	13218	8.9	103	-0.09	-0.02	0.01	0.14	129%	104%	
418		(MBT)	24-Apr	1206	22.2	59	710	2872	1.1	15.3	13084	8.7	106	-0.14	-0.77	0.01	0.09	126%	104%	
419			24-Apr	1212	22.3	59	733	3004	1.1	16.4	12973	9.1	129	-0.09	0.65	0.00	0.12	135%	104%	
420			24-Apr	1203	22.0	59	726	2963	1.1	16.4	13345	9.1	103	-0.12	-0.27	-0.02	0.16	128%	104%	
421			24-Apr	1204	22.6	58	727	2973	1.1	17.4	13688	8.7	105	-0.12	-0.99	-0.02	0.17	139%	104%	
422			24-Apr	1211	22.9	57	672	2645	1.1	17.5	13989	9.0	118	-0.13	-0.15	-0.02	0.08	88%	104%	
423			24-Apr	1208	23.2	57	692	2766	1.1	18.3	14369	8.6	117	-0.12	0.47	0.03	0.09	139%	104%	
424			24-Apr	1205	21.9	60	612	2289	1.1	17.4	13699	9.2	95	-0.12	-0.34	0.04	0.11	123%	104%	
425			24-Apr	1209	21.5	61	550	1922	1.1	16.1	12713	9.2	95	-0.12	0.09	0.03	0.10	116%	104%	
426			24-Apr	1214	21.0	63	652	2523	1.1	16.7	13149	8.6	110	-0.08	-0.90	-0.05	0.16	115%	103%	
427			24-Apr	1202	20.6	63	619	2329	1.1	16.2	12783	9.9	112	-0.08	-0.07	-0.05	0.13	125%	104%	
428			24-Apr	1206	20.6	63	612	2286	1.1	15.8	12464	9.6	108	-0.09	0.37	-0.05	0.12	112%	104%	
429			24-Apr	1209	22.4	60	671	2637	1.1	15.4	12202	8.6	104	-0.06	-0.61	-0.17	0.17	125%	104%	
430			24-Apr	1204	21.5	61	717	2909	1.1	15.6	12326	9.3	125	-0.06	0.60	-0.32	0.17	122%	104%	
431			24-Apr	1207	21.6	61	668	2619	1.1	15.3	12077	9.1	96	-0.05	-0.33	-0.45	0.15	129%	104%	
32			24-Apr	1204	21.8	60	616	2311	1.1	16.3	12826	8.9	115	-0.04	0.56	-0.71	0.12	124%	104%	
33			24-Apr	1209	21.8	60	635	2424	1.1	15.9	13299	9.0	102	-0.12	-0.25	-0.90	0.09	125%	104%	
434			24-Apr	1193	21.4	60	547	1905	1.1	15.4	13191	9.5	101	-0.11	0.20	-1.15	0.13	122%	105%	R200curve
435			25-Apr	1212	21.4	61	543	1877	1.1	15.4	13156	9.2	89	-0.10	-0.28	-1.25	0.22	125%	104%	R200curve
436			25-Apr	1207	21.6	61	581	2103	1.1	16.5	13470	9.2	123	-0.09	0.23	-1.25	0.22	129%	104%	R200curve
437			25-Apr	1215	21.7	61	602	2235	1.1	16.6	13066	9.2	111	-0.13	-0.63	-1.20	0.18	0%	103%	R200curve
438			25-Apr	1208	22.0	59	577	2083	1.1	16.0	12853	9.7	112	-0.13	0.01	-1.21	0.19	126%	104%	R200curve
439			25-Apr	1206	22.0	60	573	2059	1.1	16.8	13265	9.4	116	-0.12	0.30	-1.20	0.18	126%	104%	R200curve
440			25-Apr	1201	21.4	61	596	2194	1.1	16.7	13161	9.4	97	-0.11	-0.28	-1.20	0.18	124%	104%	R200curve
441			25-Apr	1213	21.6	61	567	2025	1.1	17.0	13421	9.7	115	-0.10	0.19	-1.20	0.18	122%	103%	R200curve
442			25-Apr	1204	21.7	60	557	1964	1.1	16.8	13007	9.4	90	-0.01	-0.45	-1.31	0.24	105%	104%	R200curve
443			25-Apr	1207	21.9	60	534	1828	1.1	16.7	12573	9.6	96	0.02	-0.10	-1.30	0.23	128%	104%	R200curve
444			25-Apr	1234	21.9	61	534	1824	1.1	16.1	12198	9.7	92	0.06	0.11	-1.29	0.19	117%	102%	R200curve
445			25-Apr	1186	20.4	63	536	1837	1.1	14.5	11000	9.4	84	0.04	-0.39	-1.50	0.11	117%	106%	R200curve
446			25-Apr	1216	20.7	63	571	2048	1.1	13.7	10885	9.2	103	-0.10	0.18	-1.54	0.02	107%	103%	R200curve
447			25-Apr	1204	20.5	64	614	2303	1.1	13.9	11018	8.7	104	-0.08	-0.71	-1.60	0.09	109%	104%	R200curve
448			25-Apr	1209	21.1	62	609	2270	1.1	14.7	12015	9.5	128	-0.13	0.06	-1.57	0.15	96%	104%	R200curve
449			25-Apr	1205	21.4	61	610	2278	1.1	16.2	12958	10.0	117	-0.11	-0.81	-1.51	0.16	141%	104%	R200curve
450			25-Apr	1206	21.6	61	557	1962	1.1	16.7	13159	11.0	116	-0.13	-0.45	-1.52	0.16	112%	104%	R200curve
451			25-Apr	1213	21.7	61	540	1864	1.1	16.7	13149	10.6	100	-0.11	-0.19	-1.52	0.15	128%	103%	R200curve
452			25-Apr	1202	21.5	61	550	1919	1.1	16.8	13227	11.1	110	-0.09	0.07	-1.28	0.15	127%	104%	R200curve
453			25-Apr	1205	21.7	60	554	1942	1.1	16.7	13180	11.8	96	-0.07	-0.37	-1.29	0.14	133%	104%	R200curve
454			25-Apr	1094	19.3	61	531	1809	1.1	15.8	12458	11.7	100	-0.05	-0.06	-1.14	0.16	125%	115%	R200curve
455			26-Apr	1191	22.5	58	545	1889	1.1	16.0	12870	10.3	128	-0.05	0.30	-1.14	0.17	128%	105%	R200curve
456			26-Apr	1214	25.7	51	554	1946	1.1	17.1	13482	12.6	110	-0.03	-0.32	-1.14	0.17	130%	103%	R200curve
457			26-Apr	1212	25.2	52	533	1821	1.1	15.0	12333	16.0	106	0.00	0.11	-1.21	0.22	132%	104%	R200curve
458			26-Apr	1203	24.4	54	529	1797	1.1	14.0	11251	15.0	88	0.01	-0.53	-1.25	0.22	120%	104%	R200curve
459			26-Apr	1199	23.5	56	523	1759	1.1	13.2	10243	14.6	90	0.04	-0.10	-1.24	0.22	116%	105%	R200curve
460			26-Apr	1210	22.6	58	524	1766	1.1	13.8	10470	15.0	91	0.10	0.17	-1.31	0.22	58%	104%	R200curve
461			26-Apr	1200	21.6	60	530	1804	1.1	12.8	10206	15.4	90	0.06	-0.46	-1.33	0.17	125%	105%	R200curve
462			26-Apr	1205	21.5	61	527	1785	1.1	10.9	9384	14.1	91	0.03	-0.08	-1.30	0.13	112%	104%	R200curve
463			26-Apr	1204	20.7	63	523	1761	1.1	10.6	9075	13.8	92	-0.01	0.28	-1.31	0.07	115%	104%	R200curve
464			26-Apr	1200	21.1	61	527	1783	1.1	11.2	9241	14.3	89	-0.06	-0.18	-1.30	0.06	108%	105%	R200curve
65			26-Apr	1209	20.9	63	539	1854	1.1	12.4	9850	11.5	91	-0.06	-0.53	-1.39	0.11	108%	104%	R200curve
66		Foam 2%	26-Apr	1210	20.5	64	534	1828	1.1	12.6	9987	11.5	93	-0.05	-0.06	-1.48	0.17	92%	104%	R200curve
467		Polyform80	26-Apr	1197	20.6	63	542	1874	1.1	13.7	10617	10.7	105	-0.06	0.25	-1.53	0.14	127%	105%	R200curve
468		(NKT)	26-Apr	1210	20.8	63	550	1922	1.1	13.8	10512	10.6	94	-0.06	-0.24	-1.58	0.16	119%	104%	R200curve
469			26-Apr	1201	20.4	64	548	1908	1.1	13.3	10101	10.9	100	-0.05	0.16	-1.59	0.16	104%	104%	R200curve
470			26-Apr	1206	20.2	65	561	1987	1.1	13.3	10136	9.5	93	-0.01	-0.39	-1.51	0.22	111%	104%	R200curve
471			26-Apr	1215	19.9	66	600	2219	1.1	14.2	10766	10.7	111	-0.05	0.21	-1.35	0.13	117%	103%	R200curve
472			26-Apr	1211	19.7	67	596	2194	1.1	13.9	10538	10.6	90	-0.03	-0.57	-1.32	0.15	97%	104%	R200curve
473			26-Apr	1196	19.8	65	555	1951	1.1	13.3	10423	10.7	99	-0.05	-0.15	-1.34	0.14	121%	105%	R200curve
474			27-Apr	1194	20.3	64	559	1975	1.1	13.4	10662	10.0	104	-0.04	0.17	-1.37	0.16	109%	105%	R200curve
475			27-Apr	1210	21.8	60	623	2352	1.1	14.2	11267	9.5	91	-0.01	-0.48	-1.36	0.15	92%	104%	R200curve
476			27-Apr	1202	21.9	60	714	2894	1.1	14.7	11625	8.9	111	0.05	0.47	-1.37	0.16	126%	104%	R200curve
477			27-Apr	1208	22.9	57	777	3265	1.1	14.9	11932	9.1	94	0.08	-0.59	-1.36	0.15	106%	104%	R200curve
478			27-Apr	1202	21.9	59	748	3092	1.1	15.3	12676	9.1	116	0.05	0.25	-1.28	0.10	110%	104%	R200curve
479			27-Apr	1214	22.2	59	711	2877	1.1	14.7	12563	9.1	94	0.05	-0.56	-1.30	0.12	121%	103%	R200curve
480			27-Apr	1204	22.8	57	739	3044	1.1	15.5	13249	8.5	106	-0.03	0.31	-1.26	0.00	122%	104%	R200curve
481			27-Apr	1209	22.3	59	705	2841	1.1	15.5	13271	9.1	96	-0.06	-0.45	-1.27	-0.03	129%	104%	R200curve
482			27-Apr	1204	22.2	59	662	2588	1.1	15.9	13582	8.5	102	-0.10	0.26	-1.23	0.00	128%	104%	R200curve
483			27-Apr	1213	21.6	61	625	2385	1.1	15.0	12838	9.4	93	-0.15	-0.44	-1.23	0.00	103%	103%	R200curve
484			27-Apr	1194	21.0	62	673	2651	1.1	16.2	12829	9.1	105	-0.12	0.26	-1.24	-0.01	75%	105%	R200curve
485			27-Apr	1215	21.2	62	664	2596	1.1	16.5	12994	9.5	92	-0.14	-0.39	-1.23	0.00	67%	103%	R200curve
486			27-Apr	1207	20.7	63	581	2108	1.1	15.0	11892	9.5	102	-0.15	0.22	-1.15	0.03	44%	104%	R200curve
487			27-Apr	1216	21.1	62	689	2747	1.1	16.0	12602	9.5	94	-0.17	-0.76	-1.14	0.06	89%	103%	R200curve
488			27-Apr	1217	20.0	66	578	2085	1.1	14.2	11194	10.3	100	-0.12	-0.22	-1.14	0.14	83%	103%	R200curve
489			27-Apr	1213	18.8	70	671	2637	1.1	15.5	12254	10.4	111	-0.11	0.37	-1.14	0.14	105%	103%	R200curve
490			27-Apr	1208	20.1	65	652	2528	1.1	15.1	11955	10.0	94	-0.08	-0.61	-1.28	0.20	83%	104%	R200curve
491			27-Apr	1189	20.5	63	552	1936	1.1	14.1	11150	9.8	96	-0.06	-0.13	-1.25	0.23	109%	106%	R200curve
492			28-Apr	1214	21.8	60	610	2279	1.1	15.4	12138	9.3	87	-0.03	-0.84	-1.30	0.27	103%	103%	R200curve
493			28-Apr	1205	21.5	61	542	1872	1.1	13.3	10543	9.8	93	-0.08	-0.46	-1.25	0.22	127%	104%	R200curve
494			28-Apr	1210	20.9	63	555	1951	1.1	13.2	10453	9.4	94	-0.09	-0.14	-1.26	0.21	112%	104%	R200curve
495			28-Apr	1209	21.3	61	720	2929	1.1	14.0	11101	9.4	121	-0.05	0.61	-1.28	0.22	126%	104%	R200curve
496			28-Apr	1206	21.7	60	660	2575	1.1	14.4	11436	9.6	100	-0.07	-0.69	-1.33	0.27	124%	104%	R200curve
497			28-Apr	1207	21.9	60	606	2256	1.1	13.8	10962	9.7	112	-0.02	0.23	-1.38	0.31	128%	104%	R200curve
498			28-Apr	1201	21.2	61	674	2656	1.1	14.6	11537	9.5	104	-0.03	-0.68	-1.35	0.29	122%	104%	R200curve
499			28-Apr	1209	21.0	62	611	2284	1.1	14.1	11186	9.8	110	-0.03	0.15	-1.38	0.28	123%	104%	R200curve
AVR	R400-499			1,205	21	61	621	2,341	1.1	15.2	12182	10.0	104	-0.07	-0.08	-0.89	0.15	115%	104%	

รูปที่ 5.8 บันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

IN Joint Venture

Italian-Thai Development Public Co., Ltd.
Nishimatsu Construction Co., Ltd.

Flood Protection Tunnel Project
BMA

TUNNELLING WORK SHIFT REPORT

DATE : 29/07/05

SHIFT : ☑ Day , ☐ Night

ITEM	DESCRIPTION	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
1	EXCAVATION			→			→			→	→	→		→											
	RING No.			1910			1911			1912	1913	1914		1915											
	VOLUMN (m^3) (SKIPNESS)																								
2	PRIMARY GROUTING			→			→			→	→	→		→											
	RING No.			1907			1908			1909	1910	1911		1912											
	POSITION																								
3	SURVEY									→															
4	ERECTION			→			→			→	→	→		→											
	RING No.			1910			1911			1912	1913	1914		1915											
	KEY POSITION			16			2			16	2	7		15											
5	OTHER																								
	RAIL EXTENSION																								
	PIPE EXTENSION																								
	CLEANING																								

INSTRUCTION TO NEXT SHIFT

- EXCAVATION P 1916
(LOCOMOTIVE ใช้ได้ดีมา 1 คันแล้ว)

TBM. ALIGNMENT	LINE		LEVEL		LEAD
	FRONT	REAR	FRONT	REAR	
START OF SHIFT					
END OF SHIFT					

STAFF / LABOUR		REMARK
POSITION	Nos.	
ENGINEER	3	
FOREMAN	5	
TBM. OPERATOR	2	
~~ERECTOR OPERATOR~~		~~P 710 → P 870~~
LOCO OPERATOR	3	- ปรับรถขบวนรถ ขบวนที่ลิ่มขึ้น 09.00 - 11.00
CRANE OPERATOR	2	- เปลี่ยน ท่อน้ำ 09.00 - 15.00
LABOUR	27	
ELECTRICIAN	2	- รถฝน ตันเดือน ตกตรงตรงที่เดือนมา 18.00-18.30
MECHANICIAN	2	
SAFETY OFFICER	1	(พอรถฝนออกตกมันก็ปรับรถกลับเข้าที่ เหมือนเดิม).
OTHER		

PREPARED BY ( ) FOREMAN

AGREED BY ( ) ENGINEER

CHECKED BY ( ) SENIOR ENGINEER

รูปที่ 5.9 รายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด (สำนักการระบายน้ำ, 2548)

การวิเคราะห์เหตุการณ์ต่างๆ ที่ได้บันทึกไว้ในรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด ระหว่างวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2548 มีจำนวนรอบการก่อสร้างอุโมงค์ทั้งหมด 2,147 รอบ โดยจะทำการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์และเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้น ในกรณีที่เหตุการณ์ดังกล่าวไม่สามารถวิเคราะห์ค่าเวลาที่สูญเสียได้อย่างชัดเจน เช่น ประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงเนื่องจากการใช้เครื่องจักรสำรองที่มีความสามารถในการทำงานต่ำกว่าเครื่องจักรหลักที่อยู่ในระหว่างการซ่อมแซม เป็นต้น จะใช้การประมาณค่าเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นแทนการวิเคราะห์จากข้อมูลจริง เนื่องจากการที่จะเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมถึงเหตุการณ์ที่ไม่สามารถวัดค่าเวลาสูญเสียได้อย่างชัดเจนที่กล่าวมานั้นจะต้องทำการเก็บข้อมูลโดยการจับเวลาจากการทำงานจริงเท่านั้น ทำให้ต้องใช้เวลาและเสียค่าใช้จ่ายสูง

ผลการวิเคราะห์ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์แสดงในตารางที่ 5.12 แบ่งได้เป็น 7 กลุ่ม

(1) ขบวนรถจักรตกราง

(2) การนำ Gantry Crane สำรองที่มีความสามารถในการทำงานต่ำกว่า Gantry Crane หลักมาใช้ทำงานแทน

(3) TBM และระบบสนับสนุนการขุดเจาะขัดข้อง ได้แก่ สายพานลำเลียงดิน, Grout Pump Unit, Grease Pump Unit และระบบสำรวจอัตโนมัติ

(4) Gantry Crane ขัดข้อง

(5) Gantry Crane ต้องหยุดทำงานเนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น ฝนตกหนักจน Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้ เป็นต้น

(6) เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์และระบบสนับสนุนการการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ขัดข้อง ได้แก่ Segment Transportation Hoist และ Segment Transportation Equipment

(7) เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter) ขัดข้อง

สำหรับกลุ่มข้อมูลที่ไม่ได้นำไปใช้ในแบบจำลองสถานการณ์เนื่องจากมีความถี่ในการเกิดน้อยหรือปานกลางแต่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์น้อย เช่น ระบบไฟฟ้าภายในอุโมงค์ขัดข้อง ดาดผนังอุโมงค์แตกร้าวขณะติดตั้งทำให้ต้องเสียเวลาเปลี่ยนใหม่ การจัดส่งดาดผนังอุโมงค์เข้าไปติดตั้งภายในอุโมงค์ไม่ตรงตามชนิดที่ต้องใช้หน้างาน ระบบท่อส่งน้ำและ

ท่ออากาศภายในอุโมงค์ขัดข้อง และฝ่ายจัดซื้อไม่สามารถจัดส่งวัสดุเข้ามาภายในโครงการได้ทันตามความต้องการทำให้ไม่สามารถทำงานต่อไปได้ เป็นต้น

ตารางที่ 5.12 ความถี่ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์จากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ความถี่	ร้อยละ
ขบวนรถจักรตกราง	46	30.87
การใช้ Gantry Crane สำรองทำงานแทน Gantry Crane หลัก	45	30.20
TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง	25	16.78
Gantry Crane หลักขัดข้องแต่ไม่ได้ใช้ Gantry Crane สำรองทำงานแทน	13	8.72
Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากปัจจัยภายนอก	6	4.03
เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์และระบบสนับสนุนขัดข้อง	5	3.36
เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรขัดข้อง	3	2.01
อื่นๆ	6	4.03
รวม	149	100.00

ค่าพารามิเตอร์นำเข้าความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์แสดงในตารางที่ 5.13 เป็นค่าที่ใช้ข้อมูลจากบันทึกการทำงานประจำผลัดภายในช่วงเวลาที่ศึกษาคำนวณหาอัตราการเกิดเหตุการณ์ในแต่ละเหตุการณ์ต่อจำนวนรอบการทำงานทั้งหมดของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์นั้น ตัวอย่างเช่น ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้องคำนวณจากความถี่การเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวที่ได้บันทึกไว้จำนวน 25 ครั้งต่อการทำงานของ TBM และระบบสนับสนุนทั้งหมด 2,147 ครั้ง ดังนั้นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 0.0116

ตารางที่ 5.13 พารามิเตอร์นำเข้าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย	ความน่าจะเป็น
ProbTrainDerail	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	0.0218
ProbTempGantryCraneOperate	ความน่าจะเป็นการนำ Gantry Crane สำรองทำงานแทน Gantry Crane หลัก	0.0210
ProbTBMBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง	0.0116
ProbGantryCraneBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ Gantry Crane ขัดข้อง	0.0061
ProbGantryCraneStop	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากปัจจัยภายนอก	0.0028
ProbSegmentErectorBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์และระบบสนับสนุนขัดข้อง	0.0023
ProbCarShifterBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรขัดข้อง	0.0014

เนื่องจากจำนวนข้อมูลการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์มีจำนวนไม่เพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้น ดังนั้นข้อมูลเวลาสูญเสียดังกล่าวจะใช้ PERT ทำการประเมินค่าเวลาสูญเสียของแต่ละเหตุการณ์แสดงในตารางที่ 5.14 สำหรับการนำข้อมูลขบวนรถจักรตกรางมาวิเคราะห์และจัดให้อยู่ในรูปแบบพารามิเตอร์นำเข้าจะพิจารณาถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกรางโดยมีสมมติฐานขบวนรถจักรมีโอกาสตกราง ณ ตำแหน่งต่างๆ เท่ากัน เช่น ขบวนรถจักรมีโอกาสตกรางที่ตำแหน่งระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับรางพัก DRail เท่ากับที่ตำแหน่งระหว่างรางพัก DRail กับรางพัก MRail เป็นต้น โดยเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการ

ซ่อมแซมรางและยกขบวนรถจักรขึ้นไปไว้บนรางที่บันทึกไว้ในบันทึกการทำงานประจำผลัดเป็นเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้น สำหรับเหตุการณ์ Gantry Crane ขัดข้องนั้น เนื่องจาก Gantry Crane ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษามี 2 เครื่อง เครื่องหลักจะใช้ในการนำดินไปทิ้งและบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ เครื่องที่ 2 จะเป็นเครื่องสำรองใช้ในการยกดาดผนังอุโมงค์จากรถบรรทุกไปไว้ในที่กองเก็บซึ่งอยู่ใกล้กับปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ การวิเคราะห์ข้อมูลเวลาสูญเสียเหตุการณ์ Gantry Crane ขัดข้องในกรณีที่ Gantry Crane หลักเสียหายไม่มากนัก ใช้เวลาในการซ่อมไม่นานและไม่ต้องใช้ Gantry Crane สำรองทำงานแทนนั้นจะวิเคราะห์จากข้อมูลจริงที่ได้จากบันทึกการทำงานประจำผลัด แต่ในกรณีที่ Gantry Crane หลักเสียหายมากจนต้องหยุดซ่อมแซมหลายวันและต้องใช้ Gantry Crane สำรองซึ่งเป็นเครื่องเก่าทำงานแทนนั้นไม่สามารถใช้ข้อมูลจากบันทึกการทำงานประจำผลัดวิเคราะห์ค่าเวลาสูญเสียที่เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ Gantry Crane หลักได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดสมมติฐานว่าความสามารถในการทำงานของ Gantry Crane สำรองมีค่าเท่ากับ 50% ของ Gantry Crane หลัก นั่นคือ Gantry Crane สำรองจะใช้เวลาในการนำดินไปทิ้งและบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่เป็นระยะเวลาสองเท่าของ Gantry Crane หลัก

ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาสูญเสียของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย	เวลาสูญเสีย (นาที)	
		ชนิด	ค่า
TrainDerail	เวลาสูญเสียเนื่องจากขบวนรถจักรตกราง	PERT	25/120/360
CoOptTempGantryCrane[(1)]	ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำงานที่ลดลงในกรณีที่ใช้ Gantry Crane สำรองทำงานแทน Gantry Crane หลัก	ค่าคงที่	0.50
TBMBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจาก TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง	PERT	25/40/1,210
GantryCraneBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจาก Gantry Crane ขัดข้อง	PERT	30/60/150

ตารางที่ 5.14 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาสูญเสียของการเกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย	เวลาสูญเสีย (นาที)	
		ชนิด	ค่า
GantryCraneStop	เวลาสูญเสียจากการที่ Gantry Crane ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากปัจจัยภายนอก	PERT	70/90/120
SegmentErectorBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจากเครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์และระบบสนับสนุนขัดข้อง	PERT	45/90/160
CarShifterBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจากเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรขัดข้อง	PERT	40/60/150

หมายเหตุ

(1) ได้จากการประมาณค่าโดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ Gantry Crane สำรองมีความสามารถในการทำงานเท่ากับ 50% ของ Gantry Crane หลัก

5.2.3 ข้อมูลแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา

ข้อมูลแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยข้อมูลแผนการจัดสรรทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละช่วงการก่อสร้างอุโมงค์ ข้อมูลระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ กฎการเดินทางของขบวนรถจักร (Train Policy) ภายในอุโมงค์ และสุดท้ายได้แก่ ข้อมูลขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

- **แผนการจัดสรรทรัพยากรของโครงการกรณีศึกษา**

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาได้มีการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์สำหรับการจัดสรรทรัพยากรในช่วง Main Drive ออกเป็น 4 ช่วง ได้แก่

(1) ก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 173.078-1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 2 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์

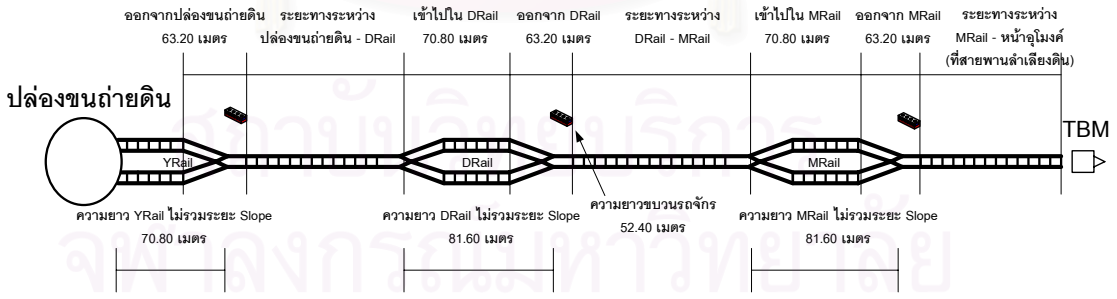
(2) ก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 1,000-2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 3 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail เพิ่มที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์

(3) ก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 2,100-4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 4 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ รางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ และติดตั้งรางพัก MRail ซึ่งเป็นรางพักชนิดเคลื่อนย้ายได้เพิ่มที่ตำแหน่ง 1,900 เมตรจากต้นอุโมงค์ โดยจะทำการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail ทุก 2 สัปดาห์ให้ห่างจากด้านหลัง TBM ประมาณ 200 เมตร

(4) ก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 4,500-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 4 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ ทำการถอดรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ไปติดตั้งที่ตำแหน่ง 2,500 เมตรจากต้นอุโมงค์และทำการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail ไปที่ตำแหน่ง 4,300 เมตรจากต้นอุโมงค์

- **ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา**

ระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรที่ใช้อ้างอิงในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model และ Discrete-Event Simulation Model แสดงในรูปที่ 5.10 ดังนี้



รูปที่ 5.10 ระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์

- **กฎการเดินทางของขบวนรถจักร (Train Policy) ภายในอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา**

กฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์จะให้ความสำคัญต่อการเดินทางไปยังพื้นที่ก่อสร้าง 2 ตำแหน่ง ได้แก่ การเดินทางเข้าและออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์และการเดินทางเข้าและออกจากหน้าอุโมงค์ โดยการเดินทางเข้าและออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์จะให้ความสำคัญต่อขบวนรถจักรที่เดินทางเข้าไปที่ปล่องขนถ่ายดินมากกว่าขบวนรถจักรที่เดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดิน เนื่องจากปล่องขนถ่ายดินมีพื้นที่จำกัดทำให้ขบวนรถจักรที่เดินทางมาจากหน้าอุโมงค์ไม่สามารถเข้าไปที่ปล่องขนถ่ายดินได้ในขณะที่ขบวนรถจักรขบวนก่อนหน้าซึ่งอยู่ที่ปล่องขนถ่ายดินกำลังนำดินไปทิ้ง อีกทั้ง Gantry Crane ซึ่งทำหน้าที่บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้งต้องใช้เวลาในการทำงานค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดเวลาสูญเปล่า (Idle Time) ขึ้นกับ Gantry Crane จึงต้องให้ขบวนรถจักรจากหน้าอุโมงค์เดินทางเข้าไปที่ปล่องขนถ่ายดินก่อน ขบวนรถจักรที่อยู่ในปล่องขนถ่ายดินจึงจะเดินทางออกมาได้ สำหรับการเดินทางเข้าและออกจากหน้าอุโมงค์จะให้ความสำคัญต่อขบวนรถจักรที่เดินทางเข้าไปที่หน้าอุโมงค์มากกว่าขบวนรถจักรที่เดินทางออกจากหน้าอุโมงค์ เนื่องจากไม่ต้องการให้ TBM ต้องเสียเวลารอขบวนรถจักร ดังนั้นขบวนรถจักรที่นำดินไปทิ้งจะต้องไปหยุดรออยู่ที่รางพักซึ่งอยู่ใกล้หน้าอุโมงค์มากที่สุดและให้ขบวนรถจักรที่กำลังเดินทางไปที่หน้าอุโมงค์เดินทางไปถึงรางพักนั้นเสียก่อนจึงจะเดินทางออกจากหน้าอุโมงค์ได้ นอกจากนี้จะไม่อนุญาตให้ขบวนรถจักรไปหยุดรออยู่ที่รางระหว่างรางพักเพื่อป้องกันความสับสนในการเดินทางภายในอุโมงค์และเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน

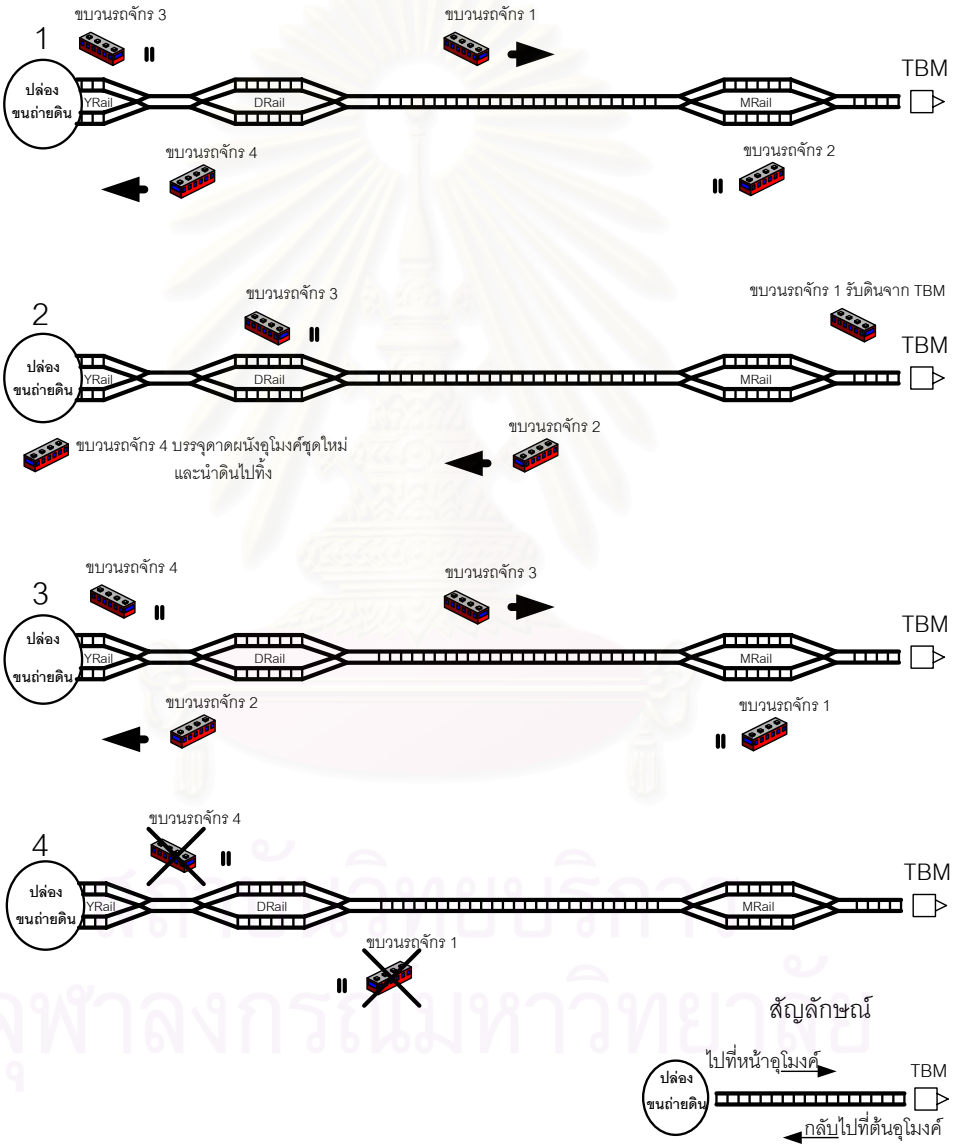
จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นกฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์แสดงในรูปที่ 5.11 ได้ดังนี้

(1) ขบวนรถจักร 2 ที่นำดินไปทิ้งจะต้องหยุดรออยู่ที่รางพัก MRail ซึ่งอยู่ใกล้หน้าอุโมงค์มากที่สุด และให้ขบวนรถจักร 1 ที่กำลังเดินทางจากรางพัก DRail เดินทางไปถึงรางพัก MRail ก่อน ขบวนรถจักร 2 จึงจะเดินทางต่อไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ได้

(2) ขบวนรถจักร 3 ที่เดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์จะต้องหยุดรออยู่ที่รางพัก DRail เพื่อให้ขบวนรถจักร 2 เดินทางผ่านรางพัก DRail ก่อน ขบวนรถจักร 3 จึงจะเดินทางต่อไปที่รางพัก MRail ได้

(3) ขบวนรถจักร 4 ที่รออยู่ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์จะต้องหยุดรออยู่ที่รางพัก YRailเพื่อรอให้ขบวนรถจักร 2 เดินทางมาถึงรางพัก YRail ก่อน ขบวนรถจักร 4 จึงจะเดินทางต่อไปที่ รางพัก DRail ได้

(4) ขบวนรถจักรทุกขบวนจะหยุดรอได้ที่รางพักเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ขบวนรถจักรไปหยุดรออยู่ที่รางระหว่างรางพัก



รูปที่ 5.11 กฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์

- **ขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา**

ขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนการทำงาน 4 ประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนฟันขุดเจาะของ TBM การติดตั้งรางพัก DRail และ MRail การสับเปลี่ยนผลัดการทำงานประจำเดือนของกลุ่มคนงาน และการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail แสดงพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ในตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย	หน่วย	ค่า
ChangeCutterBits	เวลาที่ใช้เปลี่ยนฟันขุดเจาะของ TBM	นาที	10,080
InstallDRailandMRail	เวลาที่ใช้ติดตั้งรางพัก DRail และ MRail	นาที	4,320
IntDstToChangeCutterBits	ระยะการก่อสร้างอุโมงค์ต่อการเปลี่ยนฟันขุดเจาะของ TBM ในแต่ละครั้ง	เมตร	2,953
IntTimeToMonthlyStop	ช่วงระยะห่างของเวลาต่อการหยุดก่อสร้างอุโมงค์เพื่อสับเปลี่ยนผลัดการทำงานประจำเดือนของกลุ่มคนงานในแต่ละครั้ง	เดือน	1
IntTimeToRemoveMRail	ช่วงระยะห่างของเวลาต่อการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail ในแต่ละครั้ง	วัน	15
ShiftLength	ระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละผลัด	นาที	720

ตารางที่ 5.15 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย	หน่วย	ค่า
MonthlyStop	เวลาที่ใช้สับเปลี่ยนผลัดการทำงานประจำเดือนของกลุ่มคนงาน	นาที	720
RemoveMRail	เวลาที่ใช้เคลื่อนย้ายรางพัก MRail โดยทำการเคลื่อนย้ายทุก 2 สัปดาห์ ให้อยู่ห่างจากด้านหลัง TBM ประมาณ 200 เมตร	นาที	720

5.2.4 ข้อมูลจากสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

การจับเวลาขั้นตอนการทำงานของโครงการกรณีศึกษาได้ทำการจับเวลาเฉพาะขั้นตอนการทำงานที่อยู่บนพื้นดินและที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ มี 3 ขั้นตอนได้แก่ การนำดินไปทิ้ง การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าเพื่อประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนก่อสร้างได้อธิบายในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 ขั้นตอนแรกเป็นการหาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรโดยใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ±5% ในขณะที่การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงของข้อมูลนั้นจะทำการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่า Goodness of Fit Test โดยใช้วิธีการทดสอบ Chi-Square ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ±5% ทำการทดสอบเฉพาะการแจกแจงที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรม ProbSched และ Stroboscope ได้เท่านั้น ได้แก่ การแจกแจงปกติ การแจกแจงเอกรูป การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า การแจกแจงเบต้า และในกรณีที่พบว่าการแจกแจงที่ทดสอบไม่ตรงตามการแจกแจงที่กล่าวมาข้างต้นจะทำการวิเคราะห์โดยใช้ PERT ต่อไป สำหรับรายละเอียดการวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนของประชากรและการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษาได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ก

- **การนำดินไปทิ้ง**

การนำดินไปทิ้งประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 4 ขั้นตอนแสดงในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการนำดินไปทิ้ง

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	เวลาที่ใช้ (นาที)	
		ชนิด	ค่า
การยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์	MuckCar_ToGround (106 กลุ่มตัวอย่าง)	PERT	1.77/1.93/5.57
การนำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง	MuckCar_ToUnloadSoil (106 กลุ่มตัวอย่าง)	แกมม่า (α / β)	18.9531/0.0951
การนำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน	MuckCar_ToShaft (106 กลุ่มตัวอย่าง)	ปกติ (Mean/S.D.)	0.71/0.17
การนำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์	MuckCar_ToUnderGround (106 กลุ่มตัวอย่าง)	PERT	1.20/1.60/4.40

- **การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่**

การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 3 ขั้นตอนแสดงในตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	เวลาที่ใช้ (นาที)	
		ชนิด	ค่า
Gantry Crane เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ	Load_SL (80 กลุ่มตัวอย่าง)	แกมม่า (α / β)	22.9853/0.1960

ตารางที่ 5.17 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ (ต่อ)

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	เวลาที่ใช้ (นาที)	
		ชนิด	ค่า
Gantry Crane นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน	SL_ToShaft (80 กลุ่มตัวอย่าง)	PERT	0.58/1.42/2.62
Gantry Crane หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์	SL_ToUnderGround (80 กลุ่มตัวอย่าง)	แกมม่า (α / β)	25.3571/0.0735

- **การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร**

การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 3 ขั้นตอนแสดงในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 พารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	เวลาที่ใช้ (นาที)	
		ชนิด	ค่า
การติดตั้งหัวรถจักร	Inst_Loco (118 กลุ่มตัวอย่าง)	PERT	0.23/0.32/0.77
การถอดหัวรถจักร	Release_Loco (118 กลุ่มตัวอย่าง)	ปกติ (Mean/S.D.)	0.34/0.09
การนำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร	CarShifter_Operate (118 กลุ่มตัวอย่าง)	แกมม่า (α / β)	14.9916/0.0173

5.2.5 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB

วิศวกรที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ที่มีการค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุลที่เรียกว่า EPB ของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษามีทั้งหมด 2 ท่าน แต่ละท่านมีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ 4 ปี และ 10 ปี ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของระยะเวลาน้อยที่สุดที่เกิดขึ้น มากที่สุดที่เกิดขึ้น และบ่อยที่สุดที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้าง โดยให้ค่าน้ำหนักข้อมูลของวิศวกรทั้ง 2 ท่านเท่ากัน นั่นคือมีสมมติฐานว่าข้อมูลจากวิศวกรทั้ง 2 ท่านมีความน่าเชื่อถือเท่ากัน หลังจากนั้นจึงใช้ PERT ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนจากความสามารถในการทำงานในแต่ละขั้นตอนก่อสร้าง โดยแสดงความหมายของพารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จากการสัมภาษณ์ในแต่ละขั้นตอนก่อสร้างไว้ในตารางที่ 5.19 และแสดงค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จากการสัมภาษณ์ในแต่ละขั้นตอนก่อสร้างไว้ในตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.19 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าจากการสัมภาษณ์วิศวกรของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
อัตราเร็วขบวนรถจักร	
SlowTrainSpeed	อัตราเร็วสำหรับการเข้าและออกจากรางพัก
TrainSpeed	อัตราเร็วปกติ
ChangeBattery	เวลาที่ใช้เปลี่ยนแบตเตอรี่
ChangeBatteryDone	การตรวจสอบเงื่อนไขการเปลี่ยนแบตเตอรี่
IntDstToChangeBattery	ระยะทางวิ่งของขบวนรถจักรโดยประมาณต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในแต่ละครั้ง
ExcRate	อัตราขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM
ExtendRail	เวลาที่ใช้ต่อรางความยาว 5 เมตรสำหรับขบวนรถจักร
InspectSL	เวลาที่ใช้ตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย
InstallSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

ตารางที่ 5.19 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าจากการสัมภาษณ์วิศวกรของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
PrepareToInst	เวลาที่ใช้เตรียมการประกอบดาดผนังอุโมงค์
Inst_InvertSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Invert Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_LeftSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Left Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_RightSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Right Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_CrownSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Crown Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_KeySL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Key Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
HaulToHydraulicSupport	เวลาที่ขบวนรถจักรใช้เคลื่อนไปที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Support) ด้านหลัง TBM ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร
HaulToLoadSoil	เวลาที่ขบวนรถจักรใช้เคลื่อนไปที่สายพานลำเลียงดินเพื่อรอรับดิน ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร
LengthEnough	เงื่อนไขในการต่อรางความยาว 5 เมตรสำหรับขบวนรถจักร
IntDstToExtendRail	ระยะด้านหลัง TBM ที่ใช้ในการต่อราง
SetUpForNextShift	เวลาที่ใช้ตรวจสอบหัวรถจักรประจำผลัด
UnloadSL	เวลาที่ขบวนรถจักรใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์

ตารางที่ 5.20 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าจากการสัมภาษณ์วิศวกรของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	ค่าเฉลี่ยจากการสัมภาษณ์[1]	
		ชนิด	ค่า
อัตราเร็วขบวนรถจักร			
SlowTrainSpeed	เมตร/นาที	PERT	41.67/50/58.33
TrainSpeed	เมตร/นาที	PERT	91.67/100/108.33
ChangeBattery	นาที	PERT	10/15/20
ChangeBatteryDone			
IntDstToChangeBattery	เมตร	ค่าคงที่	15,000
ExcRate			
Silty Fine Sand	มิลลิเมตร/นาที	PERT	50/66/70
Silty Clay	มิลลิเมตร/นาที	PERT	33/51/70
ExtendRail	นาที	PERT	12/15/20
InspectSL	นาที	PERT	2.75/3.50/4.75
InstallSL			
PrepareToInst	นาที	PERT	5.50/7/8.50
Inst_InvertSL	นาที	PERT	2.25/3/4.75
Inst_LeftSL	นาที	PERT	3.50/4.50/6
Inst_RightSL	นาที	PERT	3.50/4.50/6
Inst_CrownSL[2]	นาที	PERT	3.75/5/12.50
Inst_KeySL[2]	นาที	PERT	5/6/12.50
HaulToHydraulicSupport[3]	นาที	PERT	0.88/1.50/5.88
HaulToLoadSoil	นาที	PERT	0.88/1.50/1.88
LengthEnough			
IntDstToExtendRail	เมตร	ค่าคงที่	6
SetUpForNextShift	นาที	ค่าคงที่	30
UnloadSL	นาที	PERT	3.50/4.50/6.50

หมายเหตุ

(1) เป็นการนำค่าที่ได้จากการสัมภาษณ์วิศวกรทั้ง 2 ท่านมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยโดยให้น้ำหนักข้อมูลของทั้ง 2 ท่านเท่ากัน

(2) Pessimistic Duration ของการติดตั้ง Crown Segment Lining (Inst_CrowSL) และการติดตั้ง Key Segment Lining (Inst_KeySL) ประเมินจากระยะเวลามากที่สุดที่เกิดจากความไม่แน่นอนของความสามารถในการทำงานและเวลาที่เกิดจากการปรับแต่ง Crown หรือ Key Segment Lining ให้ครบเป็นวง

(3) Pessimistic Duration ของขบวนรถจักรเคลื่อนไปที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ด้านหลัง TBM (HaulToHydraulicSupport) ระยะทางวิ่งโดยประมาณ 40 เมตร ประเมินจากระยะเวลามากที่สุดที่เกิดจากความไม่แน่นอนของความสามารถในการทำงานและเวลาที่เกิดจากการที่บางรอบขบวนรถจักรต้องรอขนถ่ายวัสดุอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ใน Grout Tank ที่ตู้ Backup System และเวลาที่ต้องรอบรรทุกรางสำหรับตู้ Backup System ที่ถอดออกมาเพื่อนำไปประกอบที่ด้านหน้าตู้ Backup System ให้เสร็จเรียบร้อยก่อนจึงจะเคลื่อนไปที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ได้

5.3 สรุปท้ายบท

บทนี้ได้แสดงข้อมูลและอธิบายวิธี Deterministic ที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาใช้ในการวางแผนและวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างซึ่งเป็นวิธีที่นำเอาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์บางขั้นตอนมาวิเคราะห์เท่านั้น อีกทั้งวิธีดังกล่าวมีสมมติฐานว่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความแน่นอนจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ได้ ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าจึงควรเพิ่มรายละเอียดของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ และควรวิเคราะห์โดยใช้วิธี Probabilistic ซึ่งเป็นวิธีที่นำค่าความไม่แน่นอนในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมาประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อให้ได้ค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลของโครงการกรณีศึกษาได้ทำการจัดกลุ่มตามแหล่งที่มาของข้อมูลดังที่ได้อธิบายในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล ได้แก่

(1) ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา เป็นข้อมูลองค์ประกอบของระบบการก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาซึ่งจะนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ให้มีความถูกต้องและมีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับระบบจริงมากที่สุด

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยข้อมูลอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากบันทึกการทำงานของ TBM ข้อมูลอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ต่อผลัดเพื่อใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์จากรายงานการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์และบันทึกอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ และสุดท้ายได้แก่ ข้อมูลเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์จากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยข้อมูลแผนการจัดสรรทรัพยากรที่ใช้ในแต่ละช่วงการก่อสร้างอุโมงค์ ข้อมูลระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ กฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์ และข้อมูลขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive

(4) ข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา มี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การนำดินไปทิ้ง การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB ซึ่งมี 2 ท่าน แต่ละท่านมีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ 4 และ 10 ปี ตามลำดับ ทำการสัมภาษณ์เพื่อวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนจากความสามารถของการทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างโดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลจากวิศวกรทั้ง 2 ท่านมีความน่าเชื่อถือเท่ากัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ ประเภท State-Based Simulation Model

แบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network เพื่อใช้ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) อย่างหยาบสำหรับการวิเคราะห์โครงการในขั้นต้นเท่านั้น โดยก่อนที่จะสร้างแบบจำลองนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษาโดยใช้แผนภูมิการไหล (Flow Chart) ก่อน หลังจากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ที่ได้จากแผนภูมิการไหล ข้อมูลโครงการ และพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameter) ระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษามาสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network เพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตรวจสอบความถูกต้องตามหลักตรรกะของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ และนำโปรแกรม ProbSched ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมของโปรแกรม Stroboscope มาใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network หลังจากนั้นจึงนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวไปประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการพัฒนาอย่างละเอียดได้อธิบายในบทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

6.1 การใช้แผนภูมิการไหลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา

การใช้แผนภูมิการไหลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษาก่อนที่จะทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ โดยทำการวิเคราะห์กระบวนการก่อสร้างหลักของงานอุโมงค์ 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ กระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) และกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง นอกจากนี้ยังได้ใช้แผนภูมิการไหลวิเคราะห์กระบวนการติดตั้งระบบสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งจะเริ่มดำเนินการก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

6.1.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์

โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ในส่วนของการก่อสร้างอุโมงค์สามารถแบ่งช่วงโครงการได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง Initial Drive ซึ่งเป็นช่วงเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ 173.078 เมตรแรก และการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

- **ช่วง** Initial Drive

ช่วงเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ Initial Drive 173.078 เมตรแรกจากต้นอุโมงค์ เมื่อก่อสร้างปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยจะเริ่มกระบวนการติดตั้งระบบสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์แสดงแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6.1 ได้แก่ การติดตั้งอุปกรณ์ระบบขนส่งวัสดุสำหรับงานอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ (Backfill Grouting) การติดตั้งระบบรางสำหรับขบวนรถจักร การติดตั้งระบบระบายอากาศและแสงสว่าง การประกอบและติดตั้ง Tunnel Boring Machine (TBM) ภายในปล่องขนถ่ายดิน การติดตั้ง Reaction Truss และ Temporary Ring และสุดท้ายจะทำการตรวจสอบอุปกรณ์และระบบการทำงานทั้งหมดก่อนเริ่มการก่อสร้างอุโมงค์

หลังจากติดตั้งระบบสำหรับการก่อสร้างอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยก็จะเริ่มกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ แสดงแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6.2 มีรายละเอียดดังนี้

(1) ขบวนรถจักรนำดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Support) ด้านหลัง TBM หลังจากนั้นจึงเคลื่อนไปรอรับดินจากสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor)

(2) TBM เริ่มขุดเจาะอุโมงค์โดย Shield Jack ออกแรงผลัก Temporary Ring ที่ถูกรองรับโดย Reaction Truss เพื่อเคลื่อนตัวไปด้านหน้า ในขณะที่หัวเจาะอุโมงค์ (Cutter Head) ขุดเจาะพร้อมทั้งปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะโดยใช้น้ำหรือน้ำผสมโฟมอินทรีย์ (Organic Foam) หรือเบนโทไนท์

(3) ดินจะถูกส่งผ่านเข้าไปยังห้องพักดิน (Soil Chamber) หลังจากนั้นจึงลำเลียงออกมาโดยใช้สกรูลำเลียงดิน (Screw Conveyor) และขนถ่ายดินต่อไปโดยใช้สายพานลำเลียงดินออกไปใส่ในรถขนถ่ายดิน (Muck Car) ที่รออยู่ด้านหลัง TBM

(4) เมื่อขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะที่กำหนด TBM จะหยุดขุดเจาะ สกรูลำเลียงดินและสายพานลำเลียงดินจะหยุดรับดิน

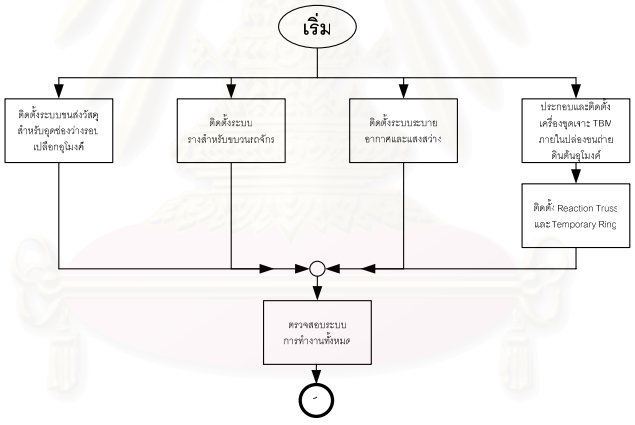
(5) เริ่มกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ซึ่งมี 2 ขั้นตอน ได้แก่ การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์โดยใช้เครื่องติดตั้งที่เรียกว่า Segment Erector และการตรวจสอบหลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

(6) ขบวนรถจักรออกจากหน้าอุโมงค์ไปยังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์เพื่อบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้ง

(7) หลังจากติดตั้งดาดผนังอุโมงค์เสร็จเรียบร้อย คนงานที่ประจำอยู่ด้านหลัง TBM ทำการต่อรางสำหรับขบวนรถจักรเมื่อมีระยะเพียงพอในการต่อราง

(8) งานก่อสร้างอุโมงค์จะดำเนินการอย่างต่อเนื่องเป็นวงรอบ ได้แก่ TBM ขุดเจาะอุโมงค์โดยใช้หัวเจาะอุโมงค์พร้อมทั้งดันตัวไปด้านหน้าด้วยการยึด Shield Jack ถีบ Temporary Ring และปรับสภาพดินหน้าหัวเจาะ และในขณะที่กำลังขุดเจาะจะทำการอุดช่องว่างรอบดาดผนังอุโมงค์ไปด้วย โดยจะเริ่มเมื่อติดตั้งดาดผนังอุโมงค์วงรอบที่สองเสร็จเรียบร้อยและกำลังเริ่มขุดเจาะวงรอบที่สาม หลังจากนั้นจึงเริ่มกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ และทำการต่อรางสำหรับขบวนรถจักรเมื่อมีระยะช่องว่างด้านหลัง TBM เพียงพอในการต่อราง ตามลำดับ

(9) หลังจากที่ขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะ 173.078 เมตร TBM จะหยุดขุดเจาะชั่วคราวเพื่อถอด Reaction Truss และ Temporary Ring พร้อมทั้งติดตั้งตู้ Backup System

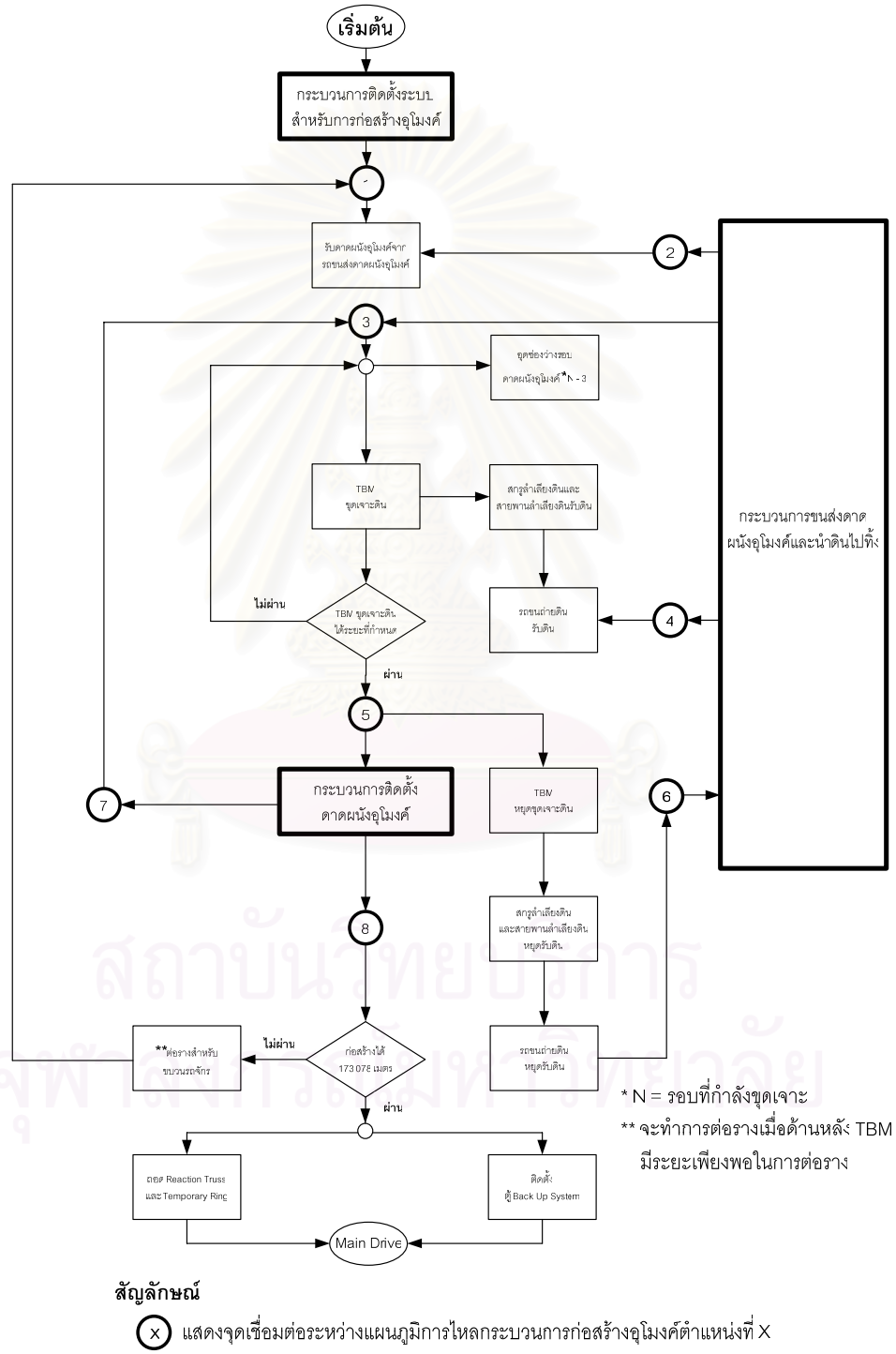


รูปที่ 6.1 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งระบบสำหรับงานก่อสร้างอุโมงค์

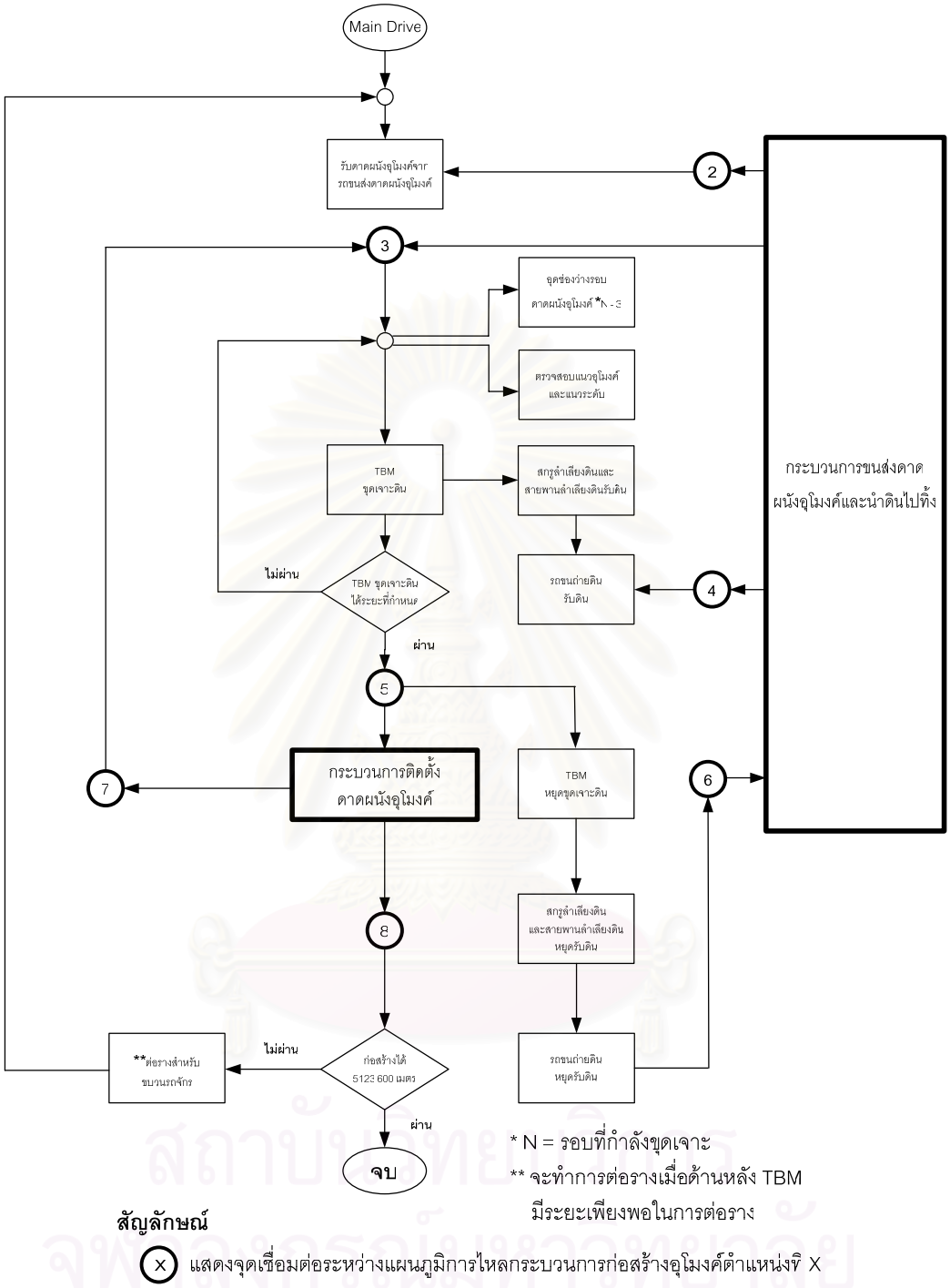
- **ช่วง Main Drive**

งานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตร จากต้นอุโมงค์ แสดงแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6.3 จะมีการดำเนินงานอย่างต่อเนื่องเป็นวงรอบเช่นเดียวกับช่วง Initial Drive แต่จะมีการเพิ่มขั้นตอนการตรวจสอบแนวอุโมงค์และแนวระดับในระหว่างที่ TBM กำลังขุดเจาะอุโมงค์ในแต่ละรอบ และจะมีการเพิ่มขบวนรถจักรและติดตั้งรางพักลักษณะเป็นรางคู่ตามตำแหน่งก่อสร้างที่กำหนดไว้ ซึ่งมีทั้งชนิดที่เคลื่อนย้ายไม่ได้ที่เรียกว่า

Double Rail (DRail) และชนิดเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Movable Type Double Rail (MRail) ทั้ง 2 ชนิดมีความยาวทั้งหมด 132 เมตร สำหรับประโยชน์ของรางพักคือทำให้เวลาสูญเปล่า (Idle Time) ที่ TBM ต้องรอขบวนรถจักรลดน้อยลง



รูปที่ 6.2 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วง Initial Drive



รูปที่ 6.3 แผนภูมิการไหลกระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ช่วง Main Drive

6.1.2 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

กระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ประกอบด้วยขั้นตอนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ให้ครบเป็นวงรอบ และขั้นตอนการตรวจสอบหลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย แสดงแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6.4 มีรายละเอียดดังนี้

- **ขั้นตอนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์** มีขั้นตอนย่อยดังนี้

(1) เตรียมการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

(2) ติดตั้งและยึด Invert Segment Lining ด้วยสลักเกลียว

(3) ติดตั้งและยึด Left และ Right Segment Lining ด้วยสลักเกลียว

(4) ติดตั้งและยึด Crown Segment Lining ด้วยสลักเกลียว

(5) ติดตั้งและยึด Key Segment Lining ด้วยสลักเกลียว

- **ขั้นตอนการตรวจสอบหลังติดตั้ง** ขั้นตอนนี้จะทำการตรวจสอบช่องว่างระหว่างดาดผนังอุโมงค์ที่เพิ่งประกอบเสร็จและยังอยู่ภายใน TBM กับผนังด้านในของ TBM ทั้ง 4 ด้านเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับมุมของ TBM ในการขุดเจาะอุโมงค์รอบต่อไป ต่อมาจะทำการตรวจสอบรอยร้าวของดาดผนังอุโมงค์ และตรวจสอบสลักเกลียวที่ยึดดาดผนังอุโมงค์แต่ละชิ้น

6.1.3 แผนภูมิการไหลกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง

กระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้งแสดงแผนภูมิการไหลในรูปที่ 6.5 มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

(1) ขบวนรถจักรเดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ไปยังหน้าอุโมงค์

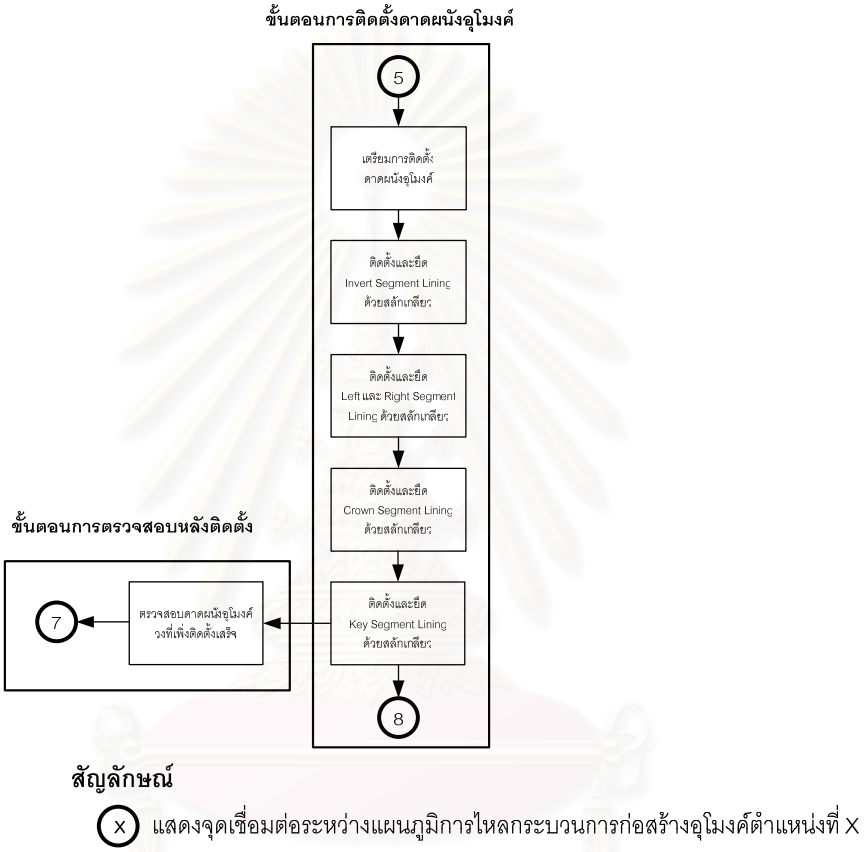
(2) เมื่อขบวนรถจักรไปถึงหน้าอุโมงค์จะเคลื่อนไปด้านหลัง TBM เพื่อนำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์เพื่อรอติดตั้งต่อไป

(3) หลังจากนำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้เสร็จเรียบร้อย ขบวนรถจักรจะเคลื่อนออกไปรับดินโดยให้รถขนถ่ายดินคันแรกซึ่งอยู่ติดกับหัวรถจักรไปอยู่ใต้สายพานลำเลียงดินเพื่อรอรับดิน

(4) เมื่อ TBM ขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะที่กำหนด ขบวนรถจักรที่รับดินจะเดินทางออกจากหน้าอุโมงค์ไปยังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์เพื่อบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้ง

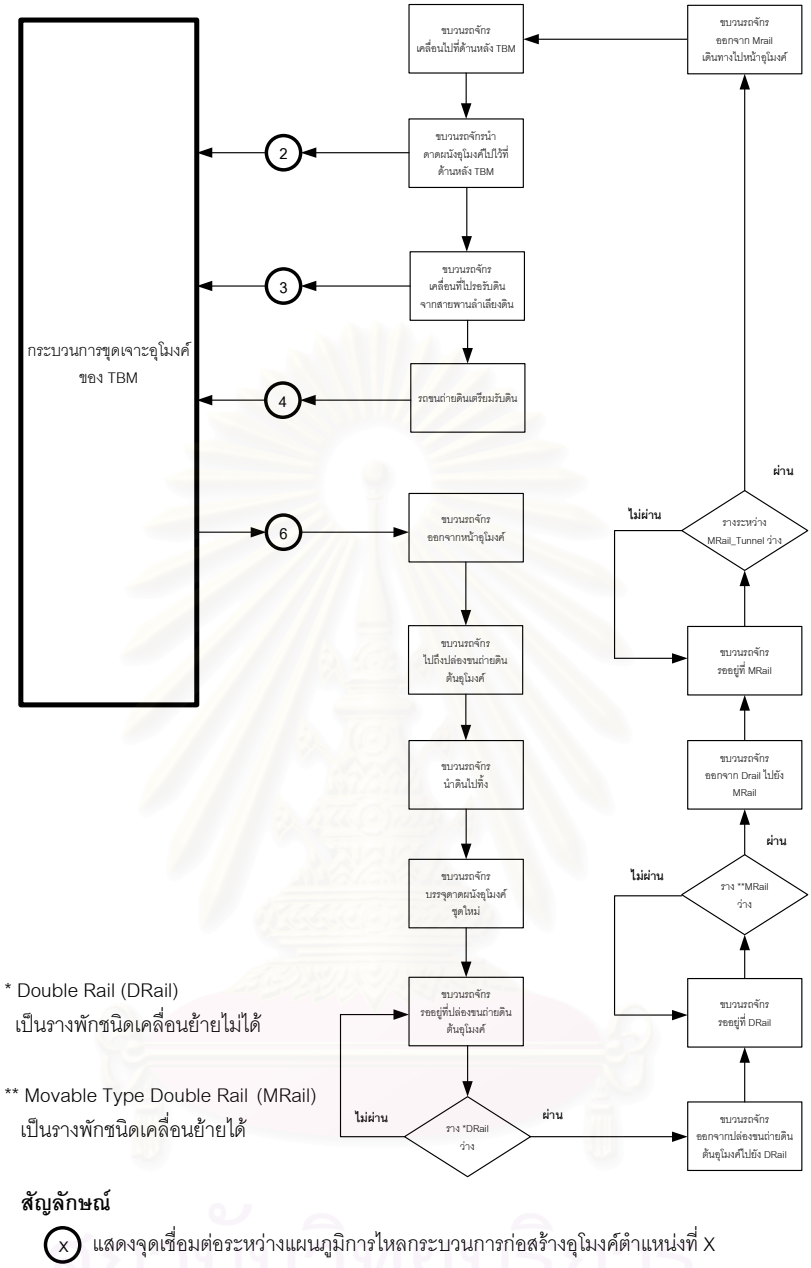
(5) ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์จะมีรางคู่ 2 ราง รางที่ 1 เป็นรางสำหรับให้ขบวนรถจักรเตรียมเดินทางไปยังหน้าอุโมงค์ ในขณะที่รางที่ 2 เป็นรางให้ขบวนรถจักรจากหน้าอุโมงค์เดินทางกลับมา สำหรับการเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรจากรางหนึ่งไปยังอีกรางหนึ่งจะใช้เครื่องเคลื่อนย้ายดาดผนังอุโมงค์ (Car Shifter) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กเลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าเป็นตัวเคลื่อนย้าย

โดยจะทำงานร่วมกับ Gantry Crane และหัวรถจักรที่ทำงานอยู่ในปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ โดยจะใช้ในขั้นตอนการบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้ง หลังจากที่ขบวนรถจักรบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่และนำดินไปทิ้งเสร็จเรียบร้อยแล้วจะรอจนกระทั่งรางและรางพักที่ใช้สำหรับเดินทางไปหน้าอุโมงค์ว่างจึงเดินทางออกไปรับดินและส่งดาดผนังอุโมงค์ให้ TBM ต่อไป



รูปที่ 6.4 แผนภูมิการไหลกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.5 แผนภูมิการไหลกระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง

6.2 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ในขั้นแรกจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแผนภูมิการไหลข้อมูลโครงการ และพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษาที่ประเมินค่าโดยใช้ฐานนิยม (Mode) มาสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบ

ผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network เพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตรวจสอบความถูกต้องตามหลักตรรกะของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ หลังจากนั้นจึงใช้โปรแกรม ProbSched ทำการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ซึ่งเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ใช้ความรู้ด้าน CPM และเทคนิคการจำลองสถานการณ์ Monte Carlo Simulation ก็สามารถพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ประเภทนี้ได้ โดยสร้างในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network ที่มีรายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตำแหน่งก่อสร้างเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้น สำหรับคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม ProbSched นั้นจะเป็นคำสั่งรูปแบบเดียวกับที่ใช้ในโปรแกรม Stroboscope โดยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะใช้ในการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์อย่างหยาบด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic เพื่อทำการวิเคราะห์ในขั้นต้นเท่านั้น สำหรับพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic นั้นจะใช้พารามิเตอร์นำเข้าที่ประเมินค่าโดยใช้ฐานนิยมเช่นเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้น ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic นั้นจะใช้พารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลร่วมกับการใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) ทำการประเมินค่าดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องนั้นจะทำการสอบถามความคิดเห็นของวิศวกรที่มีประสบการณ์และมีความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์ประเภทดังกล่าว

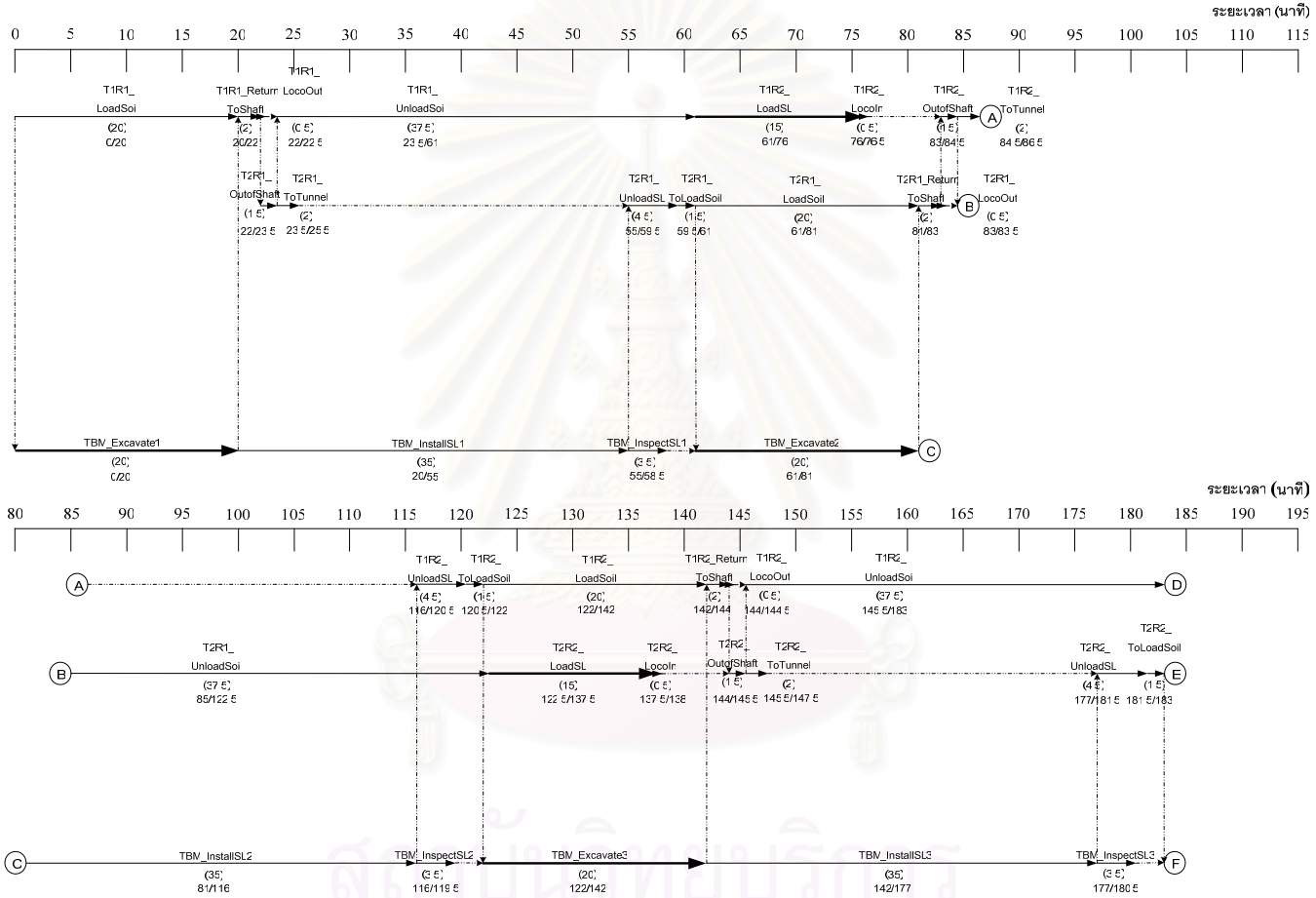
การใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model วิเคราะห์โครงการกรณีศึกษานั้นจะทำการจำลองสถานการณ์ตามแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในช่วง Main Drive ของโครงการ ณ ตำแหน่งก่อสร้างเดียวกับที่โครงการกรณีศึกษาได้ทำการวิเคราะห์เพื่อจัดสรรทรัพยากร ได้แก่ จำนวนขบวนรถจักร จำนวนและตำแหน่งของรางพัก ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.2.3 ข้อมูลแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา ตัวอย่างการวิเคราะห์เช่น แบบจำลองที่ 1 จะทำการวิเคราะห์ที่ต้นแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1 ของโครงการกรณีศึกษา ตำแหน่งก่อสร้าง 173.078 เมตรจากต้นอุโมงค์ ในขณะที่แบบจำลองที่ 2 จะวิเคราะห์ที่ปลายแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1 ของโครงการกรณีศึกษา ตำแหน่งก่อสร้าง 1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์ เป็นต้น โดยได้แสดงรายละเอียดของแบบจำลอง

ทั้งหมดไว้ในตารางที่ 6.1 และแสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network และแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network วิเคราะห์ ณ ตำแหน่งก่อสร้าง 173.078 เมตรจากต้นอุโมงค์ในรูปที่ 6.6 และ 6.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

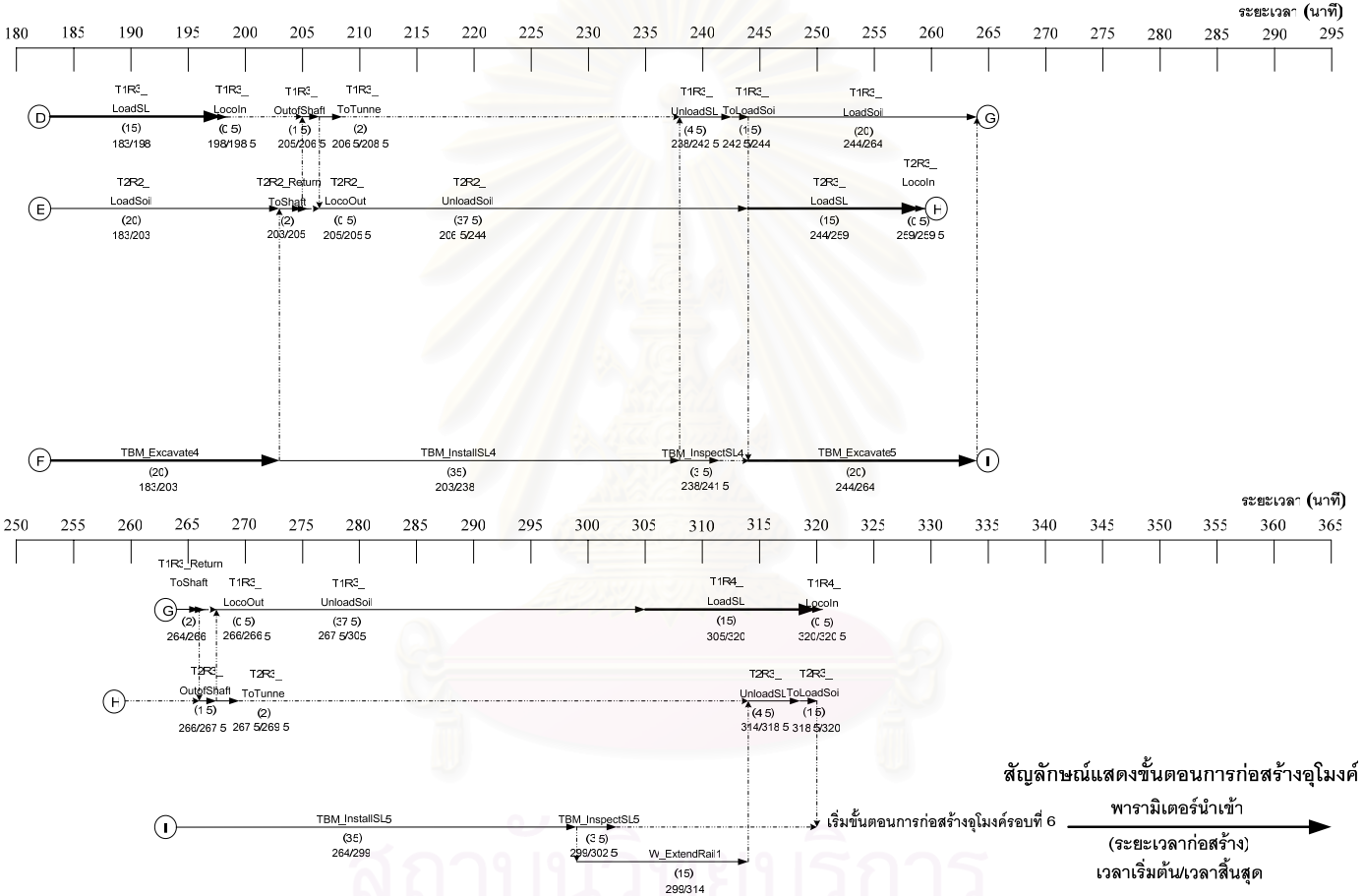
แผนงานช่วง Main Drive	แบบจำลอง	ตำแหน่งก่อสร้าง (เมตร)	จำนวนขบวนรถจักร	รายละเอียดรางพัก
1	1	173.078	2	รางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์
2	2	1,000	2	รางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์
3	3	2,100	3	รางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ และรางพัก DRail ที่ 850 เมตรจากต้นอุโมงค์
4	4	4,500	4	รางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ และรางพัก DRail ที่ 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ และรางพัก MRail ที่ 1,900 เมตรจากต้นอุโมงค์
	5	5,123.600		รางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ และรางพัก DRail ที่ 2,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ และรางพัก MRail ที่ 4,300 เมตรจากต้นอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



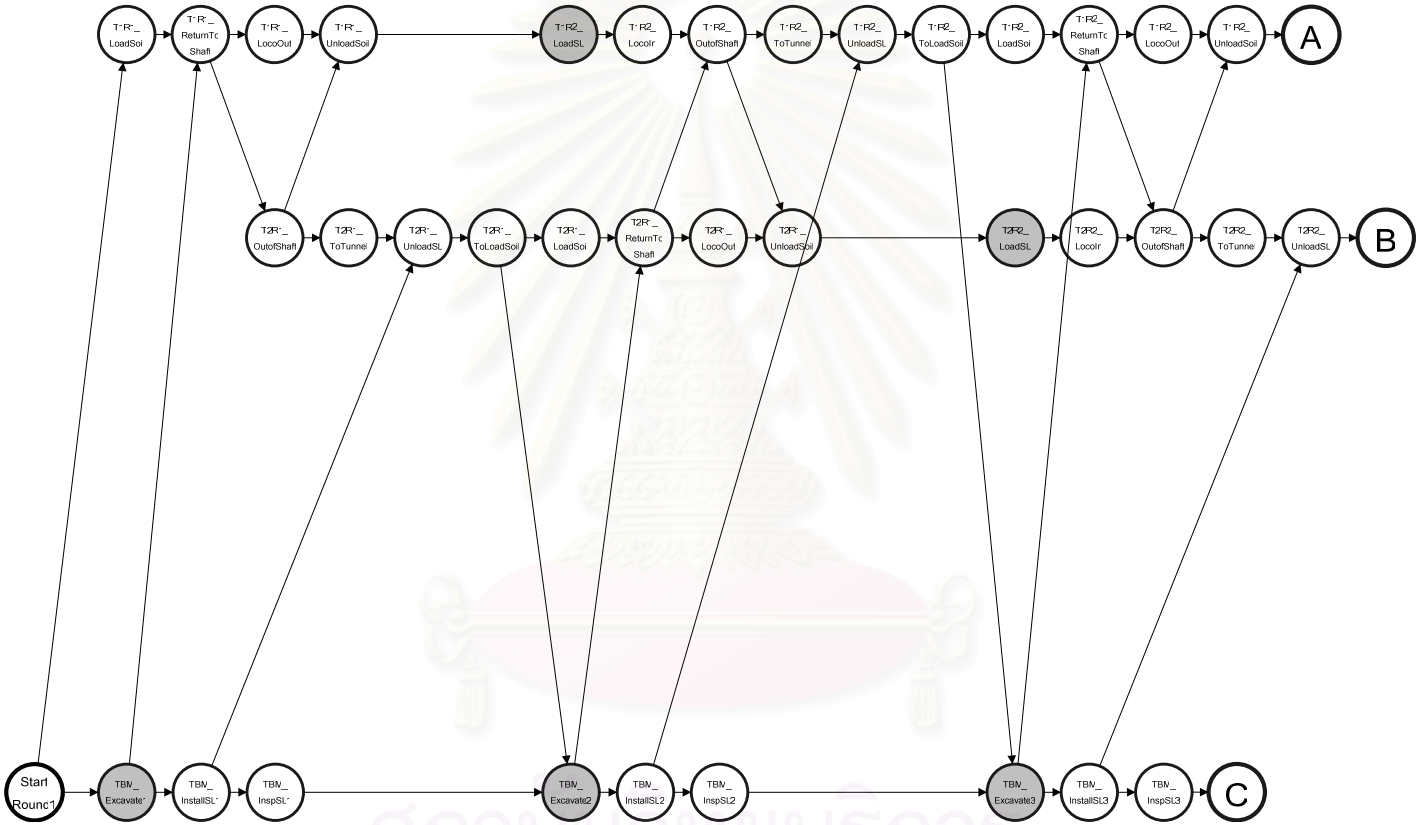
รูปที่ 6.6 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



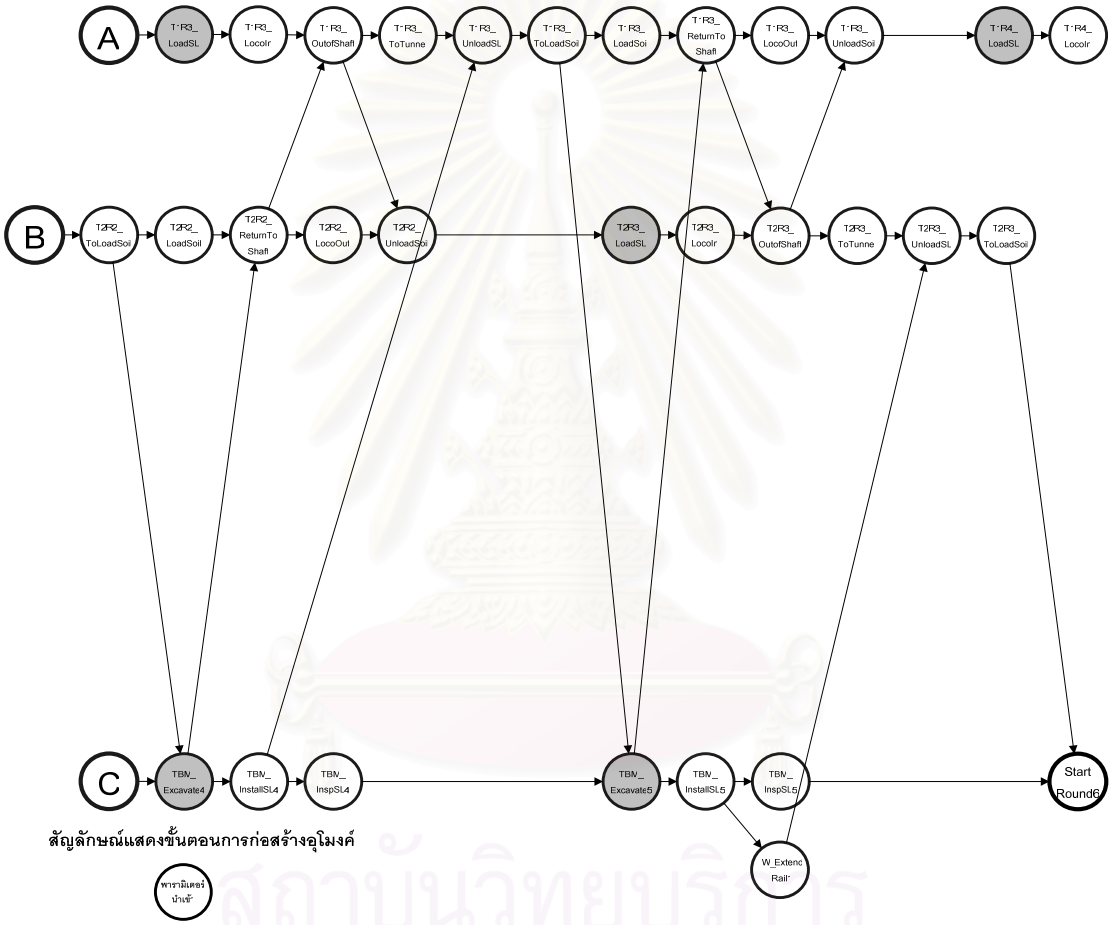
รูปที่ 6.6 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 1 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.7 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.7 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 1 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 6.6 และ 6.7 แบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมาจะทำการก่อสร้างอุโมงค์ทั้งหมด 5 รอบเพื่อให้ครอบคลุมถึงขั้นตอนการต่อรางสำหรับขบวนรถจักร โดยขั้นตอนนี้จะทำงานได้เมื่อระยะช่องว่างด้านหลัง TBM มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6 เมตร สำหรับวงรอบการทำงานของแบบจำลองจะประกอบด้วยวงรอบหลัก 3 วงรอบ ได้แก่

(1) วงรอบการทำงานของ TBM ได้แก่ กระบวนการขุดเจาะอุโมงค์และกระบวนการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์

(2) วงรอบการทำงานของขบวนรถจักร ได้แก่ กระบวนการขนส่งดาดผนังอุโมงค์และนำดินไปทิ้ง

(3) วงรอบการทำงานของคนงานด้านหลัง TBM ได้แก่ ขั้นตอนการติดตั้งรางสำหรับขบวนรถจักร

รายละเอียดของพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ข ประกอบด้วย ความหมายของพารามิเตอร์นำเข้า ค่าของพารามิเตอร์นำเข้า และสมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ และได้แสดงผังโครงข่ายของแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวของโครงการกรณีศึกษาที่วิเคราะห์ ณ ตำแหน่งก่อสร้างต่างๆ ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 6.1 ไว้ในภาคผนวก ค

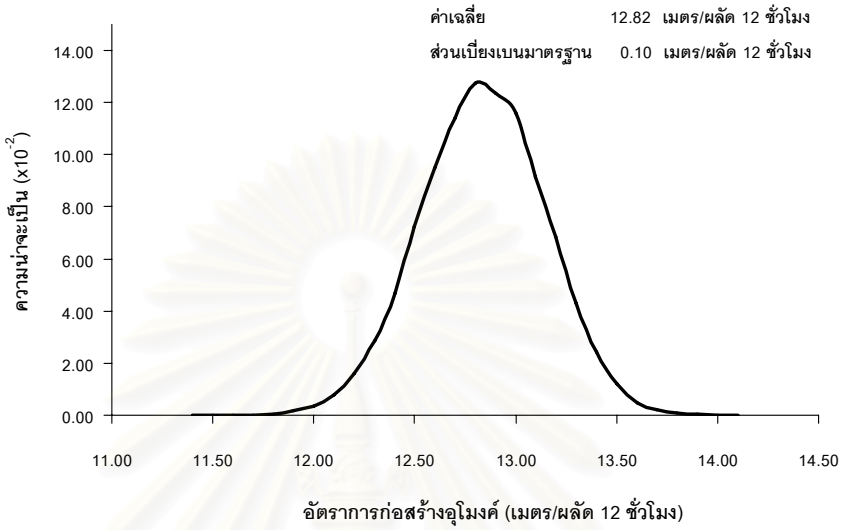
6.2.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1

แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1 ตำแหน่งก่อสร้าง 173.078-1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 2 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองที่ 1 จำลองสถานการณ์ที่ต้นแผนงานก่อสร้าง และใช้แบบจำลองที่ 2 จำลองสถานการณ์ที่ปลายแผนงานก่อสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

- **แบบจำลองที่ 1 การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตรจากต้นอุโมงค์**

ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 13.57 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แสดงในรูปที่ 6.8 มีค่าเท่ากับ 12.82 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.10 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง

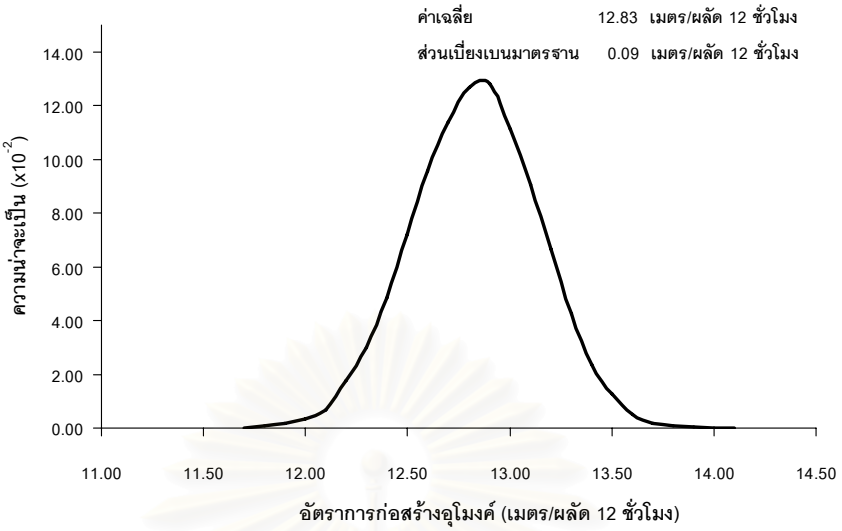


รูปที่ 6.8 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองที่ 1 ด้วยวิธี Probabilistic

เนื่องจากตำแหน่งการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้ต้นอุโมงค์ ทำให้ระยะทางระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ไม่มีผลต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ และจากการที่จำนวนขบวนรถจักรที่ใช้มีเพียงพอจึงทำให้ TBM ไม่ต้องเสียเวลารอคอยขบวนรถจักร ดังนั้นอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 จึงเกิดจากประสิทธิภาพของ TBM และระบบสนับสนุนการทำงานที่หน้าอุโมงค์เท่านั้น เนื่องจากไม่มีเวลาสูญเปล่า (Idle Time) จากการรอคอยของ TBM เกิดขึ้น โดยค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 ทั้งวิธี Deterministic และ Probabilistic จะถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงต่างๆ ต่อไป

- **แบบจำลองที่ 2 การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์**

ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองที่ 2 มีค่าเท่ากับ 13.57 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แสดงในรูปที่ 6.9 มีค่าเท่ากับ 12.83 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.09 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง



รูปที่ 6.9 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 2 ด้วยวิธี Probabilistic

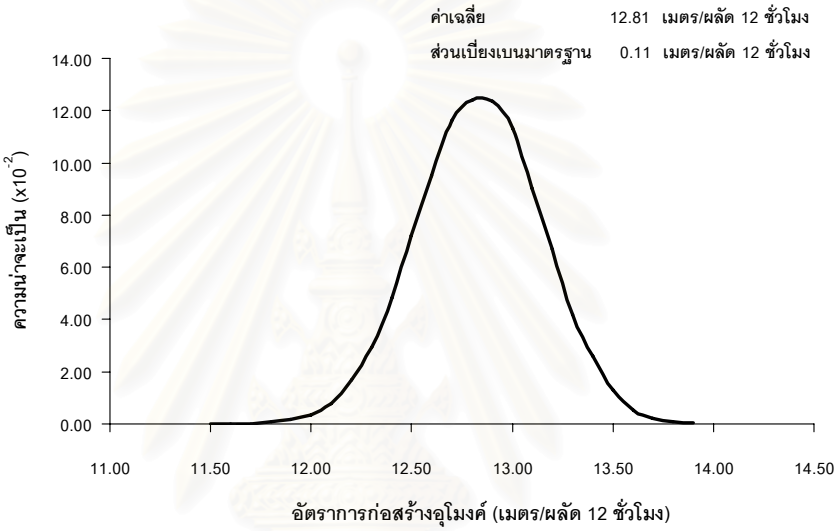
เมื่อพิจารณาค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1 ตำแหน่งก่อสร้าง 173.078 เมตร ถึง 1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองที่ 1 และ 2 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าเท่ากับ 13.57 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง เท่ากับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 ซึ่งเป็นอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่เกิดจากประสิทธิภาพของ TBM และระบบสนับสนุนการทำงานที่หน้าอุโมงค์เท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic มีค่าเท่ากับ 12.83 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ซึ่งใกล้เคียงกับค่าประมาณจากแบบจำลองที่ 1 แสดงว่าการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 1 ขบวนรถจักรที่ใช้ 2 ขบวนมีจำนวนเพียงพอต่อความต้องการทำให้ไม่มีเวลาสูญเปล่าเนื่องจากการรอคอยขบวนรถจักรของ TBM เกิดขึ้น

6.2.2 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 2

แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 2 ตำแหน่งก่อสร้าง 1,000-2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 3 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ และรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองที่ 2 จำลองสถานการณ์ที่ต้นแผนงานก่อสร้าง และใช้แบบจำลองที่ 3 จำลองสถานการณ์ที่ปลายแผนงานก่อสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

- **แบบจำลองที่ 3 การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์**

ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองที่ 3 มีค่าเท่ากับ 13.57 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แสดงในรูปที่ 6.10 มีค่าเท่ากับ 12.81 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.11 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง



รูปที่ 6.10 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 3 ด้วยวิธี Probabilistic

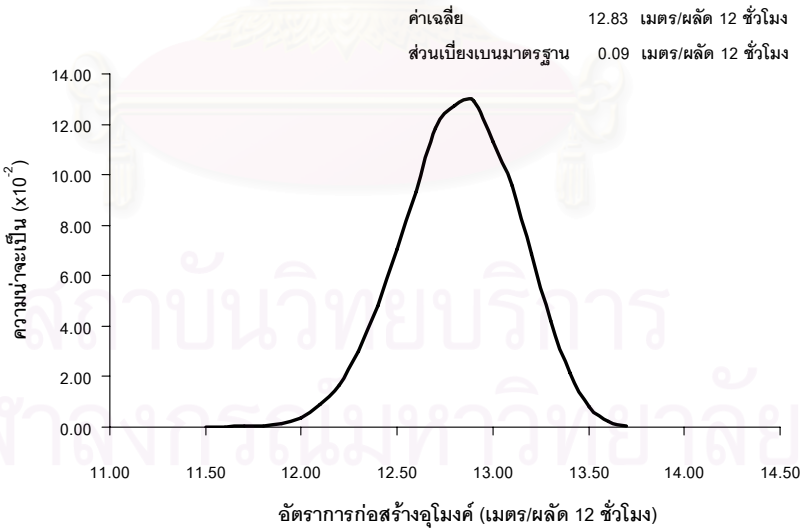
เมื่อพิจารณาค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 2 ตำแหน่งก่อสร้าง 1,000 เมตร ถึง 2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองที่ 2 และ 3 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าเท่ากับ 13.57 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง เท่ากับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic มีค่าเท่ากับ 12.82 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง เท่ากับค่าประมาณจากแบบจำลองที่ 1 เช่นเดียวกัน แสดงว่าการก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 2 จำนวนขบวนรถจักรที่ใช้ 3 ขบวนและการติดตั้งรางพักที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ทำให้โครงการกรณีศึกษาสามารถดำเนินการก่อสร้างได้โดยไม่เกิดเวลาสูญเปล่าเนื่องจากการรอคอยขบวนรถจักรของ TBM เช่นเดียวกับแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในช่วงที่ 1

6.2.3 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 3

แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 3 ที่ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100-4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 4 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ รางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์ และรางพัก MRail ที่ตำแหน่ง 1,900 เมตรจากต้นอุโมงค์ สำหรับรางพัก MRail นั้นตามแผนงานโครงการจะทำการเคลื่อนย้ายทุก 2 สัปดาห์ให้ห่างจากด้านหลัง TBM ประมาณ 200 เมตร แต่เนื่องจากแบบจำลองสถานการณ์ประเภท State-Based Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมาเป็นแบบจำลองอย่างง่ายจึงไม่สามารถทำการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของรางพัก MRail ได้ ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ที่ปลายแผนงานได้แก่ แบบจำลองที่ 4 จะกำหนดให้รางพัก MRail อยู่ที่ตำแหน่งเดิมโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายคือ 1,900 เมตรจากต้นอุโมงค์ มีรายละเอียดดังนี้

- **แบบจำลองที่ 4 การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์**

ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองที่ 4 มีค่าเท่ากับ 13.42 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แสดงในรูปที่ 6.11 มีค่าเท่ากับ 12.83 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.09 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง



รูปที่ 6.11 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 4 ด้วยวิธี Probabilistic

เมื่อพิจารณาค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 3 ตำแหน่งก่อสร้าง 2,100 เมตร ถึง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่ได้จากค่าเฉลี่ยการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองที่ 3 และ 4 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าเท่ากับ 13.50 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ซึ่งน้อยกว่าค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 1 และเมื่อพิจารณาแบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 4 แสดงในภาคผนวก ค รูปที่ ค.8 พบว่าการก่อสร้างอุโมงค์มีเวลาสูญเปล่าเนื่องจากการรอคอยขบวนรถจักรของ TBM เกิดขึ้น เนื่องจากรางพัก DRail อยู่ห่างจากรางพัก MRail มากเกินไป ทำให้ขบวนรถจักรจากหน้าอุโมงค์ที่นำดินไปทิ้งต้องหยุดรอขบวนรถจักรสำหรับการทำงานรอบต่อไปเดินทางมาถึงรางพัก MRail ก่อนจึงจะเดินทางต่อไปได้ โดยเวลาที่ขบวนรถจักรจากหน้าอุโมงค์ใช้ในการหยุดรออยู่ที่รางพัก MRail จะไปเพิ่มระยะเวลารอคอยของขบวนรถจักรขบวนที่อยู่ในรางพัก DRail ให้ต้องรอขบวนรถจักรจากหน้าอุโมงค์ขบวนดังกล่าวนานมากขึ้นซึ่งจะส่งผลกระทบต่อขบวนรถจักรที่อยู่หน้าอุโมงค์ขบวนต่อไปให้ต้องหยุดรออยู่ที่รางพัก MRail นานมากขึ้นเช่นกัน โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อเนื่องกันจนกระทั่งขบวนรถจักรไม่สามารถเดินทางไปรอ TBM ที่หน้าอุโมงค์ได้ทันเวลาจึงเกิดเวลาสูญเปล่าจากการรอคอยขบวนรถจักรของ TBM ทำให้อัตราการก่อสร้างอุโมงค์มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic พบว่าค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 3 มีค่าเท่ากับค่าประมาณจากแบบจำลองที่ 1 คือ 12.82 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าประมาณที่เกิดจากประสิทธิภาพของ TBM และระบบสนับสนุนการทำงานที่หน้าอุโมงค์เท่านั้น ไม่มีเวลาสูญเปล่าจากการที่ TBM ต้องรอคอยขบวนรถจักรเกิดขึ้น แสดงว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic ระยะเวลาที่ใช้สำหรับขั้นตอนการทำงานของ TBM และระบบสนับสนุนการทำงานที่หน้าอุโมงค์มีเพียงพอที่ทำให้ขบวนรถจักรสำหรับการทำงานรอบต่อไปมาหยุดรออยู่ที่รางพัก MRail ได้ทันเวลา ดังนั้นเมื่อ TBM ขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะที่กำหนด ขบวนรถจักรที่ทำงานในรอบนั้นจึงสามารถเดินทางไปยังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ได้โดยไม่ต้องหยุดรออยู่ที่รางพัก MRail ทำให้ไม่เกิดปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น

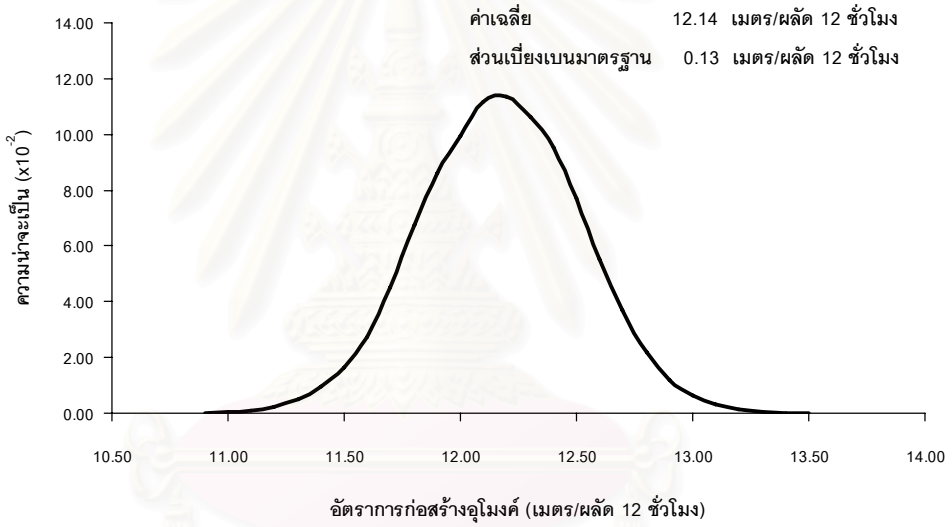
6.2.4 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 4

แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 4 ตำแหน่งก่อสร้าง 4,500-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ ใช้ขบวนรถจักร 4 ขบวน มีหัวรถจักรทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ 1 คัน มีรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์ รางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 2,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ และรางพัก MRail ที่ตำแหน่ง 4,300 เมตรจากต้นอุโมงค์ ทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองที่ 4 จำลองสถานการณ์ที่ต้น

แผนงานก่อสร้าง และใช้แบบจำลองที่ 5 จำลองสถานการณ์ที่ปลายแผนงานก่อสร้าง มีรายละเอียดดังนี้

- **แบบจำลองที่ 5 การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์**

ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองที่ 5 มีค่าเท่ากับ 12.80 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic โดยทำซ้ำ 10,000 รอบ จำนวน 5 ครั้ง แสดงในรูปที่ 6.12 มีค่าเท่ากับ 12.14 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.13 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง



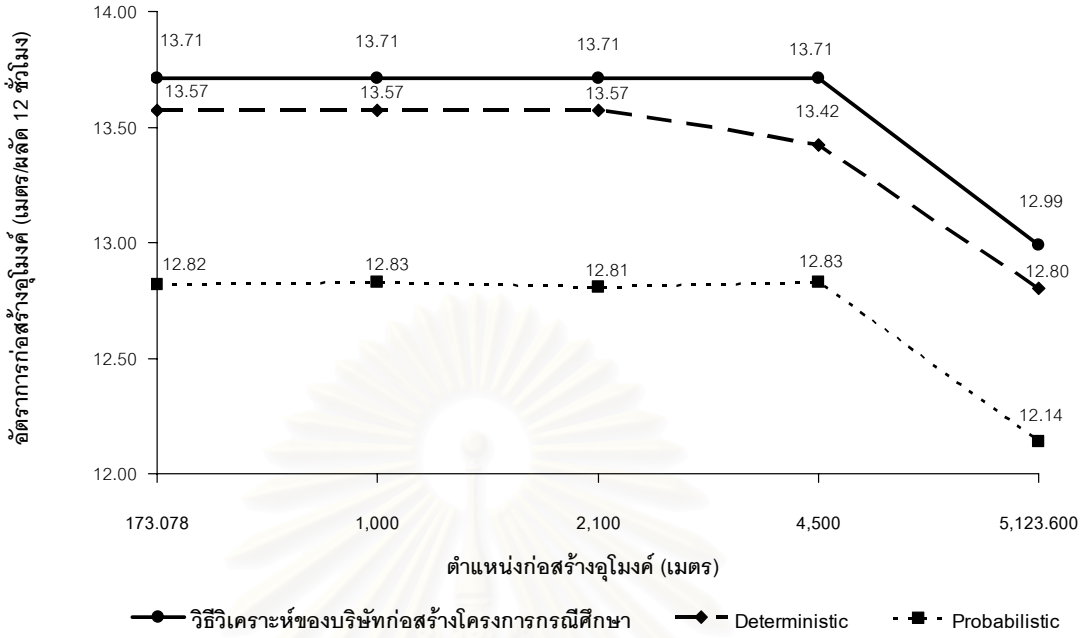
รูปที่ 6.12 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแบบจำลองที่ 5 ด้วยวิธี Probabilistic

เมื่อพิจารณาค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วงที่ 4 ตำแหน่งก่อสร้าง 4,500 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองที่ 4 และ 5 พบว่ามีค่าลดลงจากแผนงานก่อสร้างช่วงอื่นๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าเท่ากับ 13.11 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และวิธี Probabilistic มีค่าเท่ากับ 12.49 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง สำหรับสาเหตุที่อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานก่อสร้างช่วงที่ 4 มีค่าลดลงเนื่องจากชั้นดินที่ขุดเจาะในแผนงานช่วงที่ 4 ได้แก่

Silty Clay ขุดเจาะได้ยากกว่าช่วงอื่นๆ ทำให้อัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ลดลง ส่งผลให้ผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ของแผนงานช่วงที่ 4 ลดลงด้วยเช่นกัน

6.2.5 สรุปผลการวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

การใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model วิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ ณ ตำแหน่งต่างๆ เพื่อประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 6.13 พบว่าค่าประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าสูงกว่าค่าประมาณที่ได้จากวิธี Probabilistic ทุกตำแหน่งการก่อสร้างอุโมงค์ ทั้งนี้เนื่องจากวิธี Probabilistic ได้นำเอาค่าความไม่แน่นอนในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วย จึงทำให้ได้ค่าประมาณที่ต่ำกว่าวิธี Deterministic ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยมีสมมติฐานว่าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมีความแน่นอน และเมื่อนำค่าประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา มาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic เช่นเดียวกับวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา พบว่าวิธีวิเคราะห์ของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาให้ค่าประมาณสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จากแบบจำลองสถานการณ์ประเภทดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากวิธี Deterministic ของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาเป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์บางขั้นตอนมาวิเคราะห์เท่านั้น ทำให้กระบวนการก่อสร้างที่นำมาวิเคราะห์มีข้อจำกัดน้อยกว่า ดังนั้นจึงได้ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่มีค่าสูงกว่าค่าประมาณจากวิธี Deterministic ของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่มีรายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์มากกว่าและมีกระบวนการก่อสร้างใกล้เคียงกับการก่อสร้างอุโมงค์จริงมากกว่าเช่นกัน



รูปที่ 6.13 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาและจากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

6.3 สรุปท้ายบท

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาที่พัฒนาขึ้นมานั้นเป็นแบบจำลองอย่างง่ายในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network เพื่อใช้ประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับการวิเคราะห์โครงการในขั้นต้นด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic เท่านั้น โดยทำการจำลองสถานการณ์ ณ ตำแหน่งก่อสร้างเดียวกับแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ในช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา สำหรับผลที่ได้จากการเปรียบเทียบการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ระหว่างวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษากับแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model พบว่าค่าประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาให้ค่าประมาณสูงกว่าแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ทุกตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ และเมื่อพิจารณาวิธีวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าว ได้แก่ วิธี Deterministic และ Probabilistic พบว่าวิธี Deterministic ให้ค่าประมาณสูงกว่าวิธี Probabilistic ทุกตำแหน่ง

ก่อสร้างอุโมงค์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากวิธี Probabilistic ได้นำเอาค่าความไม่แน่นอนในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วย

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model สามารถวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของกระบวนการก่อสร้างได้ดีกว่าวิธี Deterministic ทั่วไปและเป็นแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างได้ง่าย ใช้ความรู้ด้าน CPM และเทคนิคการจำลองสถานการณ์ Monte Carlo Simulation ก็สามารถพัฒนาขึ้นมาได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของแบบจำลองสถานการณ์ประเภทนี้คือมีความยืดหยุ่นต่ำ ทำให้ต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาหลายแบบจำลองเพื่อใช้อธิบายกระบวนการก่อสร้างหนึ่งๆ นอกจากนี้ผู้พัฒนายังต้องออกแบบโดยคำนึงถึงสถานะของระบบและจัดสรรทรัพยากรที่ใช้ในระบบ ณ ขณะนั้นด้วยตัวเอง เนื่องจากความสัมพันธ์ของโครงการก่อสร้างที่มีทั้งความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งสามารถทราบความสัมพันธ์และกำหนดล่วงหน้าได้ และความสัมพันธ์ที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรร่วมกัน ได้แก่ การเดินทางภายในอุโมงค์ของขบวนรถจักรที่ต้องใช้รางและรางพักร่วมกัน ทำให้มีการแย่งชิงรางและรางพักเกิดขึ้น โดยขั้นตอนดังกล่าวไม่สามารถกำหนดความสัมพันธ์ล่วงหน้าได้ จึงต้องสร้างแบบจำลอง ณ ตำแหน่งก่อสร้างหลายตำแหน่ง และในแต่ละตำแหน่งจะต้องสร้างวงรอบการทำงานหลายวงรอบเพื่อให้ครอบคลุมทุกความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นงานวิจัยในขั้นต่อไปจะทำการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงกว่าคือ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ ประเภท Discrete-Event Simulation Model

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาในขั้นแรกจะทำการสร้างผังโครงข่ายเพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ประกอบด้วยสัญลักษณ์ของแบบจำลองสถานการณ์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork, Queue และ Link หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลโครงการกรณีศึกษาและพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษาดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 5 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลโครงการกรณีศึกษา มาสร้างชุดคำสั่งโดยใช้โปรแกรม Stroboscope ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มชุดคำสั่งที่มีหน้าที่การทำงานแตกต่างกัน สำหรับขั้นตอนการพัฒนาอย่างละเอียดได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

7.1 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะประกอบด้วยสัญลักษณ์ของแบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork, Queue และ Link โดย Link จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างสัญลักษณ์ที่กล่าวมาข้างต้นและชื่อของ Link จะแทนชื่อย่อของทรัพยากรที่ไหลผ่านจากขั้นตอนการทำงานหนึ่งไปสู่ขั้นตอนถัดไปโดยมีหมายเลขกำกับเพื่อแสดงลำดับการไหลผ่านของทรัพยากรนั้น ได้แก่

(1) Tr	แทน	ขบวนรถจักร
(2) TBM	แทน	Tunnel Boring Machine (TBM)
(3) LC	แทน	หัวรถจักร (Locomotive)
(4) CS	แทน	เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter)
(5) HS	แทน	เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Support) ด้านหลัง TBM
(6) YRail	แทน	รางพักรูปตัว Y (YRail) ที่ปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์
(7) SDRail	แทน	รางระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับรางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่ารางพัก Double Rail (DRail)

(8) DRail แทน รางพัก DRail

(9) DMRail แทน รางระหว่างรางพัก DRail กับรางพักชนิดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่ารางพัก Movable Type Double Rail (MRail)

(10) MRail แทน รางพัก MRail

(11) MTRail แทน รางระหว่างรางพัก MRail กับหน้าอุโมงค์

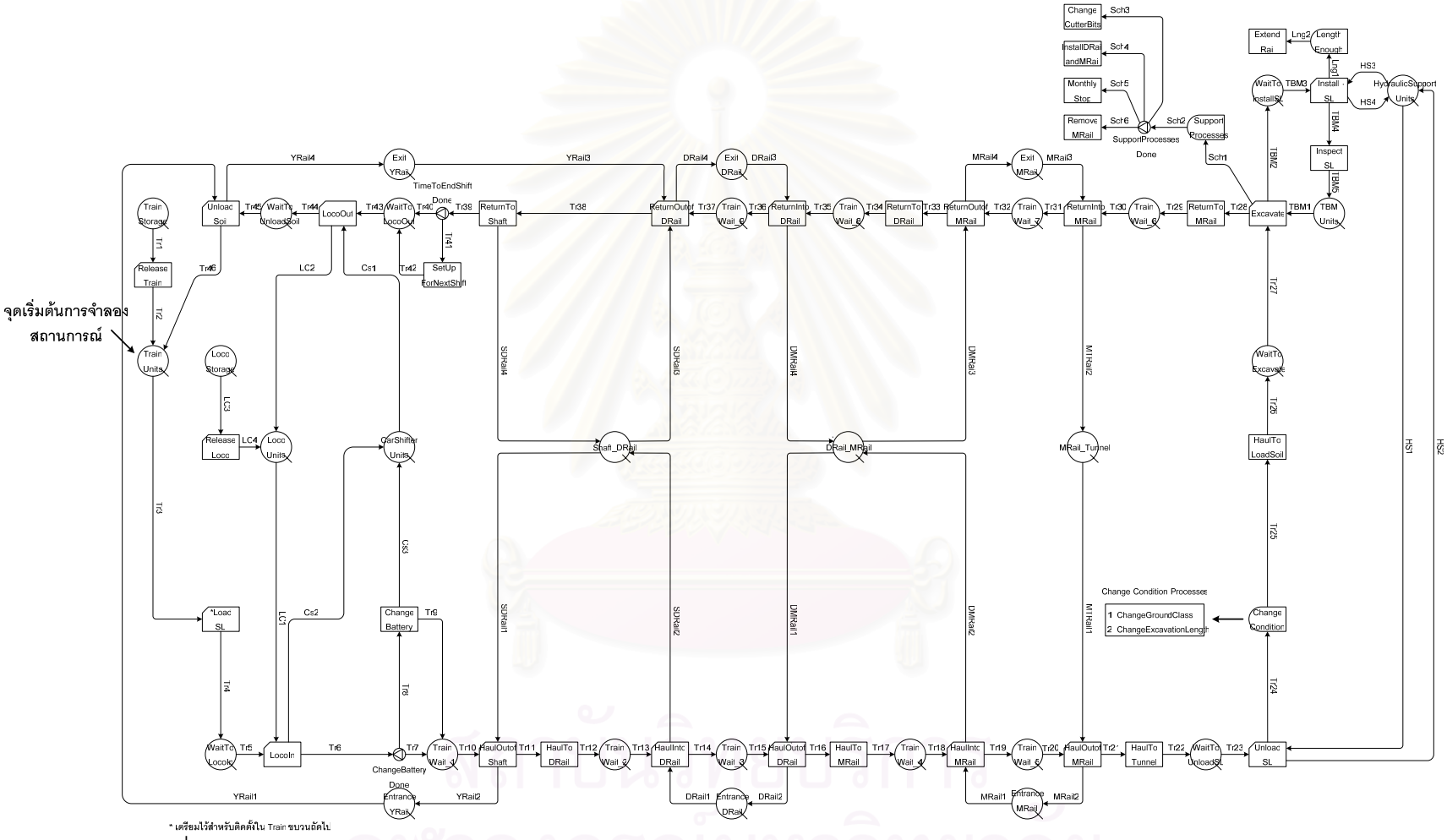
(12) Lng แทน ระยะด้านหลัง TBM ที่ใช้ในการต่อราง

(13) Sch แทน การทำงานขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์

การทำงานของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model แสดงในรูปที่ 7.1 มีขั้นตอนการทำงานโดยสังเขปดังนี้

7.1.1 ขั้นตอนการเดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร

การจำลองสถานการณ์จะเริ่มเมื่อขบวนรถจักรที่อยู่ใน TrainUnits Queue ไหลผ่าน Tr3 Link เข้าสู่ LoadSL Combi เพื่อไปรับดาดผนังอุโมงค์ หลังจากนั้นขบวนรถจักรจะไหลผ่าน Tr4 Link เข้าสู่ WaitToLocoIn Queue เพื่อรอติดตั้งหัวรถจักร โดยจะเริ่มติดตั้งได้เมื่อหัวรถจักรจาก LocoUnits Queue ไหลผ่าน LC1 Link เข้าสู่ LocoIn Combi และขบวนรถจักรจาก WaitToLocoIn Queue ไหลผ่าน Tr5 Link เข้าสู่ LocoIn Combi หลังจากนั้นเมื่อ LocoIn Combi ติดตั้งหัวรถจักรเข้าไปในขบวนรถจักรเสร็จเรียบร้อยก็จะปล่อย CS (Car Shifter) ซึ่งเป็นเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ผ่าน Cs2 Link เข้าสู่ CarShifterUnits Queue และปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr6 Link เข้าสู่ ChangeBatteryDone Fork เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการตัดสินใจว่าหัวรถจักรต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่หรือไม่ โดยเงื่อนไขการเปลี่ยนแบตเตอรี่จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ขบวนรถจักรเดินทางระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ หากระยะทางที่เดินทางไปกลับระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์มากกว่าหรือเท่ากับ 15,000 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษายอมให้ขบวนรถจักรวิ่งต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ 1 ครั้ง หากต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ขบวนรถจักรจะไหลผ่าน Tr8 Link เข้าสู่ ChangeBattery Normal แล้วจึงไหลผ่าน Tr9 Link เข้าสู่ TrainWait_1 Queue เพื่อเตรียมออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ต่อไป

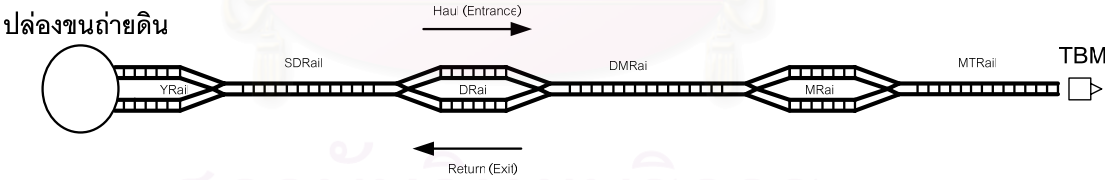


รูปที่ 7.1 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

138

7.1.2 ขั้นตอนการเดินทางไปรับดินและส่งดาดผนังอุโมงค์ให้ TBM ที่หน้าอุโมงค์ของขบวนรถจักร

ขั้นตอนการเดินทางของขบวนรถจักรระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ที่ใช้อ้างอิงภายในแบบจำลองสถานการณ์ได้แสดงในรูปที่ 7.2 โดยขบวนรถจักรที่อยู่ใน TrainWait_1 Queue จะออกจาก TrainWait_1 Queue เข้าสู่ HaulOutofShaft Combi เพื่อเคลื่อนที่ออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ได้เมื่อมีราง SDRail ซึ่งเป็นรางระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับรางพัก DRail อยู่ใน Shaft_DRail Queue และเมื่อขบวนรถจักรออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ก็จะปล่อยรางพัก YRail ซึ่งเป็นรางพักรูปตัว Y ออกมาจาก HaulOutofShaft Combi ผ่าน YRail2 Link เข้าสู่ EntranceYRail Queue ซึ่งเป็นที่เก็บรางพัก YRail ด้านที่ใช้เดินทางเข้าไปในอุโมงค์ สำหรับขบวนรถจักรนั้นเมื่อออกจาก HaulOutofShaft Combi แล้วก็จะไหลผ่าน Tr11 Link เข้าสู่ HaulToDRail Normal เพื่อเดินทางต่อไปที่รางพัก DRail และเข้าสู่ TrainWait_2 Queue เพื่อรอเข้าไปอยู่ในรางพัก DRail ในขั้นตอน HaulIntoDRail Combi โดยจะเข้าไปได้เมื่อรางพัก DRail ว่าง นั่นคือมีรางพัก DRail อยู่ใน EntranceDRail Queue ซึ่งเป็นที่เก็บรางพัก DRail ด้านที่ใช้เดินทางเข้าไปในอุโมงค์ และเมื่อเข้าไปอยู่ในรางพัก DRail เรียบร้อยแล้วก็จะเข้าสู่ TrainWait_3 Queue เพื่อรอเดินทางออกจากรางพัก DRail พร้อมทั้งปล่อยราง SDRail ออกมาจาก HaulIntoDRail Combi ผ่าน SDRail2 Link เข้าสู่ Shaft_DRail Queue เพื่อให้ขบวนรถจักรที่ออกจากหน้าอุโมงค์สามารถใช้ราง SDRail ได้



รูปที่ 7.2 ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในแบบจำลองสถานการณ์โครงการกรณีศึกษา

ในขั้นตอนถัดไปเมื่อรางพัก DMRail ซึ่งเป็นรางระหว่างรางพัก DRail กับรางพัก MRail ว่าง นั่นคือมีรางพัก DRail อยู่ใน DRail_MRail Queue ขบวนรถจักรก็จะออกจาก TrainWait_3 Queue เข้าสู่ HaulOutofDRail Combi เพื่อออกจากรางพัก DRail และปล่อยรางพัก DRail เข้าสู่ EntranceDRail Queue เพื่อให้ขบวนอื่นสามารถใช้รางพัก DRail สำหรับเดินทางเข้าไปในอุโมงค์

ได้ ในขณะที่ขบวนรถจักรก็จะไหลต่อไปยัง HaulToMRail Combi เพื่อเดินทางไปที่รางพัก MRail และเมื่อไปถึงรางพัก MRail แล้วก็จะเข้าไปอยู่ใน TrainWait_4 Queue เพื่อรอเดินทางเข้าไปอยู่ในรางพัก MRail ในขั้นตอน HaulIntoMRail Combi โดยจะเข้าไปได้เมื่อมีรางพัก MRail อยู่ใน EntranceMRail Queue ซึ่งเป็นที่เก็บรางพัก MRail ด้านที่ใช้เดินทางเข้าไปในอุโมงค์ และเมื่อเข้าไปในรางพัก MRail ได้แล้วก็จะเข้าไปอยู่ใน TrainWait_5 Queue เพื่อรอเดินทางออกจากรางพัก MRail ในขั้นตอน HaulOutofMRail Combi พร้อมทั้งปล่อยราง DMRail ออกมาจาก HaulIntoMRail Combi ผ่าน DMRail2 Link เข้าสู่ DRail_MRail Queue เพื่อให้ขบวนรถจักรที่ออกจากอุโมงค์สามารถใช้ราง DMRail ได้

สำหรับการทำงานในขั้นตอนถัดไปคือ HaulOutofMRail Combi ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ขบวนรถจักรเดินทางออกจากรางพัก MRail จะเริ่มได้เมื่อราง MTRail ซึ่งเป็นรางระหว่างรางพัก MRail กับหน้าอุโมงค์ว่าง นั่นคือมี MTRail อยู่ใน MRail_Tunnel Queue และเมื่อขบวนรถจักรเดินทางออกจากรางพัก MRail ก็จะปล่อยรางพัก MRail จาก HaulOutofMRail Combi ผ่านทาง MRail2 Link เข้าสู่ EntranceMRail Queue เพื่อให้ขบวนอื่นสามารถใช้รางพัก MRail สำหรับเดินทางเข้าไปในอุโมงค์ได้ และขบวนรถจักรก็จะไหลผ่าน Tr21 Link เข้าสู่ HaulToTunnel Normal เพื่อเดินทางต่อไปที่หน้าอุโมงค์ และเข้าสู่ WaitToUnloadSL Queue เพื่อรอขนถ่ายดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ด้านหลัง TBM ต่อไป

7.1.3 ขั้นตอนการทำงานที่หน้าอุโมงค์ของขบวนรถจักร

ขั้นตอนการทำงานที่หน้าอุโมงค์ของขบวนรถจักรจะเริ่มโดยการที่ขบวนรถจักรรออยู่ใน WaitToUnloadSL Queue เพื่อรอขนถ่ายดาดผนังอุโมงค์ไปไว้ด้านหลัง TBM ในขั้นตอน UnloadSL Combi โดยจะรอจนกระทั่งมี HS (Hydraulic Support) ซึ่งเป็นเครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์อยู่ใน HydraulicSupportUnits Queue และเมื่อ UnloadSL Combi ทำงานเสร็จเรียบร้อยก็จะปล่อย HS กลับเข้าไปสู่ HydraulicSupportUnits Queue ผ่านทาง HS2 Link และขบวนรถจักรก็จะไหลผ่าน Tr24 Link เข้าสู่ ChangeCondition Consolidator เพื่อให้ ChangeCondition Consolidator ทำงานโดยมี 2 หน้าที่หลัก ได้แก่ การเปลี่ยนระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ตามแนวเส้นทางที่ได้จากการสำรวจก่อนการก่อสร้าง มี 2 ระยะคือ ทางตรง 1.20 เมตร และทางโค้ง 0.60 เมตร สำหรับหน้าที่ต่อมาได้แก่ การเปลี่ยนสภาพชั้นดินที่ขุดเจาะตามข้อมูลสภาพชั้นดินของโครงการ ต่อมาหลังจากที่ ChangeCondition Consolidator ทำงาน

เสร็จเรียบร้อย ขบวนรถจักรก็จะไหลผ่าน Tr25 Link และ Tr26 Link เข้าสู่ HaulToLoadSoil Normal และ WaitToExcavate Queue ซึ่งเป็นขั้นตอนการเคลื่อนที่ไปยังสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) เพื่อรับดินและรอ TBM ขุดเจาะอุโมงค์ ตามลำดับ

7.1.4 ขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์และติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ของ TBM

ขั้นตอน Excavate Combi ซึ่งเป็นขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จะเริ่มเมื่อ TBMUnits Queue ปล่อย TBM ผ่าน TBM1 Link และ WaitToExcavate Queue ปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr27 Link ออกมา และเมื่อทำการขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะที่กำหนดจาก ChangeCondition Consolidator แล้ว Excavate Combi ก็จะปล่อยทรัพยากรออกมา 3 ตัว ได้แก่ TBM ซึ่งจะไหลเข้าสู่ WaitToInstallSL Queue ผ่าน TBM2 Link ทรัพยากรตัวต่อมา ได้แก่ Sch ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้กำหนดให้ขั้นตอนการทำงานในส่วนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ดำเนินการตามแผนงานที่กำหนดไว้ผ่าน SupportProcesses Consolidator และ SupportProcessesDone Fork ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทำงาน 4 ประเภท ได้แก่ ChangeCutterBits Normal เป็นการเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) ของ TBM เมื่อก่อสร้างอุโมงค์ได้ระยะทางที่กำหนด InstallDRailandMRail Normal เป็นการติดตั้งรางพัก DRail และ MRail ภายในอุโมงค์ MonthlyStop Normal เป็นการหยุดทำการก่อสร้างอุโมงค์ประจำเดือนเพื่อสับเปลี่ยนผลัดการทำงานของกลุ่มคนงาน และสุดท้ายคือ RemoveMRail Normal เป็นการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail สำหรับทรัพยากรตัวสุดท้ายที่ Excavate Combi ปล่อยออกมา ได้แก่ ขบวนรถจักรซึ่งจะไหลผ่าน Tr28 Link เข้าสู่ ReturnToMRail Normal และจะเดินทางกลับไปยังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ต่อไป

สำหรับการติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ในขั้นตอน InstallSL Combi จะเริ่มได้เมื่อ WaitToInstallSL Queue ปล่อย TBM ออกมาทาง TBM3 Link และ HydraulicSupportUnits Queue ปล่อย HS ออกมาทาง HS3 Link และหลังจากที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อย InstallSL Combi จะปล่อยทรัพยากรออกมา 3 ตัว ได้แก่ Lng ซึ่งเป็นระยะด้านหลัง TBM ที่ใช้ต่อรางสำหรับขบวนรถจักร โดย LengthEnougth Consolidator จะทำการรวบรวมค่าตัวเลขระยะด้านหลัง TBM ไว้ และเมื่อมีระยะเพียงพอในการต่อราง LengthEnougth Consolidator ก็จะสั่งให้ ExtendRail Normal ทำงานและในขณะที่ ExtendRail Normal กำลังทำงานอยู่นั้น UnloadSL Combi จะถูกกำหนดให้ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากต้องใช้พื้นที่การทำงานร่วมกัน ทรัพยากรตัวที่ 2 ที่

InstallSL Combi ปล่อยออกมาได้แก่ HS ซึ่งจะกลับเข้าไปใน HydraulicSupportUnits Queue เพื่อให้ขบวนรถจักรขบวนใหม่สามารถนำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่ด้านหลัง TBM ได้ และทรัพยากรตัวสุดท้าย ได้แก่ TBM ซึ่งจะไหลเข้าสู่ InspectSL Normal เพื่อทำการตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อยและกลับเข้าสู่ TBMUnits Queue เพื่อรอขุดเจาะอุโมงค์ในรอบต่อไป

7.1.5 ขั้นตอนการเดินทางกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร

หลังจาก TBM ขุดเจาะอุโมงค์ได้ระยะที่กำหนดแล้ว ขบวนรถจักรที่รับดินก็จะเดินทางออกมาจากหน้าอุโมงค์เพื่อกลับไปยังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์โดยใช้รางและรางพัก ณ ตำแหน่งต่างๆ เช่นเดียวกับช่วงที่เดินทางเข้าไปในอุโมงค์แต่จะใช้รางพักด้านที่ใช้สำหรับเดินทางออกจากอุโมงค์ ได้แก่ รางพัก MRail ใน ExitMRail Queue รางพัก DRail ใน ExitDRail Queue และรางพัก YRail ใน ExitYRail Queue และต้องใช้รางระหว่างรางพักร่วมกับขบวนรถจักรที่กำลังเดินทางเข้าไปในอุโมงค์ซึ่งมี 3 ตัว ได้แก่ ราง MRail ใน MRail_Tunnel Queue ซึ่งเป็นรางระหว่างรางพัก MRai กับหน้าอุโมงค์ ราง DMRail ใน DRail_MRail Queue ซึ่งเป็นรางระหว่างรางพัก DRail และ MRail และราง SDRail ใน Shaft_DRail Queue ซึ่งเป็นรางระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์และรางพัก DRail

7.1.6 ขั้นตอนการทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ของขบวนรถจักร

เมื่อขบวนรถจักรที่บรรทุกดินมาจากหน้าอุโมงค์เดินทางกลับมาถึงปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ก็จะไหลเข้าสู่ TimeToEndShiftDone Fork เพื่อตรวจสอบระยะเวลาก่อสร้างประจำผลัดว่าครบกำหนด 12 ชั่วโมงหรือไม่ หากครบกำหนดเวลาดังกล่าวขบวนรถจักรจะไหลเข้าสู่ SetUpForNextShift Normal เพื่อเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ เช่น การเปลี่ยนกลุ่มคนงาน การถ่ายทอดคำสั่งและงานที่ต้องทำในผลัดใหม่ และการตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องจักรก่อนทำงาน เป็นต้น หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ WaitToLocoOut Queue แต่ถ้าหากยังไม่ถึงเวลาที่กำหนดขบวนรถจักรจะตรงเข้าสู่ WaitToLocoOut Queue ทันที ขั้นตอนต่อมาคือการถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรในขั้นตอน LocoOut Combi เพื่อทำหน้าที่สนับสนุนการทำงานของหัวรถจักรที่ทำงานอยู่ในปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ โดยจะทำงานได้เมื่อ WaitToLocoOut Queue ปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr46 Link ออกมา และ CarShifterUnits Queue ปล่อย CS ผ่าน CS1 Link และเมื่อ LocoOut Combi ถอดหัวรถจักรเสร็จเรียบร้อย หัวรถจักรก็จะไหลผ่าน LC2 Link ไป

ยัง LocoUnits Queue สำหรับขบวนรถจักรที่ถูกถอดหัวรถจักรออกนั้นก็จะไหลต่อไปยัง WaitToUnloadSoil Queue เพื่อรอนำดินไปทิ้งในขั้นตอน UnloadSoil Combi โดยจะเริ่มได้เมื่อขบวนรถจักรขบวนก่อนหน้าเดินทางออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ในขั้นตอน HaulOutofShaft Combi และปล่อย YRail เข้าสู่ EntranceYRail Queue ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอน UnloadSoil Combi ต่อไป และเมื่อนำดินไปทิ้งในขั้นตอน UnloadSoil Combi เสร็จเรียบร้อยก็จะครบวงรอบการทำงานของขบวนรถจักรและจะเริ่มทำงานในวงรอบใหม่ต่อไป

ในกรณีที่มีการเพิ่มจำนวนขบวนรถจักรและหัวรถจักรที่ใช้ในโครงการตามระยะทางก่อสร้างอุโมงค์ที่เพิ่มขึ้นจะใช้ TrainStorage Queue และ ReleaseTrain Combi ทำการปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr1 Link และ Tr2 Link เข้าสู่ TrainUnits Queue และใช้ LocoStorage Queue และ ReleaseLoco Combi ทำการปล่อยหัวรถจักรผ่าน LC3 Link และ LC4 Link เข้าสู่ LocoUnits Queue เพื่อใช้งานภายในอุโมงค์ต่อไป

หลังจากที่ได้สร้างผังโครงข่ายเพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เสร็จเรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปจะนำเอาโปรแกรม Stroboscope มาสร้างชุดคำสั่งของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยนำข้อมูลของโครงการกรณีศึกษาและพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลร่วมกับการประเมินค่าโดยใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการประเมินระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าว สำหรับรายละเอียดของพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้ในการคำนวณระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และความหมายของสัญลักษณ์ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ได้อธิบายไว้ในภาคผนวก ง และได้แสดงตัวอย่างชุดคำสั่งไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มชุดคำสั่งจำนวน 10 กลุ่มที่มีหน้าที่การทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กลุ่มชุดคำสั่ง Resource and Decision Parameters ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการจัดเก็บข้อมูลโครงการเพื่อใช้จัดสรรทรัพยากรและวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์ กลุ่มชุดคำสั่ง Auxiliary Parameters ใช้สร้างพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลและสมการที่ใช้คำนวณกระบวนการ

ก่อสร้างอุโมงค์ และกลุ่มชุดคำสั่ง Resource Types ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น

7.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

ส่วนแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมามี 3 ส่วน ได้แก่

(1) ส่วนแสดงผลการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์แสดงในรูปที่ 7.3 มี 3 สดมภ์ สดมภ์แรกจะแสดงรอบที่ทำการจำลองสถานการณ์ สดมภ์ถัดมาได้แก่ สดมภ์ Validation จะแสดงค่าประมาณที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์กับค่าจริงที่ได้จากบันทึกการทำงานของโครงการ โดยค่าประมาณจากสดมภ์นี้จะคำนวณจากระยะเวลาทำงานของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์เท่านั้นเพื่อให้ตรงกับรูปแบบการบันทึกข้อมูลอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการ สำหรับสดมภ์สุดท้ายได้แก่ สดมภ์ Estimation ใช้แสดงค่าประมาณที่นำไปใช้งานจริงกับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นค่าที่คำนวณจากระยะเวลาทำงานของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาทำงานสำหรับขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ การเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) ของ TBM การติดตั้งและเคลื่อนย้ายรางพัก การสับเปลี่ยนผลัดการทำงานของกลุ่มคนงาน โดยข้อมูลในสดมภ์นี้จะนำไปใช้วิเคราะห์ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการ และนำไปใช้วางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกต่อไป

(2) ส่วนแสดงผลทางสถิติแสดงในรูปที่ 7.4 ประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของค่าประมาณผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละรอบ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การประมาณค่าแบบช่วงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าประมาณต่ำสุดและสูงสุดที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

(3) ส่วนแสดงผลข้อมูลทั่วไปของโครงการแสดงในรูปที่ 7.5 ประกอบด้วยชนิดและจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในโครงการ ตำแหน่งการก่อสร้างอุโมงค์และตำแหน่งของรางพักจากต้นอุโมงค์ จำนวนรอบที่ก่อสร้าง จำนวนดาดผนังอุโมงค์ที่ใช้ และรายละเอียดการทำงานของขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์

Development of Simulation Models
for Drainage Tunneling Project Planning

Results from Simulation

Round	Validation		Estimation	
	Working Time (days)	Advance Rate (m/12-hr Shift)	Working Time (days)	Advance Rate (m/12-hr Shift)
1	71	10.11	75	9.57
2	70	10.21	74	9.66
3	69	10.45	73	9.87
4	68	10.58	72	9.99
5	69	10.36	73	9.79
6	71	10.13	75	9.59
7	69	10.32	73	9.76
8	69	10.35	73	9.78
9	70	10.27	74	9.71
10	70	10.19	74	9.64
11	69	10.34	73	9.77
12	70	10.27	74	9.72
13	68	10.53	72	9.95
14	73	9.79	77	9.28
15	70	10.30	74	9.74
16	69	10.40	73	9.83
17	69	10.41	73	9.84
18	69	10.35	73	9.79
19	69	10.42	73	9.85
20	70	10.25	74	9.70

รูปที่ 7.3 ส่วนแสดงผลการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์

Avg	70	10.30	74	9.74
SD	1.17	0.17	1.17	0.15
95% Low	69	10.22	73	9.67
95% Hi	70	10.38	74	9.81
Min	68	9.79	72	9.28
Max	73	10.58	77	9.99

รูปที่ 7.4 ส่วนแสดงผลทางสถิติ

```
Numbers of TBMs                          :     1            Units
-------------------------------------------------------------------
Numbers of Initial Trains                :     2            Units
Numbers of Working Trains                :     3            Units
Numbers of Trains in Storage             :     1            Units
-------------------------------------------------------------------
Numbers of Initial Locomotives           :     2            Units
Numbers of Working Locomotives           :     3            Units
Numbers of Locomotives in Storage        :     1            Units
-------------------------------------------------------------------
Average Excavate Distance                :  1606.48             m
Double Rail Distance                     :   850                m
Moveable Type Double Rail Distance       :     0                m
-------------------------------------------------------------------
Average Numbers of Excavations           :  1366      Cycles/Round
Average Numbers of Segment Linings       :  8196      Pieces/Round
-------------------------------------------------------------------
Support Processes
Average Numbers of ChangeCutterBits      :     0 Times  0.00 Days
Average Numbers of InstallDRailandMRail  :     1 Times  3.00 Days
Average Numbers of MonthlyStop           :     2 Times  1.00 Days
Average Numbers of RemoveMRail           :     0 Times  0.00 Days
-------------------------------------------------------------------

------------------------------------
Execution    Time = 5.388 seconds
```

รูปที่ 7.5 ส่วนแสดงผลข้อมูลทั่วไปของโครงการ

7.3 การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

การตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model เป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้แบบจำลองสถานการณ์ว่าค่าที่ได้มีความถูกต้อง สามารถนำไปใช้งานจริงได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ มี 2 ขั้นตอน ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) เป็นการพิจารณาถึงพฤติกรรมของแบบจำลองสถานการณ์ว่าตรงตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ ดังที่ได้อธิบายขั้นตอนการตรวจสอบไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.7.1 การตรวจสอบความถูกต้อง สำหรับการทดสอบความถูกต้องเป็นการเปรียบเทียบอัตราการก่อสร้างอุโมงค์จากการจำลองสถานการณ์โดยทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้ง กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจริงภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกันที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 1,606.429 เมตรจากต้นอุโมงค์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.53 เมตรต่อผลัด 12 ชั่วโมง โดยใช้วิธีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ในสมการที่ 4.5 แสดงค่าประมาณจากการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบในตารางที่ 7.1

พบว่ามีค่า MAPE เท่ากับ 7.86% แสดงว่าแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model มีค่าแตกต่างจากอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจริงภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกัน 7.86%

ตารางที่ 7.1 ชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete Event Simulation Model ด้วยวิธี MAPE

ครั้งที่	อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง)
1	10.29
2	10.29
3	10.28
4	10.27
5	10.26
6	10.27
7	10.27
8	10.28
9	10.29
10	10.29

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่วิเคราะห์โดยใช้วิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาซึ่งเป็นวิธี Deterministic ที่ใช้ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์บางขั้นตอนมาวิเคราะห์ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 5 หัวข้อ 5.1 การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ด้วยวิธี Deterministic และวิธี Probabilistic และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยทำการทดสอบที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 1,606.429 เมตรจากต้นอุโมงค์ด้วยวิธี MAPE เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าด้วยวิธีต่างๆ แสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 7.2 พบว่าการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับอัตราการก่อสร้างจริงมากที่สุด โดยมีค่า MAPE 7.86% สำหรับวิธีที่มีค่าประมาณใกล้เคียงรองลงมา ได้แก่ วิธี Probabilistic และ Deterministic จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model โดยมีค่า MAPE 34.52% และ 41.66% ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาพบว่ามีค่าประมาณใกล้เคียงกับอัตราการก่อสร้างจริงน้อยที่สุดโดยมีค่า MAPE 43.86% อย่างไรก็ตาม MAPE เป็นเพียงวิธีทดสอบเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดความแม่นยำวิธีหนึ่งเท่านั้น ยังไม่อาจสรุปได้ว่าวิธีที่ให้ค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดหรือมีค่า MAPE น้อยที่สุดจะเป็นวิธีประมาณค่าที่ดีที่สุดเสมอไป

ตารางที่ 7.2 ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ MAPE ทดสอบความแม่นยำของวิธีประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์

วิธีประมาณ อัตราการก่อสร้างอุโมงค์	อัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง)	MAPE
1. บันทึกโครงการ	9.53	0.00%
2. Discrete-Event Simulation Model[1]	10.27	7.86%
3. Probabilistic Analysis[2]	12.82	34.52%
4. Deterministic Analysis[2]	13.50	41.66%
5. บริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา	13.71	43.86%

หมายเหตุ

(1) จำลองสถานการณ์โดยการทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้ง โดยค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจากการประมาณค่าทั้ง 10 ครั้ง

(2) เป็นค่าประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษาด้วยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ในบทที่ 6 หัวข้อที่ 6.2 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

7.4 การประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model สำหรับวิเคราะห์และวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์

หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวไปใช้วิเคราะห์การทำงานของโครงการก่อสร้างอุโมงค์และนำเสนอการใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์สำหรับวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก โดยใช้โครงการกรณีศึกษาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ มีรายละเอียดดังนี้

7.4.1 การวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษา

การวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษาประกอบด้วยการประมาณระยะทางและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ การวิเคราะห์ค่าอัตราการใช้งานเครื่องจักร (Utilization Rate) ที่ใช้ในโครงการกรณีศึกษา และสุดท้ายได้แก่ การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงการทำงานของโครงการกรณีศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

- **การประมาณระยะทางและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์**

การจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โดยทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้งเพื่อประมาณระยะทางก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ณ เวลาก่อสร้างต่างๆ แสดงในตารางที่ 7.3 และรูปที่ 7.6 พบว่าที่ระยะเวลาก่อสร้าง 80 วัน สามารถก่อสร้างอุโมงค์ได้ระยะทางจริง 1,377.596 เมตร คิดเป็น 26.89% ของระยะทางทั้งหมด 5,123,600 เมตร ในขณะที่แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ประมาณระยะทางได้ 1,713.438 เมตร คิดเป็น 33.44% ของระยะทางทั้งหมด 5,123.600 เมตร และเมื่อวิเคราะห์การประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ในช่วง Main Drive ทั้งโครงการที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ พบว่าได้ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ 258 วัน ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างต่ำสุด 253 วัน และสูงสุด 266 วัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.93 วัน แสดงค่าการแจกแจงในรูปที่ 7.7

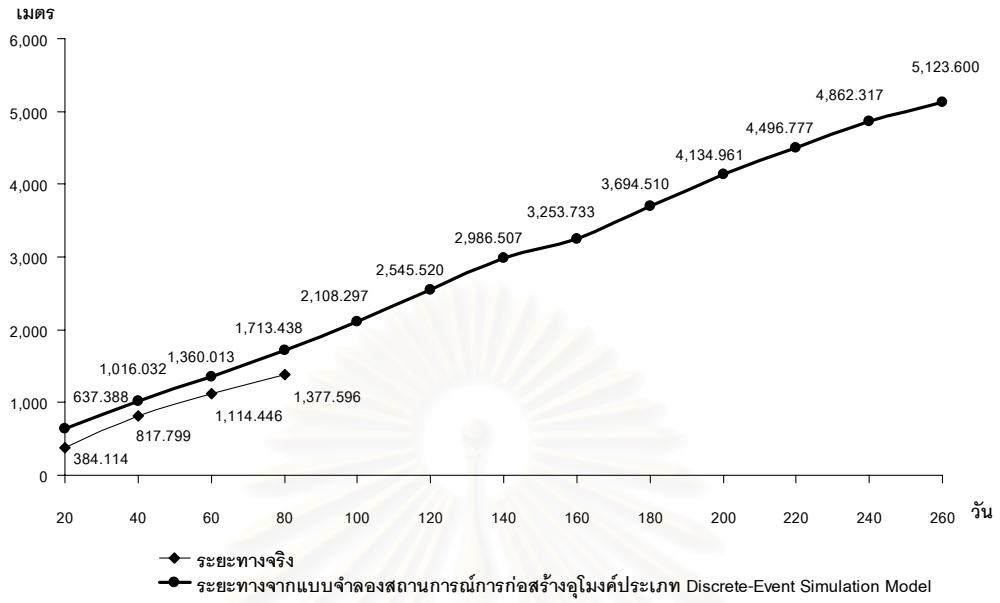
ตารางที่ 7.3 ค่าประมาณระยะทางก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โครงการกรณีศึกษา

ระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ (วัน)	ระยะทางจริง		ระยะทางจากแบบจำลองสถานการณ์	
	เมตร	ร้อยละ(1)	เมตร	ร้อยละ(1)
20	384.114	7.50	637.388	12.44
40	817.799	15.96	1,016.032	19.83
60	1,114.446	21.75	1,360.013	26.54
80	1,377.596	26.89	1,713.438	33.44
100	ไม่มีข้อมูล	–	2,108.297	41.15
120			2,545.520	49.68
140			2,986.507	58.29
160			3,253.733	63.50
180			3,694.510	72.11
200			4,134.961	80.70
220			4,496.777	87.77
240			4,862.317	94.90
258			5,123.600	100.00

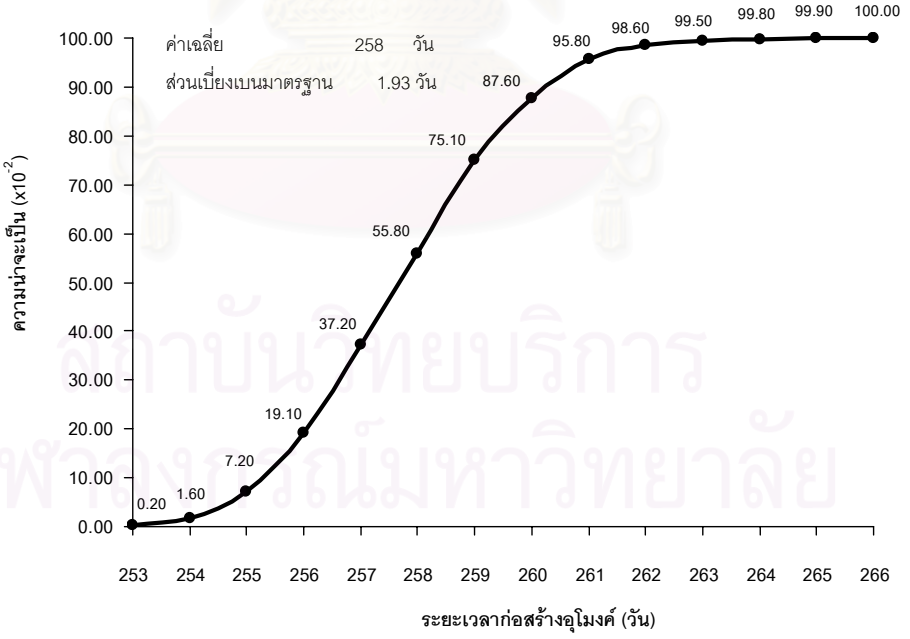
หมายเหตุ

(1) เป็นค่าร้อยละจากระยะทางก่อสร้างของโครงการทั้งหมด 5,123.600 เมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.6 ค่าประมาณระยะทางก่อสร้างอุโมงค์จากแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โครงการกรณีศึกษา



รูปที่ 7.7 Cumulative Distribution Function (CDF) ของค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์

ผลที่ได้จากการประมาณค่าระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model พบว่ามีค่าแตกต่างจากระยะเวลาก่อสร้างจริงค่อนข้างมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาก่อสร้าง 80 วัน ค่าที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีค่าแตกต่างจากค่าจริงถึง 24.38% มีสาเหตุเนื่องมาจากโครงการได้หยุดทำการก่อสร้างอุโมงค์นอกเหนือจากที่กำหนดไว้ในแผนงาน ในขณะที่แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะไม่หยุดทำการก่อสร้างอุโมงค์นอกเหนือจากที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และเมื่อพิจารณาข้อมูลวันทำงานของโครงการกรณีศึกษาในตารางที่ 7.4 พบว่าระยะเวลาก่อสร้าง 80 วัน โครงการได้ทำการก่อสร้างอุโมงค์เต็มวันเป็นระยะเวลา 61 วัน ก่อสร้างอุโมงค์ครึ่งวัน 5 วัน หยุดเพื่อสับเปลี่ยนผลัดการทำงานของกลุ่มคนงาน 1 วัน หยุดเพื่อติดตั้งรางพัก 3 วัน และหยุดก่อสร้างอุโมงค์นอกแผนงานที่กำหนดไว้ 10 วัน ในขณะที่แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ได้ทำการจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เต็มวันเป็นระยะเวลา 76 วัน และหยุดตามที่กำหนดไว้ในแผนงานก่อสร้าง ได้แก่ หยุดเพื่อติดตั้งรางพักและสับเปลี่ยนผลัดการทำงานของกลุ่มคนงานเป็นระยะเวลา 4 วันเท่านั้น จึงทำให้ระยะก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าระยะก่อสร้างจริง

ตารางที่ 7.4 ข้อมูลวันทำงานของโครงการกรณีศึกษาในช่วงระยะเวลาก่อสร้าง 80 วัน

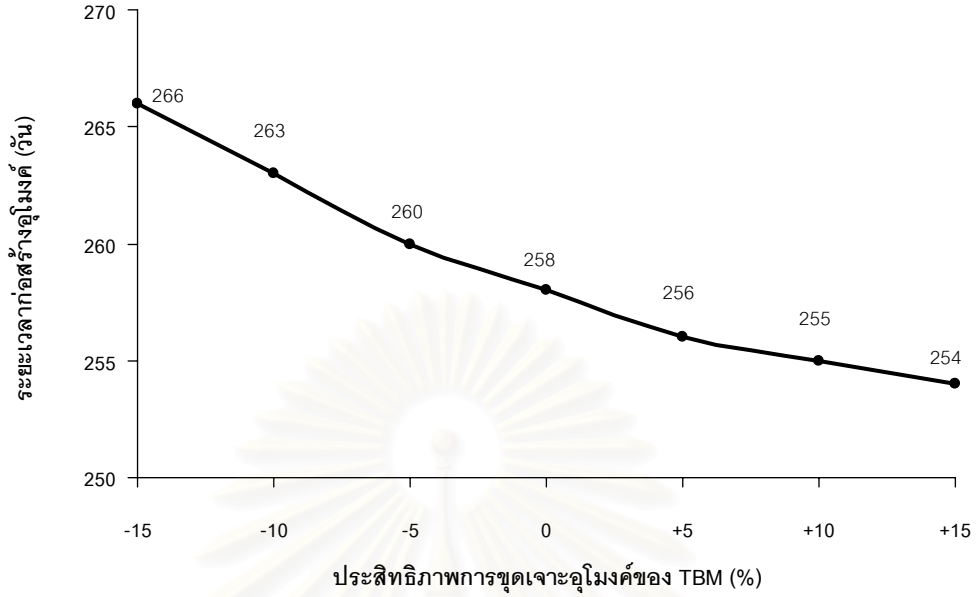
รายละเอียด	จำนวนวัน	ร้อยละ
ก่อสร้างอุโมงค์เต็มวัน	61	76.25
ก่อสร้างอุโมงค์ครึ่งวัน	5	6.25
ติดตั้งรางพัก	3	3.75
หยุดสับเปลี่ยนผลัดการทำงานของกลุ่มคนงาน	1	1.25
หยุดก่อสร้างอุโมงค์นอกแผนงานที่กำหนดไว้	10	12.50
รวม	80	100.00

- **การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์**

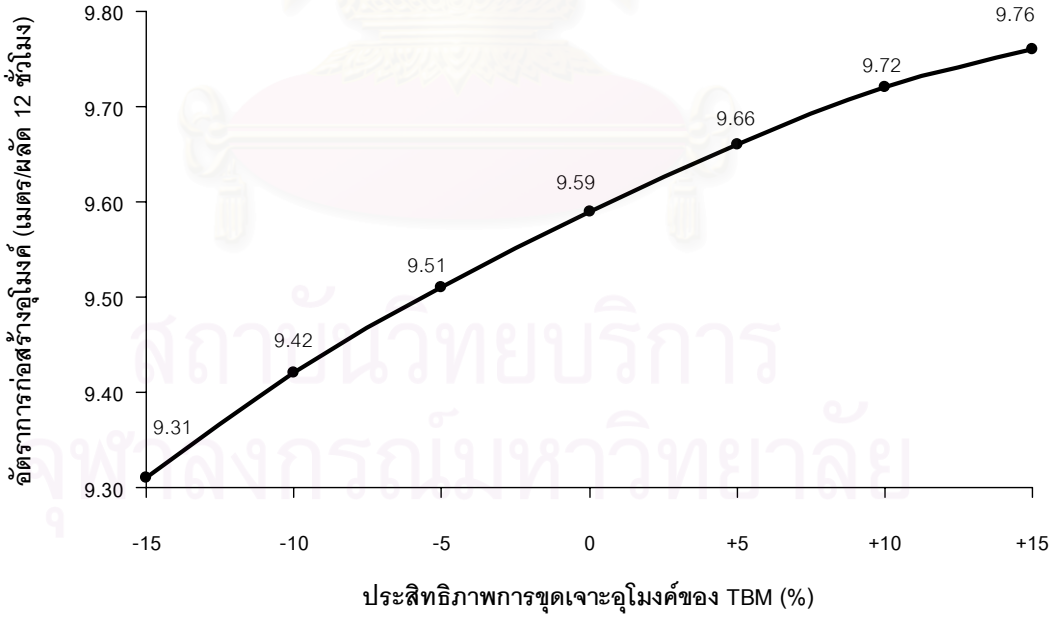
เนื่องจาก TBM เป็นเครื่องจักรที่มีความสำคัญต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ อีกทั้งในขั้นตอนการวางแผนงานก่อนการก่อสร้างอุโมงค์นั้นบริษัทก่อสร้างมีโอกาสที่จะเลือกใช้ TBM ประเภทต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพแตกต่างกันซึ่งเป็นที่แน่นอนว่า TBM ที่มีอัตราการขุดเจาะสูงย่อมมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการนำเสนอแนวทางการใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ในการตัดสินใจเลือกใช้ TBM ในช่วงวางแผนก่อนการก่อสร้างที่เหมาะสมกับโครงการโดยทำการจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ จำลองสถานการณ์โดยการทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้ง แสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 7.5 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ไว้ในรูปที่ 7.8 และ 7.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์

ประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM (%)	ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง)	ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ (วัน)	ระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ที่เปลี่ยน	
			วัน	%
-15%	9.31	266	+8	+3.10
-10%	9.42	263	+5	+1.94
-5%	9.51	260	+2	+0.78
0%	9.59	258	0	0.00
+5%	9.66	256	-2	-0.78
+10%	9.72	255	-3	-1.16
+15%	9.76	254	-4	-1.55



รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์



รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ที่กับระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **การวิเคราะห์อัตราการใช้งานเครื่องจักร**

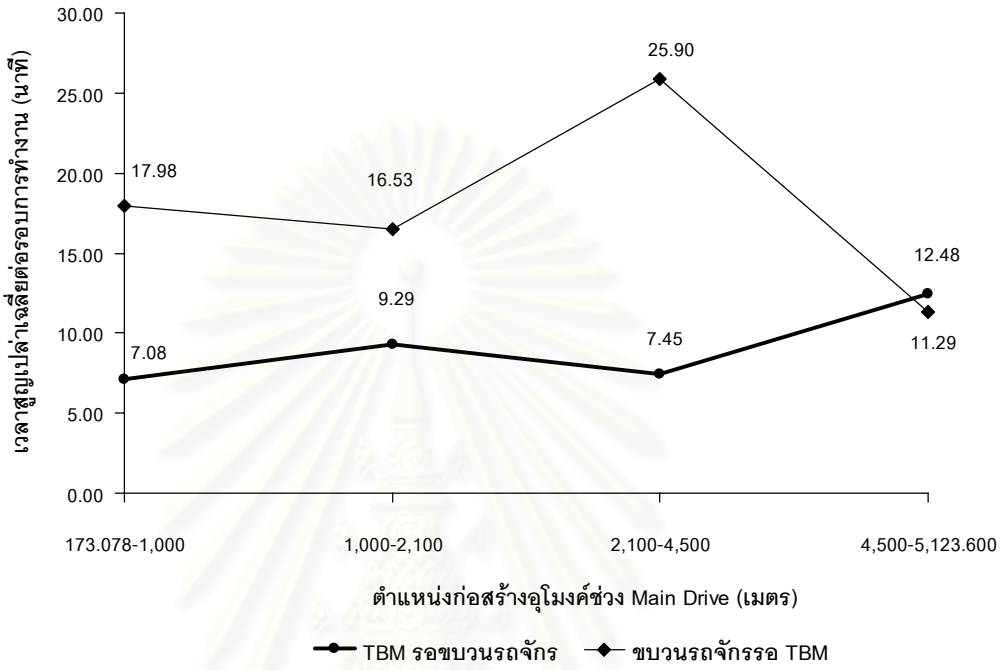
เครื่องจักรที่จะทำการวิเคราะห์ค่าอัตราการใช้งานได้แก่ TBM และขบวนรถจักรเนื่องจากเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการจัดสรรทรัพยากรให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นได้ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าอัตราการใช้เครื่องจักรนั้นจะทำการวิเคราะห์ค่าเวลาสูญเปล่า (Idle Time) เฉลี่ยต่อรอบการทำงานของ TBM ที่ต้องรอขบวนรถจักรเดินทางมาที่หน้าอุโมงค์ และเวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงานของขบวนรถจักรที่ต้องรอ TBM ทำการจำลองสถานการณ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแผนงานของโครงการกรณีศึกษาในช่วงก่อสร้างอุโมงค์ Main Drive โดยทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้ง แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ในตารางที่ 7.6 และรูปที่ 7.10

ตารางที่ 7.6 เวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงานของ TBM และขบวนรถจักร

ตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ (เมตร)	เวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงาน (นาที)	
	TBM รอขบวนรถจักร	ขบวนรถจักรรอ TBM
173.078-1,000	7.08	17.98
1,000-2,100	9.29	16.53
2,100-4,500	7.45	25.90
4,500-5,123.600	12.48	11.29

จากตารางที่ 7.6 และรูปที่ 7.10 พบว่าที่ตำแหน่งต้นอุโมงค์ระหว่าง 173.078 เมตร ถึง 1,000 เมตร เวลาสูญเปล่าของ TBM มีค่าไม่มากนักแต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อก่อสร้างที่ระยะ 1,000 เมตร ถึง 2,100 เมตร ในขณะที่เวลาสูญเปล่าของขบวนรถจักรที่ต้องรอ TBM จะมีค่าค่อนข้างมากในช่วงแรกและจะลดลงเมื่อก่อสร้างที่ระยะ 1,000 เมตร ถึง 2,100 เมตร ต่อมาเมื่อพิจารณาการก่อสร้างที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์ระหว่าง 2,100 เมตร ถึง 4,500 เมตรจากต้นอุโมงค์ พบว่าเวลาสูญเปล่าของ TBM มีค่าลดลงในขณะที่เวลาสูญเปล่าของขบวนรถจักรมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์นี้โครงการได้ทำการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail ให้อยู่ใกล้หน้าอุโมงค์ทุก 2 สัปดาห์ จึงทำให้ขบวนรถจักรสามารถเดินทางมารออยู่ที่หน้าอุโมงค์ได้เร็วขึ้น สำหรับการก่อสร้างที่ตำแหน่งปลายอุโมงค์พบว่าเวลาสูญเปล่าของ TBM มีค่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากในขณะที่เวลาสูญเปล่าของขบวนรถจักรกลับมีค่าลดลงมากเช่นกัน

สำหรับสาเหตุนั้นอาจเกิดจากการจัดตำแหน่งรางพักไม่เหมาะสม จำนวนรางพักที่ใช้เมื่อก่อสร้างที่ตำแหน่งปลายอุโมงค์ไม่เพียงพอ หรือขบวนรถจักรที่ใช้มีจำนวน ไม่เพียงพอ เป็นต้น



รูปที่ 7.10 เวลาสูญเปล่าเฉลี่ยต่อรอบการทำงานของ TBM และขบวนรถจักร

- **การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงการทำงาน**

จากรายงานการก่อสร้างอุโมงค์ประจำผลัด (Tunneling Work Shift Report) ซึ่งได้บันทึกเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อการก่อสร้างอุโมงค์พบว่า เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบ่อยและมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ค่อนข้างมาก ได้แก่ เหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง ซึ่งเกิดจากการที่รางภายในอุโมงค์ขาดการบำรุงรักษา ดังนั้นหากจัดกลุ่มคนงานขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่บำรุงรักษารางโดยเฉพาะจะช่วยลดโอกาสที่ขบวนรถจักรตกรางได้ และเพื่อสะท้อนถึงผลที่ได้รับจากการจัดกลุ่มคนงานเพื่อทำหน้าที่บำรุงรักษารางที่ใช้ภายในอุโมงค์งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้โอกาสที่ขบวนรถจักรตกรางลดลงจากเดิม 50% และทำการจำลองสถานการณ์โดยทำซ้ำ 100 รอบ จำนวน 10 ครั้ง ที่ตำแหน่ง 173.078 เมตร ถึง 5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์ ได้ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 9.73 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น 0.14 เมตร/ผลัด

12 ชั่วโมง และค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ 254 วัน ลดลง 4 วัน นั่นคือทำให้อัตราการก่อสร้างอุโมงค์เพิ่มขึ้น 1.46% และลดระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ลง 1.55%

7.4.2 การวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก

การวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ได้ใช้โครงการกรณีศึกษาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ มีแนวทางนำเสนอทั้งหมด 4 แนวทางแสดงในตารางที่ 7.7 แต่ละแผนงานจะแสดงให้เห็นถึงสิ่งที่ต้องพิจารณาในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ โดยแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 เป็นการวางแผนอย่างง่ายเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแผนงานอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่า แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 นำเสนอการทดลองใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ในการวางแผนงานก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ ในขณะที่แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 และ 4 นำเสนอการปรับปรุงแผนงานในช่วงระหว่างการก่อสร้างโดยมุ่งเน้นการจัดสรรทรัพยากรให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่ละแผนงานมีแนวคิดดังนี้

(1) แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 เป็นแผนงานอย่างง่ายเพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการนำแผนงานดังกล่าวไปใช้กับการนำแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่าไปใช้ดำเนินการว่ามีความแตกต่างมากน้อยเพียงใด

(2) แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 เป็นแผนงานที่นำเสนอการทดลองวางแผนก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ มีแนวคิดที่ต้องการทดลองเปลี่ยนสถานที่นำดินไปทิ้งและบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ เนื่องจากโดยปกติโครงการก่อสร้างอุโมงค์จะนำดินที่ได้จากการขุดเจาะไปทิ้งและบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ ดังนั้นเมื่อก่อสร้างได้ระยะทางมากขึ้นขบวนรถจักรก็ต้องใช้เวลาเดินทางไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์นานมากขึ้นเช่นกัน วิธีการแก้ปัญหาของโครงการโดยทั่วไปคือการติดตั้งรางพักระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์และการเพิ่มจำนวนขบวนรถจักรที่ใช้ภายในอุโมงค์ อย่างไรก็ตามการสร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวระหว่างต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แผนงานนี้จึงกำหนดให้สร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวขึ้นที่กลางอุโมงค์และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการสร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวขึ้นที่กลางอุโมงค์กับผลที่ได้จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกอื่นๆ ที่วางแผนโดยการทดลองติดตั้งรางพักที่ตำแหน่งต่างๆ และทดลองเพิ่มจำนวนขบวนรถจักรที่ใช้ภายในโครงการ อย่างไรก็ตามการสร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวที่ตำแหน่งกลางอุโมงค์จำเป็นต้องมีพื้นที่ก่อสร้าง

และพื้นที่กองเก็บดาดผนังอุโมงค์บริเวณกลางอุโมงค์ที่เหมาะสมและต้องพิจารณาถึงต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างปล่องขนถ่ายดินด้วย โดยข้อจำกัดดังกล่าวอยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยนี้

(3) แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 เป็นแผนงานที่ต้องการลดต้นทุนของโครงการกรณีศึกษาในขณะที่ระยะเวลาก่อสร้างไม่เพิ่มขึ้นมากนัก โดยทำการลดจำนวนขบวนรถจักรที่ใช้ในโครงการจาก 4 ขบวนเป็น 3 ขบวนและทดลองเปลี่ยนตำแหน่งของรางพัก

(4) แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 4 เป็นแผนงานที่เน้นปรับปรุงแผนการทำงานเดิมของโครงการกรณีศึกษาให้มีระยะเวลาก่อสร้างของโครงการลดลงโดยที่ต้นทุนของโครงการไม่เพิ่มขึ้นมากนัก โดยการทดลองเพิ่มและเปลี่ยนตำแหน่งของรางพัก

ตารางที่ 7.7 แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก

รายละเอียด		จำนวนขบวนรถจักร
แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1		
ช่วงที่ 1	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 173.078-1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์	2
ช่วงที่ 2	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 1,000-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์	2
แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2		
ช่วงที่ 1	สร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวกลางอุโมงค์ที่ตำแหน่ง 2,500 เมตรจากต้นอุโมงค์	–
ช่วงที่ 2	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 173.078-1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์	2
ช่วงที่ 3	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 1,000-2,700 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์	3
ช่วงที่ 4	เปลี่ยนที่ขนถ่ายดินและบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ไปที่ปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวกลางอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวกลางอุโมงค์	–
ช่วงที่ 5	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 2,700-3,700 เมตรจากต้นอุโมงค์	3

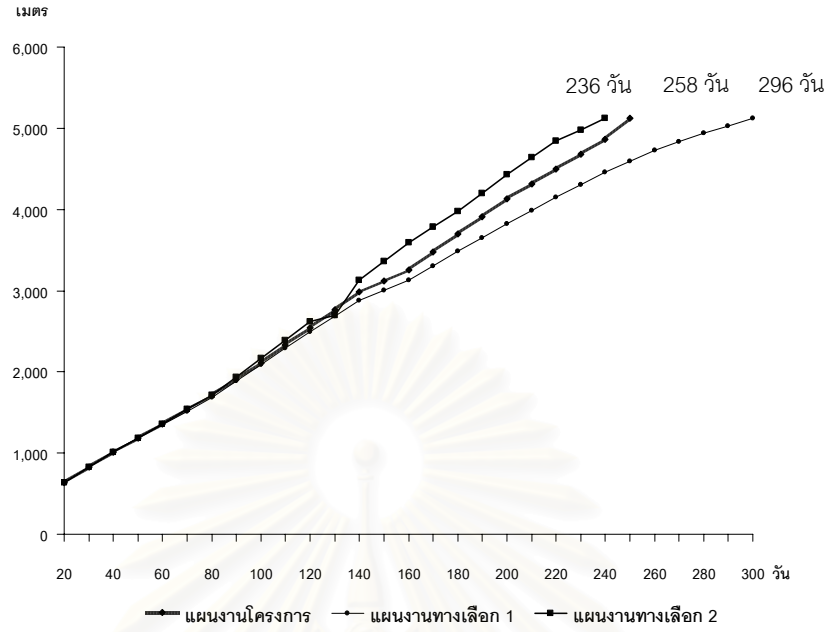
ตารางที่ 7.7 แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือก (ต่อ)

รายละเอียด		จำนวนขบวนรถจักร
ช่วงที่ 6	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 3,700-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากกลางอุโมงค์	3
แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3		
ช่วงที่ 1	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 173.078-1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์	2
ช่วงที่ 2	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 1,000-2,100 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรจากต้นอุโมงค์	3
ช่วงที่ 3	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 2,100-3,500 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 1,900 เมตรจากต้นอุโมงค์	3
ช่วงที่ 4	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 3,500-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์และย้ายรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 850 เมตรไปติดตั้งที่ตำแหน่ง 3,300 เมตรจากต้นอุโมงค์	3
แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 4		
ช่วงที่ 1	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 173.078-1,200 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์	2
ช่วงที่ 2	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 1,200-2,700 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 1,000 เมตรจากต้นอุโมงค์	3
ช่วงที่ 3	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 2,700-4,200 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 2,500 เมตรจากต้นอุโมงค์	4
ช่วงที่ 4	ก่อสร้างที่ตำแหน่ง 4,200-5,123.600 เมตรจากต้นอุโมงค์และติดตั้งรางพัก DRail ที่ตำแหน่ง 4,000 เมตรจากต้นอุโมงค์	4

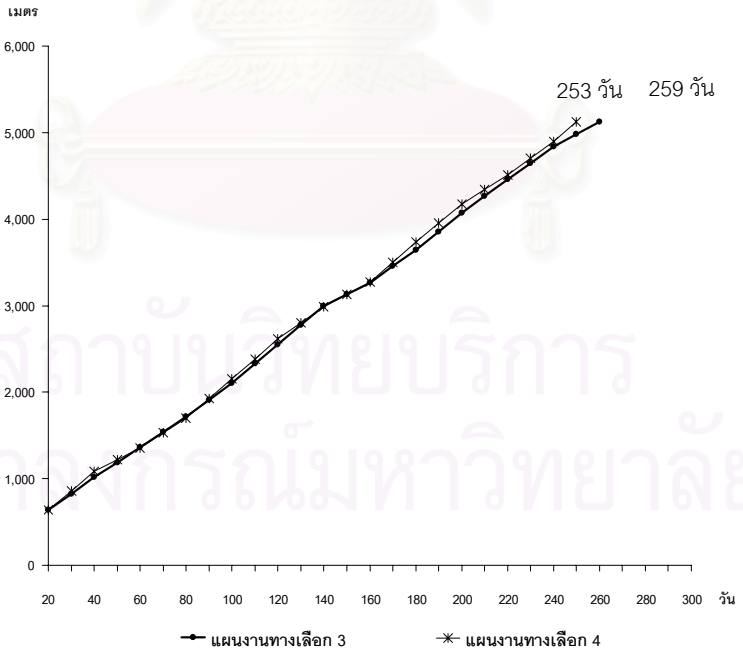
การวิเคราะห์แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกทั้ง 4 แผนงานแสดงในรูปที่ 7.11 และ 7.12 พบว่าค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 ซึ่งเป็นแผนงานที่กำหนดให้สร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวขึ้นที่กลางอุโมงค์มีระยะเวลาก่อสร้างน้อยที่สุด 236 วัน รองลงมาได้แก่ แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 4 ระยะเวลา 253 วัน แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 ระยะเวลา 269 วัน และแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 ซึ่งเป็นแผนงานอย่างง่ายมีระยะเวลาก่อสร้างมากที่สุด 296 วัน แตกต่างจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 ถึง 60 วัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 จะเป็นแผนงานที่มีระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ต่ำสุดแต่การสร้างปล่องขนถ่ายดินชั่วคราวที่กลางอุโมงค์จำเป็นต้องเตรียมการตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นโครงการ ดังนั้นแผนงานนี้จึงไม่สามารถใช้ปรับปรุงแผนงานในช่วงระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ได้แต่เป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นทางเลือกในช่วงวางแผนก่อนการก่อสร้างอุโมงค์

สำหรับแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่มีค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างรองลงมาได้แก่ แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 4 และ 3 ซึ่งเป็นแผนงานที่มีความเหมาะสมสำหรับโครงการกรณีศึกษามากกว่าเพราะเป็นแผนงานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการดำเนินงานของโครงการ เนื่องจากเป็นการจัดสรรทรัพยากรจากแผนงานเดิมของโครงการกรณีศึกษาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเท่านั้น โดยแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 เป็นแผนงานที่สามารถลดต้นทุนของโครงการจากการใช้ขบวนรถจักรน้อยลงได้ประมาณ 3,500,000 บาท (จากข้อมูลราคาขบวนรถจักรของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา) ในขณะที่ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างเพิ่มขึ้นจากแผนงานเดิมของโครงการกรณีศึกษา 1 วันเท่านั้น สำหรับแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 4 ได้ทำการเพิ่มรางพักจาก 2 เป็น 3 รางพักและจัดสรรตำแหน่งของ รางพักใหม่โดยใช้ขบวนรถจักร 4 ขบวนเท่าเดิม พบว่าสามารถลดระยะเวลาก่อสร้างจากแผนงานเดิมของโครงการกรณีศึกษาได้ประมาณ 5 วัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.11 ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 และ 2



รูปที่ 7.12 ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์จากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 และ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.5 สรุปท้ายบท

บทนี้ได้นำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้ในการวิเคราะห์โครงการกรณีศึกษา ได้แก่ การประมาณระยะทางและระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ การวิเคราะห์ค่าเวลาสูญเปล่าของ TBM และขบวนรถจักรที่เกิดขึ้นในโครงการกรณีศึกษา และสุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการปรับปรุงการทำงานโครงการโดยการจัดกลุ่มคนงานขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่บำรุงรักษารางและรางพักโดยเฉพาะ สำหรับการนำเสนอแนวทางการใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกนั้นได้นำเสนอแนวทางการนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวไปใช้ในการวางแผนงานก่อนการก่อสร้างอุโมงค์และนำไปใช้ปรับปรุงแผนงานในช่วงระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโครงการให้ดียิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการศึกษา

โครงการก่อสร้างอุโมงค์เป็นโครงการขนาดใหญ่ที่มีต้นทุนค่าก่อสร้างสูงอีกทั้งยังมีความสลับซับซ้อนและความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องในหลายๆ ด้าน จึงส่งผลให้มีความเสี่ยงในการวางแผนงานก่อสร้าง แนวทางหนึ่งที่สามารถใช้บรรเทาหรือกำจัดความเสี่ยงได้คือการวิเคราะห์และวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงขั้นตอนวิธีการก่อสร้าง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพ (Productivity) การก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทย และได้พัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงการและวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกสำหรับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ในขั้นแรกจะเป็นการวิเคราะห์ระดับชั้นการจัดการโครงการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์ โดยระดับชั้นที่เหมาะสมได้แก่ ระดับขั้นตอนการทำงาน (Work Task Level) ซึ่งเป็นระดับที่ผู้ใช้ที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนงานโครงการสามารถนำไปใช้ในการทำงานจริงได้ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameter) ภายในแบบจำลองสถานการณ์ โดยทำการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงของข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ได้ในโปรแกรม ProbSched และ Stroboscope ได้แก่ การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงแบบเอกรูป (Uniform Distribution) การแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแบบแกมม่า และการแจกแจงแบบเบต้า ทำการทดสอบสมมติฐานด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่า Goodness of Fit Test โดยใช้วิธีการทดสอบ Chi-Square ในกรณีที่พบว่าการแจกแจงของข้อมูลที่ทดสอบไม่ตรงตามการแจกแจงที่กล่าวมาข้างต้นหรือมีจำนวนข้อมูลไม่เพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงจะใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) ทำการวิเคราะห์ต่อไป สำหรับแหล่งที่มาของข้อมูลในกรณีที่ใช้แบบจำลองสถานการณ์ในการวางแผนก่อนการก่อสร้างอุโมงค์นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากโครงการในอดีตที่มีวิธีการก่อสร้างรูปแบบเดียวกับโครงการที่ศึกษาหรือจากการสัมภาษณ์วิศวกรผู้เชี่ยวชาญ แต่ในกรณีที่ใช้แบบจำลองสถานการณ์สำหรับการปรับปรุงแผนการดำเนินงานของโครงการก่อสร้างที่ได้เริ่มดำเนินการไปแล้ว

บางส่วนนั้นสามารถใช้ข้อมูลของโครงการที่ศึกษาในส่วนที่ดำเนินการเสร็จสมบูรณ์แล้วได้ หลังจากเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยใช้แผนภูมิการไหล (Flow Chart) หลังจากนั้นจึงทำการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ซึ่งมี 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ซึ่งเป็นแบบจำลองสถานการณ์อย่างง่าย ใช้ความรู้ด้าน CPM และเทคนิคการจำลองสถานการณ์ Monte Carlo Simulation ก็สามารถพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ประเภทนี้ได้ สำหรับแบบจำลองสถานการณ์ประเภทที่ 2 ที่พัฒนาขึ้นมาเป็นแบบจำลองสถานการณ์ที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงกว่าประเภทแรก ได้แก่ แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ในขั้นแรกจะนำความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากแผนภูมิการไหล ข้อมูลโครงการ และพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ประเมินค่าโดยใช้ฐานนิยมของโครงการที่ศึกษามาสร้างแบบจำลองเบื้องต้นในรูปแบบผังโครงข่ายกำหนดเวลาแบบ Time Scale Arrow Network ณ ตำแหน่งก่อสร้างต่างๆ ที่มีการใช้ทรัพยากรแตกต่างกันเพื่อแสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และตรวจสอบความถูกต้องตามหลักตรรกะของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ หลังจากนั้นจึงนำโปรแกรม ProbSched ซึ่งเป็นโปรแกรมเสริมของโปรแกรม Stroboscope มาสร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวในรูปแบบผังโครงข่าย Precedence Network ที่มีรายละเอียดขั้นตอนการก่อสร้างและตำแหน่งก่อสร้างเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้น โดยคำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม ProbSched นั้นจะเป็นคำสั่งรูปแบบเดียวกับที่ใช้ในโปรแกรม Stroboscope ขั้นตอนต่อไปจะนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวไปใช้ประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ (Advance Rate) อย่างหยาบเพื่อวิเคราะห์โครงการในขั้นต้นด้วยวิธี Deterministic และ Probabilistic ตามลำดับ สำหรับพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้นั้นในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic จะใช้พารามิเตอร์นำเข้าที่ประเมินค่าโดยใช้ฐานนิยมเช่นเดียวกับแบบจำลองเบื้องต้น และในกรณีที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic นั้นจะใช้พารามิเตอร์นำเข้าที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงของข้อมูลร่วมกับการใช้ PERT ทำการประเมินค่า

การพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ขั้นแรกจะทำการสร้างผังโครงข่ายเพื่อใช้แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยลักษณะของผังโครงข่ายจะประกอบด้วยสัญลักษณ์ของแบบจำลองสถานการณ์ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork, Queue และ Link ต่อมาจึงนำข้อมูลโครงการและพารามิเตอร์นำเข้าระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการที่ศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลร่วมกับการประเมินค่าโดยใช้ PERT มาสร้างชุดคำสั่งโดยใช้โปรแกรม Stroboscope สำหรับเหตุผลที่เลือกใช้โปรแกรม Stroboscope นั้นเนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวเป็นโปรแกรมประเภท General Purpose Simulation Programming Language ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อการจำลองกระบวนการก่อสร้างที่มีความซับซ้อนและถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดยเฉพาะ และเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองสถานการณ์งานวิจัยนี้จึงได้แบ่งกลุ่มชุดคำสั่งออกเป็น 10 กลุ่มตามหน้าที่การทำงาน ได้แก่

- **Resource and Decision Parameters** ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับการจัดเก็บข้อมูลของโครงการเพื่อใช้จัดสรรทรัพยากรและวางแผนงานโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น ชนิดและจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดโครงการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น

- **Auxiliary Parameters** ใช้สร้างพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลและสมการที่ใช้คำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์

- **Resource Types** ใช้สร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ มี 2 ประเภทได้แก่ Generic Resource Type และ Characterized Resource Type

- **Network Nodes** ใช้สร้างพารามิเตอร์ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ตามผังโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ โดยแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์จะแสดงด้วยสัญลักษณ์แบบจำลองสถานการณ์ของโปรแกรม Stroboscope ที่ใช้แทนขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ ได้แก่ Normal, Combi, Consolidator, Fork และ Queue

- **Network Links** ใช้ระบุความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ตามผังโครงข่ายที่ได้ออกแบบไว้ และใช้ระบุทรัพยากรที่ไหลผ่าน Link

- **General Section of the Tunneling Simulation** ใช้ควบคุมการทำงานทั่วไปภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เพื่อให้มีความถูกต้องตามหลักตรรกะและ

วิธีการก่อสร้างอุโมงค์ เช่น การกำหนดความสำคัญของขั้นตอนการทำงานภายในแบบจำลองสถานการณ์ในกรณีที่มีการแย่งชิงทรัพยากรชนิดเดียวกัน การควบคุมกฎการทำงาน ในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ เป็นต้น

- **Specific Section of the Tunneling Simulation** ใช้ควบคุมการทำงานที่ได้จัดกลุ่มเป็นกลุ่มย่อยตามความเหมาะสมในแต่ละโครงการก่อสร้างอุโมงค์ โดยกลุ่มชุดคำสั่งกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างการทำงานแตกต่างกันในแต่ละโครงการก่อสร้างอุโมงค์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแผนงานก่อสร้างในแต่ละโครงการ เช่น กลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการทำงานของกระบวนการสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ กลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการทำงานของขบวนรถจักรและหัวรถจักร และกลุ่มชุดคำสั่งย่อยควบคุมการจัดตำแหน่งของรางพัก เป็นต้น
- **Tunneling Durations** ใช้กำหนดระยะเวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์
- **QUEUE Initialization and Simulating** ใช้กำหนดจำนวนรอบสำหรับการจำลองสถานการณ์ ตั้งค่าเริ่มต้นจำนวนทรัพยากรที่อยู่ใน Queue และระบุเงื่อนไขสิ้นสุดการจำลองสถานการณ์
- **Printing Results** ใช้กำหนดให้แบบจำลองสถานการณ์แสดงผลลัพธ์ที่ได้

หลังจากพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยขั้นตอนต่อไปจะต้องทำการตรวจสอบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์ซึ่งมี 2 ขั้นตอนคือ การตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) เป็นการพิจารณาถึงพฤติกรรมของแบบจำลองสถานการณ์ว่าตรงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ และการทดสอบความถูกต้อง (Validation) เป็นการสร้างความเชื่อมั่นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์สามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้โดยใช้วิธีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) ทำการทดสอบ

แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้นมาทั้ง 2 ประเภทมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน โดยแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model เป็นแบบจำลองที่สร้างได้ง่ายแต่สามารถวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของกระบวนการก่อสร้างได้ดีกว่าวิธี Deterministic ทั่วไป อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของแบบจำลองสถานการณ์ประเภทนี้คือ ต้องสร้างแบบจำลองขึ้นมาหลายแบบจำลองเพื่อที่จะอธิบาย

กระบวนการก่อสร้างหนึ่งๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าแบบจำลองประเภทดังกล่าวไม่ค่อยยืดหยุ่นค่อนข้างตายตัว ดังนั้นผู้พัฒนาจึงต้องออกแบบโดยคำนึงถึงสถานะของระบบและจัดสรรทรัพยากรที่ใช้ในระบบ ณ ขณะนั้นด้วยตัวเอง สำหรับแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model นั้นเป็นแบบจำลองสถานการณ์ที่มีความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองสถานการณ์ประเภทแรกแต่ก็ทำการพัฒนาได้ยากกว่าเช่นกัน เนื่องจากผู้พัฒนาต้องศึกษาการใช้โปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองสถานการณ์ประเภทนี้โดยเฉพาะ

การนำเอาขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ก่อสร้างอุโมงค์ที่กล่าวมาข้างต้นไปใช้กับโครงการกรณีศึกษา งานวิจัยนี้ได้ใช้โครงการก่อสร้างอุโมงค์ระบายน้ำคลองแสนแสบและคลองลาดพร้าวลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา ของสำนักการระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร ก่อสร้างโดยใช้เครื่องจักรกลขุดเจาะอุโมงค์ที่เรียกว่า Tunnel Boring Machine (TBM) ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบความดันดินสมดุลที่เรียกว่าระบบ Earth Pressure Balance (EPB) เป็นโครงการกรณีศึกษา โดยจัดกลุ่มข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้เป็น 5 กลุ่มตามแหล่งข้อมูล ได้แก่

(1) ข้อมูลจากเอกสารด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา เป็นข้อมูลองค์ประกอบของระบบการก่อสร้างอุโมงค์โดยจะนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ให้มีความถูกต้องและมีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับระบบจริงมากที่สุด

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา

(4) ข้อมูลจากจากสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ EPB ทำการสัมภาษณ์เพื่อวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอนจากความสามารถในการทำงานในแต่ละขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์โดยมีสมมติฐานว่าข้อมูลที่ได้จากวิศวกรแต่ละท่านมีความน่าเชื่อถือเท่ากัน

ผลที่ได้จากการนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาที่พัฒนาขึ้นมาไปทดสอบความแม่นยำของการประมาณค่าอัตราการก่อสร้างอุโมงค์โดยทำการเปรียบเทียบอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์กับอัตราการก่อสร้าง

อุโมงค์ที่เกิดขึ้นจริงภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดเดียวกันที่ตำแหน่งก่อสร้าง 173.078 เมตร ถึง 1,606.429 เมตรจากต้นอุโมงค์ด้วยวิธี MAPE พบว่าแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ให้ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 10.27 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง ในขณะที่อัตราการก่อสร้างจริงมีค่าเท่ากับ 9.53 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และมีค่า MAPE เท่ากับ 7.86% นั่นคือมีค่าแตกต่างจากอัตราการก่อสร้างจริงของโครงการ 7.86% สำหรับแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Probabilistic มีค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 12.82 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง มีค่า MAPE 34.52% และวิเคราะห์ด้วยวิธี Deterministic มีค่าประมาณ 13.50 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง มีค่า MAPE 41.66% ในขณะที่วิธีการวิเคราะห์ของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษาซึ่งเป็นวิธี Deterministic ที่นำเอาขั้นตอนการก่อสร้างบางขั้นตอนมาใช้ในการวิเคราะห์นั้นมีค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าจริงน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 13.71 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และมีค่า MAPE 43.86% อย่างไรก็ตาม MAPE เป็นเพียงวิธีทดสอบเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดความแม่นยำวิธีหนึ่งเท่านั้นยังไม่อาจสรุปได้ว่าวิธีที่ให้ค่าประมาณใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดหรือมีค่า MAPE น้อยที่สุดจะเป็นวิธีประมาณค่าที่ดีที่สุดเสมอไป

การนำแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ไปใช้วิเคราะห์โครงการกรณีศึกษาเพื่อประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์พบว่าได้ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ 258 วัน ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างต่ำสุด 253 วัน และสูงสุด 266 วัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.93 วัน สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM กับอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ พบว่าเมื่อประสิทธิภาพการขุดเจาะของ TBM ลดลงจากเดิม 15% ทำให้ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างเพิ่มขึ้น 8 วัน คิดเป็น +3.10% จากค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างเดิมของโครงการ และเมื่อประสิทธิภาพการขุดเจาะของ TBM เพิ่มขึ้นจากเดิม 15% ทำให้ค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างลดลง 4 วัน คิดเป็น -1.55% จากค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างเดิมของโครงการ และจากการวิเคราะห์ค่าเวลาสูญเปล่าของ TBM และขบวนรถจักร พบว่าเวลาสูญเปล่าของ TBM ที่เกิดจากการรอขบวนรถจักรเดินทางมาที่หน้าอุโมงค์ที่ตำแหน่งก่อสร้างปลายอุโมงค์มีค่าค่อนข้างสูงทั้งนี้อาจเกิดจากการจัดตำแหน่งรางพักไม่เหมาะสม จำนวนรางพักที่ใช้เมื่อก่อสร้างที่ตำแหน่งปลายอุโมงค์ไม่เพียงพอ หรือขบวนรถจักรที่ใช้มีจำนวนไม่เพียงพอ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงการทำงานของโครงการกรณีศึกษาโดยการจัดกลุ่ม

คนงานที่มีหน้าที่บำรุงรักษารางและรางพักโดยเฉพาะเพื่อลดโอกาสที่ขบวนรถจักรตกรางซึ่งมีสมมติฐานว่าการจัดกลุ่มคนงานดังกล่าวทำให้โอกาสที่ขบวนรถจักรตกรางลดลงจากเดิม 50% พบว่าได้ค่าประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์ 9.73 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.14 เมตร/ผลัด 12 ชั่วโมง และค่าประมาณระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ 254 วัน ลดลงจากเดิม 4 วัน นั่นคือทำให้อัตราการก่อสร้างอุโมงค์เพิ่มขึ้น 1.46% และลดระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ลง 1.55%

การวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกโดยใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ได้ใช้โครงการกรณีศึกษาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอ มีแนวทางนำเสนอทั้งหมด 4 แนวทาง โดยแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 1 เป็นการวางแผนอย่างง่ายเพื่อใช้เปรียบเทียบกับแผนงานอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่า แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 2 นำเสนอการทดลองใช้แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภทดังกล่าวในการวางแผนงานก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ ในขณะที่แผนงานก่อสร้างอุโมงค์ทางเลือกที่ 3 และ 4 เป็นแผนงานที่นำเสนอการปรับปรุงแผนงานในช่วงระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์โดยการจัดสรรทรัพยากรจากแผนงานเดิมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ถึงข้อดีและข้อจำกัดจากการนำแนวทางนั้นๆ ไปดำเนินการจริงซึ่งจะทำให้การตัดสินใจมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรมีการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ให้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานั้นยังมีข้อจำกัดในส่วนของพารามิเตอร์นำเข้าขั้นตอนการก่อสร้างที่อยู่ภายในอุโมงค์ซึ่งได้มาจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่เป็นวิศวกรของบริษัทก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา ดังนั้นหากสามารถทำการเก็บข้อมูลสถิติการทำงานภายในอุโมงค์จากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานจริงได้จะทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

(2) ข้อมูลเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์บางเหตุการณ์เท่านั้น เนื่องจากการเก็บข้อมูลเหตุการณ์ดังกล่าวให้ครอบคลุมทั้งหมดนั้นต้องใช้เวลาในการเก็บรวบรวมค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการเก็บรวบรวมข้อมูลในส่วนนี้เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ต่อไปในอนาคต

(3) แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ที่ได้จากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในส่วนของกิจกรรมการก่อสร้างอุโมงค์เท่านั้นไม่รวมกิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น กิจกรรมการจัดเตรียมพื้นที่ก่อสร้าง กิจกรรมการก่อสร้างปล่องขนถ่ายดินและปล่องระบายอากาศ และกิจกรรมการติดตั้งระบบสนับสนุนการใช้งานอุโมงค์ เป็นต้น ดังนั้นจึงควรเพิ่มรายละเอียดของแบบจำลองในส่วนอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ได้อย่างสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ แสงอาทิตย์, มิ่งศักดิ์ แสงวิไลพร และนริศ จันทราธรรมชาติ. (2541). เทคนิคการขุดเจาะอุโมงค์ของโครงการรถไฟฟ้ามหานครระยะแรก. ใน โครงงานทางวิศวกรรมโยธาประจำปีการศึกษา 2541, หน้า 171-178. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คมกฤษณ์ จิระสวัสดิ์. (2546). แบบจำลองสถานการณ์เพื่อวิเคราะห์การขนส่งอ้อยจากไร่เข้าสู่โรงงานน้ำตาล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิรวัฒน์ ดำริห์อนันต์ และศิวกร พ่วงพูล. (2548). แนวทางและอุปสรรคในการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองสถานการณ์งานก่อสร้าง: กรณีศึกษาเขื่อนคลองท่าด่าน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10 หน้า CEM~29-CEM~34.

ชินวุฒิ ชาญฉายา. (2543). การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของชั้นดินกรุงเทพฯ เนื่องจากการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดินโดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ถาวร แก้วญานะ และบารมินทร์ เจริญพานิช. (2544). การสำรวจเพื่อการก่อสร้างอุโมงค์รถไฟฟ้าใต้ดิน. การประชุมวิชาการเรื่องการออกแบบและก่อสร้างงานโยธาระบบรถไฟฟ้าใต้ดินโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล หน้า 124-146.

บุรินทร์ ทั้งไพศาล. (2544). แบบจำลองสถานการณ์เพื่อการจัดการการกระจายสินค้าในคลังสินค้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บุญเทพ นาเนกรังสรรค์. (2543). Development of Shield Tunneling and Microtunneling. การสัมมนาเรื่อง Tunneling and Microtunneling Technology, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 11-41.

ภาษาอังกฤษ

AbouRizk, S. M., and Shi, J. (1994). Automated Construction-Simulation Optimization. Journal of Construction Engineering and Management 120: 374-385.

AbouRizk, S. M., Manavazhi, M., and Dozzi, P. (1997). Analysis of Productivity on a Tunnel Operation Using Computer Simulation. Construction Congress V: 382-388.

AbouRizk, S. M., and Dozzi, P. (1993). Application of Computer Simulation in Resolving Construction Disputes. Journal of Construction Engineering and Management 119: 355-373.

Chua David, K.H., and Li, G. M., (2001). Modeling Construction Operations with RISim. Journal of Computing in Civil Engineering 15: 320-328.

El-Choum, M. K., and Rumala, S. (1997). A Conceptual Model for Controlling Underground Construction Project. Construction Congress V: 338-347.

Farid, F., and Koning, T. L. (1994). Simulation Verifies Queuing Program for Selecting Loader-Truck Fleets. Journal of Construction Engineering and Management 120: 386-404.

Fernando, S., Er, K. C., Mohamed, Y., AbouRizk, S. M., and Ruwanpura, j. Ruwanpura. (2003). A Review of Simulation Applications for Varying Demands in Tunneling. [CD-ROM]. Virginia: ASCE. Construction Research Congress.

Halpin, D. W. (1990a). MicroCYCLONE user's manual. West Lafayette, IN: Division of Construction Engineering and Management, Purdue University. Cited in Gonzalez-Quevedo, A. A., AbouRizk, S. M., Iseley, D. T., and Halpin, D. W. (1993). Comparison of Two Simulation Methodologies in Construction. Journal of Construction Engineering and Management 119: 573-589.

Hijazi, A. M., AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W. (1992). Modeling and Simulating Learning Development in Construction. Journal of Construction Engineering and Management 118: 685-700.

Kim, K. J., and Gibson, G. E., Jr. (2003). Interactive Simulation Modeling for Heavy Construction Operations. Journal of Automation in Construction 12: 97-109.

Law, A. M., and Kelton, D.K. (1991). Simulation Modeling and Analysis. 2 nd ed. New York: McGraw-Hill. Cited in Martinez, J. C. (1996). State and Resource Based Simulation of Construction Process. Doctoral Dissertation. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Michigan.

Lutz, J. D., Halpin, D. W., and Wilson, J. R. (1994). Simulation of Learning Development in Repetitive Construction. Journal of Construction Engineering And Management 120: 753-773.

Martinez, J. C. (1996). State and Resource Based Simulation of Construction Process. Doctoral Dissertation. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Michigan.

Nido, A. A., and Abraham, D. M. (2000). Microtunneling: Productivity Analysis Using Simulation. Construction Congress VI: 76-86.

Runwanpura, J. Y., AbouRizk, S. M., Er, K. C., and Fernando, S. (2000). Special Purpose Simulation Templates for Tunneling. Construction Congress VI: 97-106.

Tommelein, I. D., Carr, R. I., and Odeh, A. M. (1994). Assembly of Simulation Networks Using Designs, Plans and Method. Journal of Construction Engineering and Management 120: 796-815.

Vanegas, J. A., Bravo, E. B., and Halpin, D. W. (1993). Simulation Technologies for Planning Heavy Construction Process. Journal of Construction Engineering and Management 119: 336-354.

Veerasak Likhitruangsilp, and Ioannou, P. G. (2003). Stochastic Evaluation of Tunneling Performance Using Discrete-Event Simulation. [CD-ROM]. Virginia: ASCE. Construction Research Congress.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรและการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การจับเวลาขั้นตอนการทำงานของโครงการกรณีศึกษาได้ทำการจับเวลาเฉพาะขั้นตอนการทำงานที่อยู่บนพื้นดินและที่ปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์มี 3 ขั้นตอน ได้แก่ การนำดินไปทิ้ง การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) ชุดใหม่ การติดตั้งและถอดหัวรถจักร (Locomotive) ออกจากขบวนรถจักร สำหรับการวิเคราะห์หาค่าการแจกแจงของข้อมูลจะใช้การทดสอบสมมติฐานด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่า Goodness of Fit Test โดยใช้วิธีการทดสอบ Chi-Square ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% มีรายละเอียดดังนี้

1. การนำดินไปทิ้ง

การนำดินไปทิ้งประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 4 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การยึดและดึงรถขนถ่ายดิน (Muck Car) ขึ้นมาจากใต้อุโมงค์ (2) การนำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง (3) การนำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน และ (4) การนำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์ สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ต้องการศึกษาในแต่ละขั้นตอนย่อยของการนำดินไปทิ้งแสดงในตารางที่ ก.1 ได้ใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% หากจำนวนกลุ่มตัวอย่างน้อยที่สุดที่ต้องทำการจัดเก็บน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้แสดงว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ดังกล่าวมีจำนวนเพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ศึกษาได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลได้ใช้สมการที่ 4.2 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.1 การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรของขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	
		จำนวนน้อยที่สุดที่ต้องการ	จำนวนที่ใช้
การยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์	MuckCar_ToGround	106	106
การนำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง	MuckCar_ToUnloadSoil	103	106

ตารางที่ ก.1 การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรของขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง (ต่อ)

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	
		จำนวนน้อยที่สุดที่ต้องการ	จำนวนที่ใช้
การนำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน	MuckCar_ToShaft	92	106
การนำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์	MuckCar_ToUnderGround	104	106

1.1 การยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
MuckCar_ToGround	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 2.32 S.D. = 0.60	1	26.1142	0.0000
	เอกรูป (Uniform)	Min = 1.77 Max = 5.57	5	294.6038	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.43	4	43.3124	0.0000
	แกมม่า	α = 20.1609 β = 0.1153	1	25.3025	0.0000
	เบต้า	α = 8.0355 β = 11.0967	1	25.6799	0.0000

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ยึดและดึงขบวนรถจักรขึ้นมา พบว่ามีการแจกแจงแตกต่างจากการแจกแจงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การแจกแจงปกติ (Normal Distribution) การแจกแจงเอกรูป (Uniform Distribution) การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ที่กำหนด ดังนั้นจะใช้ PERT (Program Evaluation and Review Technique) ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าของข้อมูลดังกล่าว

1.2 การนำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้งแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
MuckCar_ToUnloadSoil	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 1.80 S.D. = 0.46	1	4.5431	0.0331
	เอกรูป (Uniform)	Min = 1.22 Max = 3.60	3	97.7736	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.56	3	201.5606	0.0000
	แกมม่า	α = 18.9531 β = 0.0951	1	1.7923	0.1806
	เบต้า	α = 7.2528 β = 7.2384	1	3.7587	0.0525

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงแกมม่าและการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงแกมม่ามากกว่า

การแจกแจงเบต้าเนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงแกมม่าในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

1.3 การนำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.4 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.4 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
MuckCar_ToShaft	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 0.71 S.D. = 0.17	3	1.3657	0.7136
	เอกรูป (Uniform)	Min = 0.40 Max = 1.35	5	58.3774	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 1.41	4	187.9940	0.0000
	แกมม่า	α = 18.0320 β = 0.0394	3	3.7791	0.2863
	เบต้า	α = 7.6341 β = 6.8545	2	2.8390	0.2418

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงปกติ การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติมากกว่าการแจกแจงแกมม่าและการแจกแจงเบต้าเนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงปกติในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

1.4 การนำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.5 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.5 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
MuckCar_ToUnderGround	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 1.81 S.D. = 0.46	1	17.7372	0.0000
	เอกรูป (Uniform)	Min = 1.20 Max = 4.40	5	202.0755	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.55	4	232.4251	0.0000
	แกมม่า	α = 21.0562 β = 0.0858	1	11.3205	0.0008
	เบต้า	α = 7.7866 β = 11.2051	1	46.9151	0.0000

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์ พบว่ามีการแจกแจงแตกต่างจากการแจกแจงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การแจกแจงปกติ การแจกแจงเอกรูป การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้า อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นจะใช้ PERT ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าของข้อมูลดังกล่าว

2. การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่

การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) Gantry Crane เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ (2) Gantry Crane นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน และ (3) Gantry Crane หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car) สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ต้องการศึกษาในแต่ละขั้นตอนย่อยของการบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่แสดงในตารางที่ ก.6 ได้ใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% หากจำนวนกลุ่มตัวอย่างน้อยที่สุดที่ต้องทำการจัดเก็บน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้แสดงว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ดังกล่าวมีจำนวนเพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ศึกษาได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลได้ใช้สมการที่ 4.2 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.6 การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรของขั้นตอนการบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	
		จำนวนน้อยที่สุดที่ต้องการ	จำนวนที่ใช้
Gantry Crane เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ	Load_SL	76	80
Gantry Crane นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน	SL_ToShaft	78	80
Gantry Crane หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์	SL_ToUnderGround	79	80

2.1 Gantry Crane เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.7 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.7 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
Load_SL	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 4.51 S.D. = 0.98	1	5.3379	0.0209
	เอกรูป (Uniform)	Min = 2.83 Max = 8.73	3	85.3000	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.22	3	232.6983	0.0000
	แกมม่า	α = 22.9853 β = 0.1960	1	3.1421	0.0763
	เบต้า	α = 9.6263 β = 9.0244	1	6.5063	0.0108

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงแกมม่าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงแกมม่าในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

2.2 Gantry Crane นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดินแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.8 มีรายละเอียดดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
SL_ToShaft	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 1.51 S.D. = 0.33	1	23.3347	0.0000
	เอกรูป (Uniform)	Min = 0.58 Max = 2.62	3	124.7511	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.66	3	309.7393	0.0000
	แกมม่า	α = 20.5183 β = 0.0736	1	19.5580	0.0001
	เบต้า	α = 7.7802 β = 5.6340	1	26.3333	0.0000

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน พบว่ามีการแจกแจงแตกต่างจากการแจกแจงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การแจกแจงปกติ การแจกแจงเอกรูป การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นจะใช้ PERT ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าของข้อมูลดังกล่าว

2.3 Gantry Crane หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์แสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.9 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.9 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
SL_ToUnderGround	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 1.86 S.D. = 0.41	1	2.6152	0.1058
	เอกรูป (Uniform)	Min = 1.37 Max = 4.05	5	120.4000	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 0.54	3	130.3830	0.0000
	แกมม่า	α = 25.3571 β = 0.0735	1	1.2515	0.2633
	เบต้า	α = 10.4316 β = 12.2504	1	2.6658	0.1031

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ Gantry Crane ใช้หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงปกติ การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงแกมม่ามากกว่าการแจกแจงปกติและการแจกแจงเบต้า เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงแกมม่าในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

3. การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร

การติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรประกอบด้วยพารามิเตอร์นำเข้าเวลาที่ใช้ในการทำงาน 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การติดตั้งหัวรถจักร (2) การถอดหัวรถจักร และ (3) การนำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter) สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ต้องการศึกษาในแต่ละขั้นตอนย่อยของการติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรแสดงในตารางที่ ก.10 ได้ใช้สมการที่ 4.1 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน $\pm$ 5% หากจำนวนกลุ่มตัวอย่างน้อยที่สุดที่ต้องทำการจัดเก็บน้อยกว่า

หรือเท่ากับจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้แสดงว่าจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ดังกล่าวมีจำนวนเพียงพอสำหรับใช้เป็นตัวแทนของประชากรที่ศึกษาได้ สำหรับการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลได้ใช้สมการ ที่ 4.2 ทำการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ± 5% มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.10 การวิเคราะห์จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวแทนประชากรของขั้นตอนการติดตั้งและถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร

ขั้นตอนย่อย	พารามิเตอร์นำเข้า	จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	
		จำนวนน้อยที่สุดที่ต้องการ	จำนวนที่ใช้
การติดตั้งหัวรถจักร	Inst_Loco	116	118
การถอดหัวรถจักร	Release_Loco	116	118
การนำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร	CarShifter_Operate	116	118

3.1 การติดตั้งหัวรถจักร

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักรแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.11 มีรายละเอียดดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.11 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักร

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
Inst_Loco	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 0.38 S.D. = 0.10	2	20.5401	0.0000
	เอกรูป (Uniform)	Min = 0.23 Max = 0.77	4	112.5254	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 2.64	4	243.8233	0.0000
	แกมม่า	α = 16.2034 β = 0.0234	2	12.9937	0.0015
	เบต้า	α = 6.4335 β = 6.6436	2	22.5889	0.0000

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักร พบว่ามีการแจกแจงแตกต่างจากการแจกแจงที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การแจกแจงปกติ การแจกแจงเอกรูป การแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียล การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้า อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นจะใช้ PERT ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าของข้อมูลดังกล่าว

3.2 การถอดหัวรถจักร

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักรแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.12 มีรายละเอียดดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.12 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักร

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
Release_Loco	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 0.34 S.D. = 0.09	3	2.8436	0.4164
	เอกรูป (Uniform)	Min = 0.10 Max = 0.55	4	45.6102	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 2.96	5	217.0585	0.0000
	แกมม่า	α = 12.0473 β = 0.0280	3	5.5249	0.1372
	เบต้า	α = 4.6709 β = 2.9342	2	3.9749	0.1370

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักร พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงปกติ การแจกแจงแกมม่า และการแจกแจงเบต้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด โดยข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะการแจกแจงใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติมากกว่าการแจกแจงแกมม่าและการแจกแจงเบต้าเนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงปกติในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

3.3 การนำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร

การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือนำออกมาจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรแสดงผลลัพธ์ที่ได้ในตารางที่ ก.13 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.13 การวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร

พารามิเตอร์นำเข้า	ชนิดของการแจกแจง	พารามิเตอร์	d.f.	χ^2	P-Value
CarShifter_Operate	ปกติ (Normal)	$\overline{X}$ = 0.26 S.D. = 0.07	3	14.2410	0.0026
	เอกรูป (Uniform)	Min = 0.15 Max = 0.47	4	68.6271	0.0000
	เอ็กซ์โปเนนเชียล	λ = 3.87	4	250.5571	0.0000
	แกมม่า	α = 14.9916 β = 0.0173	3	6.5750	0.0868
	เบต้า	α = 5.6140 β = 4.5843	2	15.2592	0.0005

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการแจกแจงข้อมูลเวลาที่ใช้นำหัวรถจักรไปติดตั้งหรือถอดออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร พบว่ามีการแจกแจงไม่แตกต่างจากการแจกแจงแกมม่าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด ดังนั้นจึงใช้การแจกแจงแกมม่าในการประเมินค่าพารามิเตอร์นำเข้าดังกล่าว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
พารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดของพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษาประกอบด้วย ความหมายของพารามิเตอร์นำเข้า ค่าของพารามิเตอร์นำเข้า และสมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลโครงการกรณีศึกษาในบทที่ 5 แสดงในตารางที่ ข.1 ถึง ข.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
มิติรางพัก	
StrLengthWaitingRail	ความยาวช่วงทางตรง
YLengthWaitingRail	ความยาวช่วงตัว Y
มิติขบวนรถจักร	
TrainLength	ความยาวขบวนรถจักร
อัตราเร็วขบวนรถจักร	
SlowTrainSpeed	อัตราเร็วสำหรับการเข้าและออกจากรางพัก
TrainSpeed	อัตราเร็วปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์	
CurYRail_DRailDst	ระยะเคลื่อนที่ระหว่างรางพักรูปตัว Y (YRail) กับรางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Double Rail (DRail)
CurDRail_MRailDst	ระยะเคลื่อนที่ระหว่างรางพัก DRail กับรางพักชนิดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Movable Type Double Rail (MRail)
IntoYRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก YRail ที่ปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์
IntoDRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก DRail
IntoMRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก MRail
OutofShaftDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
OutofDRailDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากรางพัก DRail
OutofMRailDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากรางพัก MRail
ToTunnelDst	ระยะเคลื่อนที่ไปหน้าอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
TBM_Excavate**z**	เวลาที่ใช้ขุดเจาะอุโมงค์และส่งดินให้รถขนถ่ายดิน (Muck Car) รอบที่ **z**
ExcLength	ระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบของ Tunnel Boring Machine (TBM)
ExcRate	อัตราขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM
TBM_InspectSL**z**	เวลาที่ใช้ตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) รอบที่ **z** หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย
TBM_InstallSL**z**	เวลาที่ใช้ติดตั้งดาดผนังอุโมงค์รอบที่ **z**
PrepareToInst	เวลาที่ใช้เตรียมการประกอบดาดผนังอุโมงค์
Inst_InvertSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Invert Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_LeftSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Left Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_RightSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Right Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_CrownSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Crown Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_KeySL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Key Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
T**x**R**y**_IntoDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ **x** รอบที่ **y** ใช้เข้าไปในรางพัก DRail
T**x**R**y**_IntoMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ **x** รอบที่ **y** ใช้เข้าไปในรางพัก MRail

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
TxRy_LoadSL	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้บรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
Load_SL	เวลาที่ Gantry Crane ใช้เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ
SL_ToShaft	เวลาที่ Gantry Crane ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน
SL_ToUnderGround	เวลาที่ Gantry Crane ใช้หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car)
TxRy_LoadSoil	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้รับดินจากสายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor)
TxRy_LocoIn	เวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักร (Locomotive) เข้าไปในขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y
CarShifter_Operate	เวลาที่ใช้นำหัวรถจักรไปติดตั้งในขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter)
Inst_Loco	เวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักร
TxRy_LocoOut	เวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y
Release_Loco	เวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักร
CarShifter_Operate	เวลาที่ใช้นำหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร
TxRy_OutofDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้ออกจากรางพัก DRail
TxRy_OutofMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้ออกจากรางพัก MRail
TxRy_OutofShaft	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้ออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
TxRy_ReturnIntoDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับเข้าไปในรางพัก DRail
TxRy_ReturnIntoMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับเข้าไปในรางพัก MRail
TxRy_ReturnOutofDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับออกจากรางพัก DRail
TxRy_ReturnOutofMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับออกจากรางพัก MRail
TxRy_ReturnToDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับไปที่รางพัก DRail
TxRy_ReturnToMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับไปที่รางพัก MRail
TxRy_ReturnToShaft	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
TxRy_ToDRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางไปที่รางพัก DRail
TxRy_ToLoadSoil	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เคลื่อนไปที่สายพานลำเลียงดินเพื่อรอรับดิน ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร
TxRy_ToMRail	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางไปที่รางพัก MRail
TxRy_ToTunnel	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เดินทางไปที่หน้าอุโมงค์
HaulToHydraulicSupport	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ x รอบที่ y ใช้เคลื่อนไปที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Support) ด้านหลัง TBM ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร

ตารางที่ ข.1 ความหมายพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
T**x**R**y**_UnloadSL	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ **x** รอบที่ **y** ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ด้านหลัง TBM
T**x**R**y**_UnloadSoil	เวลาที่ขบวนรถจักรที่ **x** รอบที่ **y** ใช้นำดินไปทิ้งที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
MuckCar_ToGround	เวลาที่ใช้ยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์
MuckCar_ToUnloadSoil	เวลาที่ใช้นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง
MuckCarToShaft	เวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน
MuckCar_ToUnderGround	เวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์
W_Extend**z**	เวลาที่คนงานใช้ต่อรางความยาว 5 เมตรสำหรับขบวนรถจักรครั้งที่ **z**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model แสดงในตารางที่ ข.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Deterministic Analysis	Probabilistic Analysis		ที่มา
			ชนิด	ค่า	
มิติรางพัก					
YLengthWaitingRail	เมตร	10.80	ค่าคงที่	10.80	(1)
StrLengthWaitingRail	เมตร	60	ค่าคงที่	60	(1)
มิติขบวนรถจักร					
TrainLength	เมตร	52.40	ค่าคงที่	52.40	(1)
อัตราเร็วขบวนรถจักร					
SlowTrainSpeed	เมตร/นาที	50	PERT	41.67/50/58.33	(1), (5)
TrainSpeed	เมตร/นาที	100	PERT	91.67/100/108.33	(1), (5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Deterministic Analysis	Probabilistic Analysis		ที่มา
			ชนิด	ค่า	
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์					
CurYRail_DRailDst					
แบบจำลองที่ 1-2	เมตร	0	ค่าคงที่	0	(3)
แบบจำลองที่ 3-4	เมตร	686	ค่าคงที่	686	(3)
แบบจำลองที่ 5	เมตร	2,336	ค่าคงที่	2,336	(3)
CurDRail_MRailDst					
แบบจำลองที่ 1-3	เมตร	0	ค่าคงที่	0	(3)
แบบจำลองที่ 4	เมตร	3,316	ค่าคงที่	3,316	(3)
แบบจำลองที่ 5	เมตร	1,666	ค่าคงที่	1,666	(3)
ToTunnelDst					
แบบจำลองที่ 1	เมตร	13.85	ค่าคงที่	13.85	(3)
แบบจำลองที่ 2	เมตร	837.85	ค่าคงที่	837.85	(3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

197

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Deterministic Analysis	Probabilistic Analysis		ที่มา
			ชนิด	ค่า	
แบบจำลองที่ 3	เมตร	1,117.85	ค่าคงที่	1,117.85	(3)
แบบจำลองที่ 4	เมตร	67.85	ค่าคงที่	67.85	(3)
แบบจำลองที่ 5	เมตร	691.45	ค่าคงที่	691.45	(3)
TBM_Excavatez					
ExcLength					
ทางตรง	เมตร	1.20	ค่าคงที่	1.20	(1)
ExcRate					
แบบจำลองที่ 1-4	มิลลิเมตร/นาที	61	PERT	46/61/70	(2)
แบบจำลองที่ 5	มิลลิเมตร/นาที	51	PERT	33/51/70	(2), (5)
TBM_InspectSLz	นาที	3.50	PERT	2.75/3.50/4.75	(5)
TBM_InstallSLz					
PrepareToInst	นาที	7	PERT	5.50/7/8.50	(5)
Inst_InvertSL	นาที	3	PERT	2.25/3/4.75	(5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Deterministic Analysis	Probabilistic Analysis		ที่มา
			ชนิด	ค่า	
Inst_LeftSL	นาที	4.50	PERT	3.50/4.50/6	(5)
Inst_RightSL	นาที	4.50	PERT	3.50/4.50/6	(5)
Inst_CrownSL	นาที	5	PERT	3.75/5/12.50	(5)
Inst_KeySL	นาที	6	PERT	5/6/12.50	(5)
TxRy_LoadSL					
Load_SL	นาที	4.50	แกมม่า (α / β)	22.9853/0.1960	(4)
SL_ToShaft	นาที	1.42	PERT	0.58/1.42/2.62	(4)
SL_ToUnderGround	นาที	1.63	แกมม่า (α / β)	25.3571/0.0735	(4)
TxRy_LocoIn					
CarShifter_Operate	นาที	0.27	แกมม่า (α / β)	14.9916/0.0173	(4)
Inst_Loco	นาที	0.32	PERT	0.23/0.32/0.77	(4)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

199

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Deterministic Analysis	Probabilistic Analysis		ที่มา
			ชนิด	ค่า	
TxRy_LocoOut					
Release_Loco	นาที	0.33	ปกติ (Mean/S.D.)	0.34/0.09	(4)
CarShifter_Operate	นาที	0.27	แกมม่า (α / β)	14.9916/0.0173	(4)
TxRy_ToLoadSoil	นาที	1.50	PERT	0.88/1.50/1.88	(5)
TxRy_ToTunnel					
HaulToHydraulicSupport	นาที	1.50	PERT	0.88/1.50/5.88	(5)
TxRy_UnloadSL	นาที	4.50	PERT	3.50/4.50/6.50	(5)
TxRy_UnloadSoil					
MuckCar_ToGround	นาที	1.93	PERT	1.77/1.93/5.57	(4)
MuckCar_ToUnloadSoil	นาที	2.13	แกมม่า (α / β)	18.9531/0.0951	(4)
MuckCar_ToShaft	นาที	0.60	ปกติ (Mean/S.D.)	0.71/0.17	(4)
MuckCar_ToUnderGround	นาที	1.60	PERT	1.20/1.60/4.40	(4)
W_ExtendRailz	นาที	15	PERT	12/15/20	(5)

แหล่งที่มา

(1) ข้อมูลจากเอกสารทางด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา

(4) ข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรของโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ Earth Pressure Balance (EPB)

สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model แสดงในตารางที่ ข.3 มีรายละเอียดดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์		
IntoYRailDst	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail
IntoDRailDst	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail
IntoMRailDst	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail
OutofShaftDst	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
OutofDRailDst	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
OutofMRailDst	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
TBM_Excavate**z**	นาที	(ExcLength x 1,000)/ExcRate
TBM_InstallSL**z**	นาที	PrepareToInst + Inst_InvertSL + Inst_LeftSL + Inst_RightSL + (Inst_CrownSL x 2) + Inst_KeySL
T**x**R**y**_IntoDRail	นาที	IntoDRailDst/SlowTrainSpeed
T**x**R**y**_IntoMRail	นาที	IntoMRailDst/SlowTrainSpeed
T**x**R**y**_LoadSoil	นาที	TBM_Excavate**z**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
TxRy_LoadSL	นาที	(Load_SL + SL_ToShaft + SL_ToUnderGround) x 2
TxRy_LocoIn	นาที	CarShifter_Operate + Inst_Loco
TxRy_LocoOut	นาที	Release_Loco + CarShifter_Operate
TxRy_OutofDRail	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_OutofMRail	นาที	OutofMRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_OutofShaft	นาที	OutofShaftDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ReturnIntoDRail	นาที	IntoDRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ReturnIntoMRail	นาที	IntoMRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ReturnOutofDRail	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ReturnOutofMRail	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ReturnToDRail		
แบบจำลองที่ 1-2	นาที	-
แบบจำลองที่ 3	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed
แบบจำลองที่ 4-5	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
TxRy_ReturnToMRail		
แบบจำลองที่ 1-3	นาที	-
แบบจำลองที่ 4-5	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed
TxRy_ReturnToShaft		
แบบจำลองที่ 1-2	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed + IntoYRailDst/SlowTrainSpeed
แบบจำลองที่ 3-5	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed + IntoYRailDst/SlowTrainSpeed
TxRy_ToDRail		
แบบจำลองที่ 1-2	นาที	-
แบบจำลองที่ 3-5	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed
TxRy_ToMRail		
แบบจำลองที่ 1-3	นาที	-
แบบจำลองที่ 4-5	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

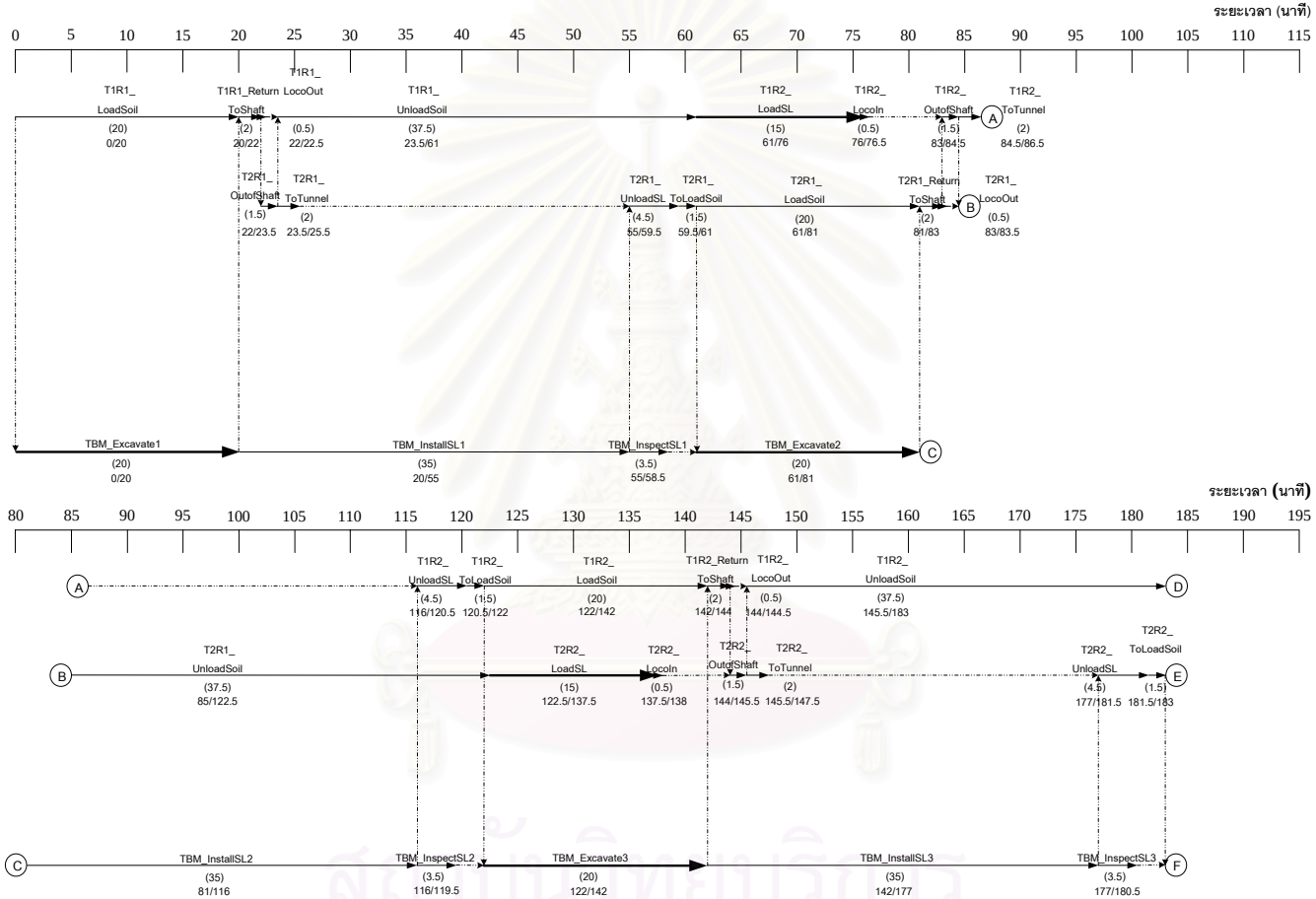
ตารางที่ ข.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model (ต่อ)

พารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
TxRy_ToTunnel แบบจำลองที่ 1-5	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed + HaulToHydraulicSupport
TxRy_UnloadSoil	นาที	(MuckCar_ToGround + MuckCar_ToUnloadSoil + MuckCar_ToShaft + MuckCar_ToUnderGround) x 6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

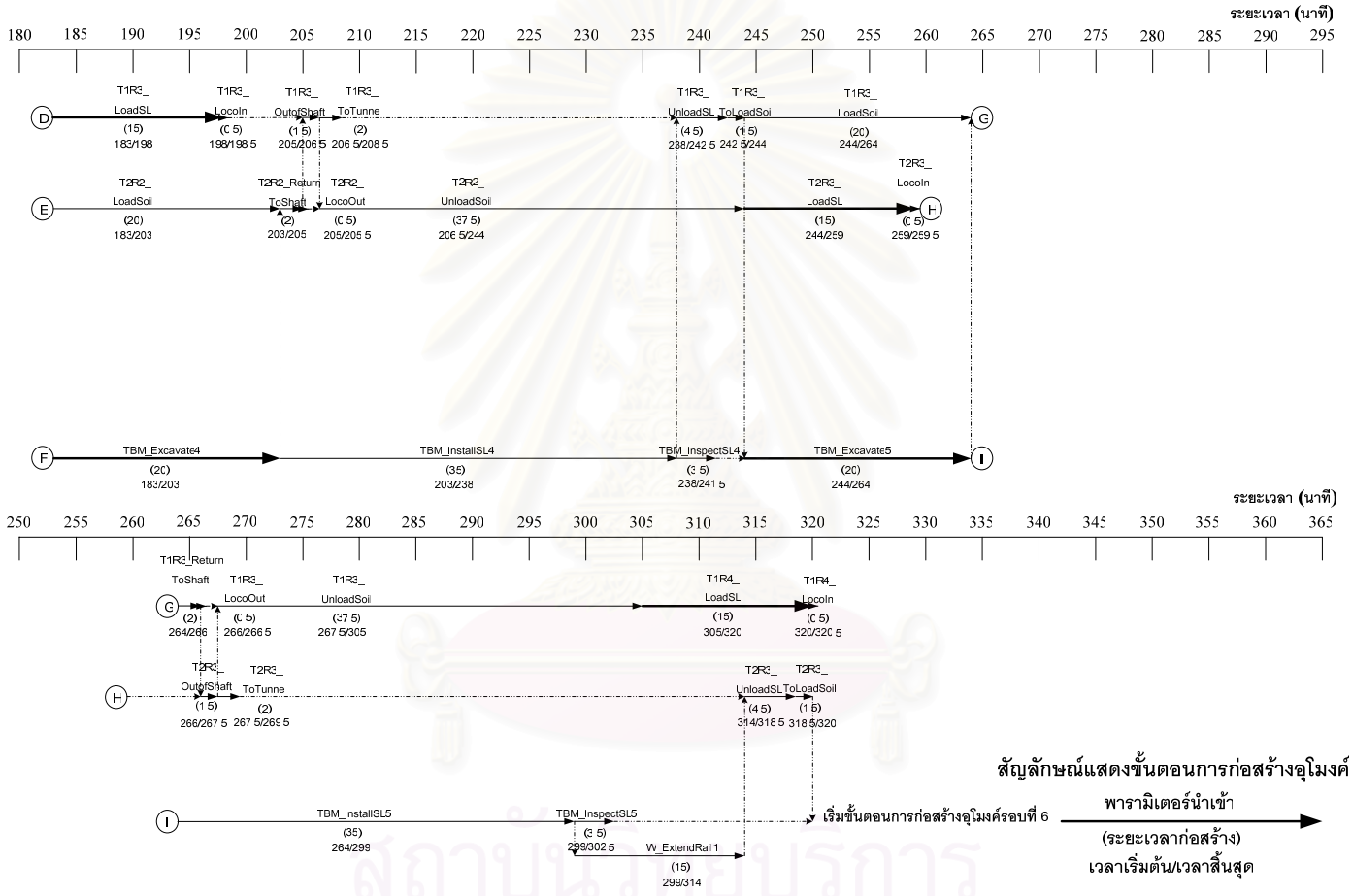
ภาคผนวก ค
แบบจำลองเบื้องต้นและแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



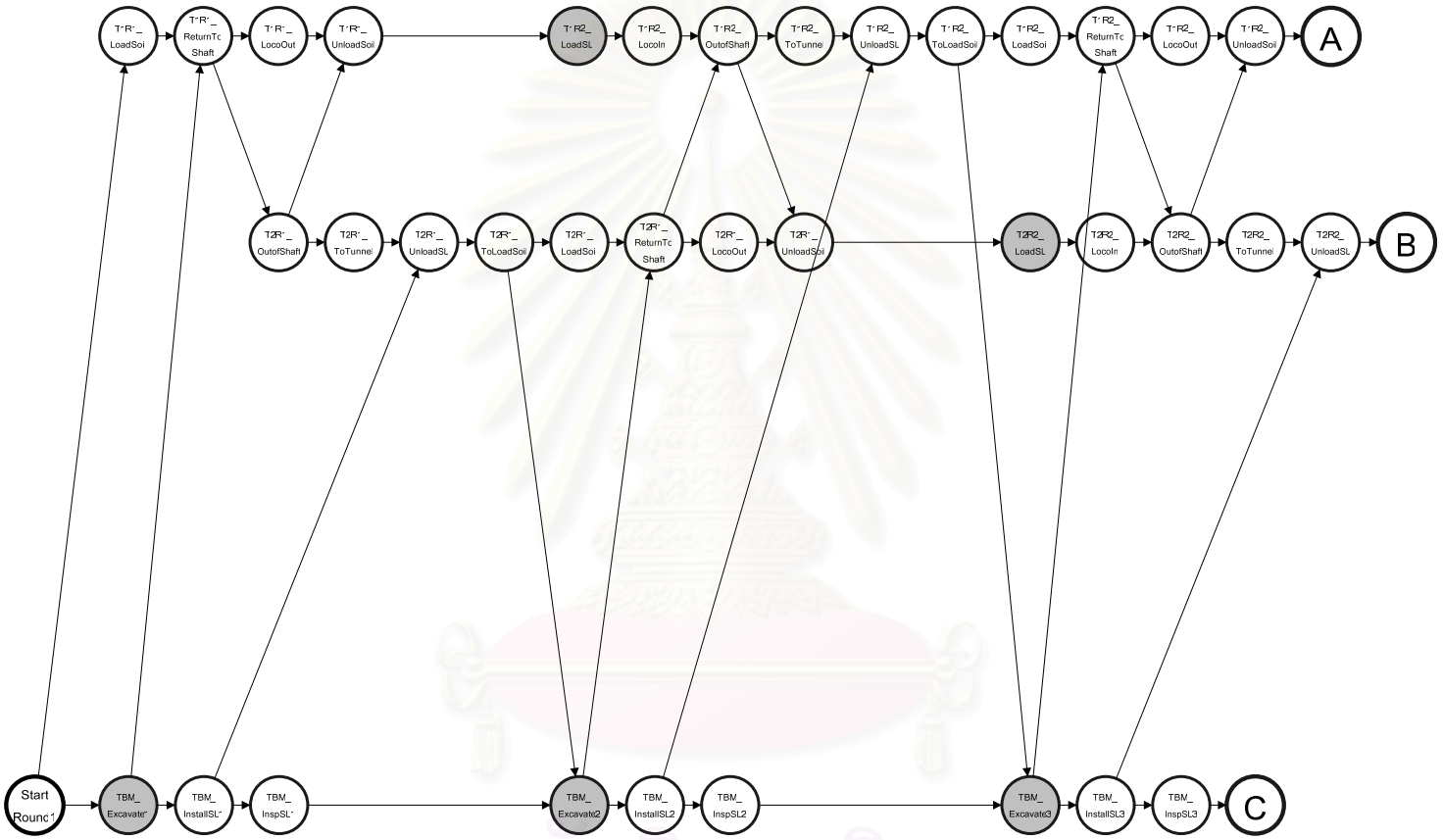
รูปที่ ค.1 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



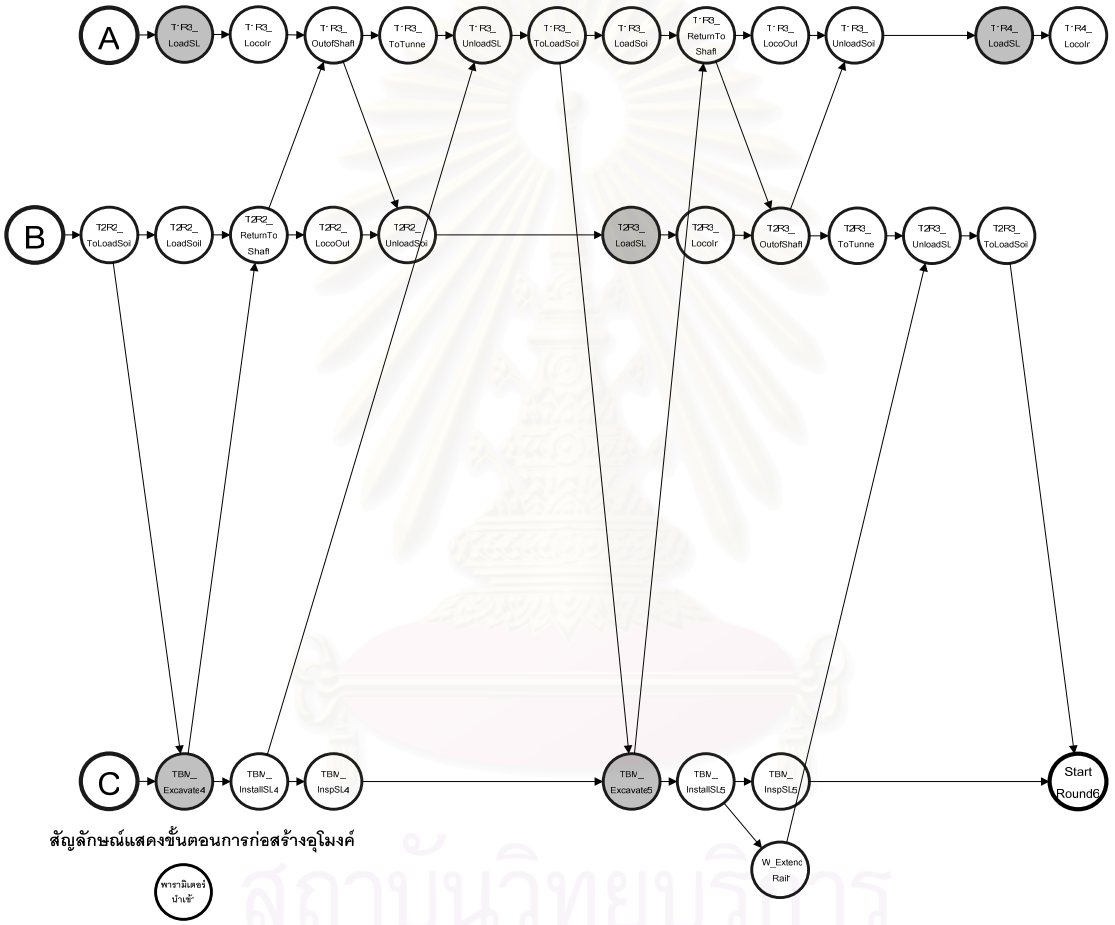
รูปที่ ค.1 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 1 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



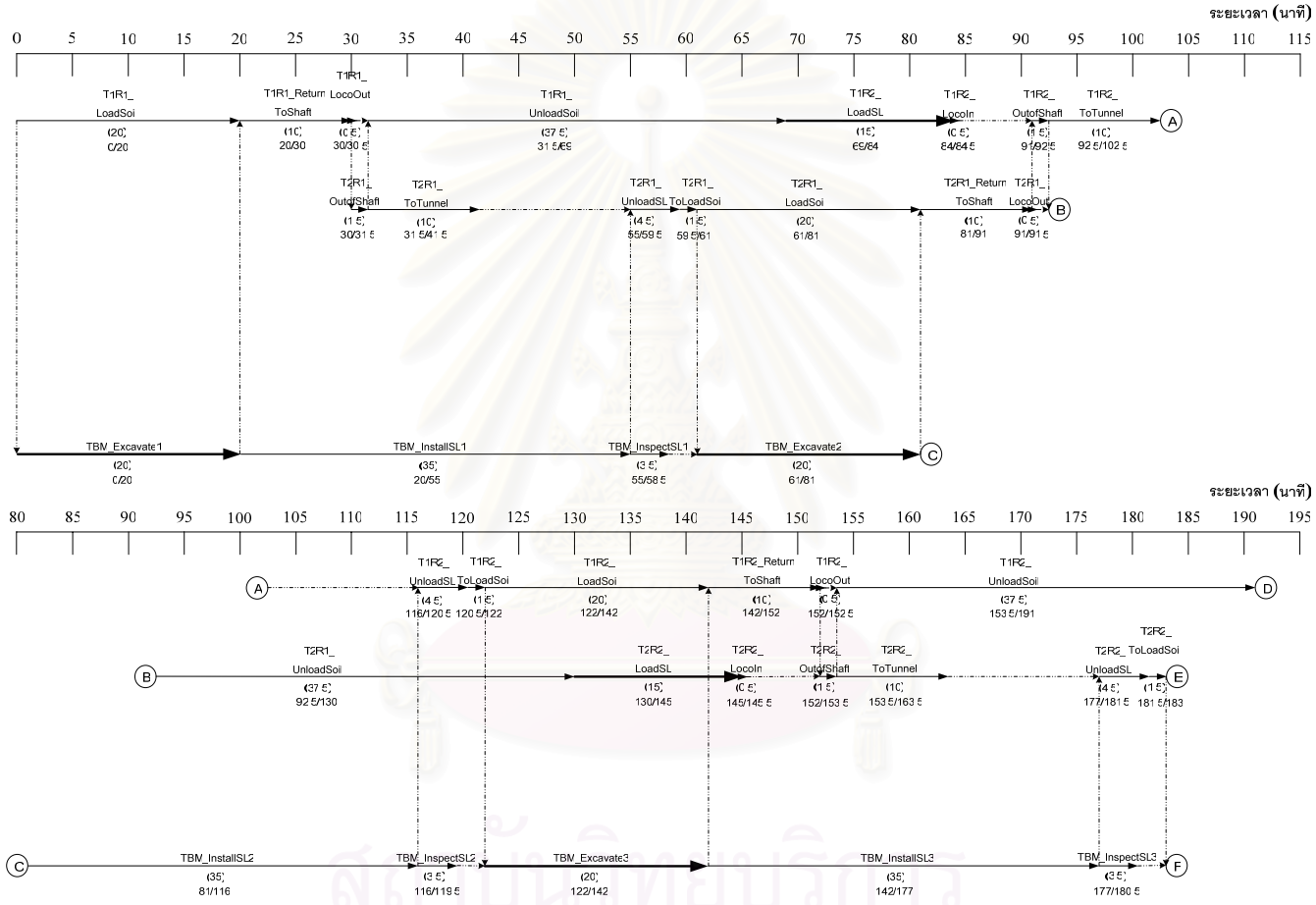
รูปที่ ค.2 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

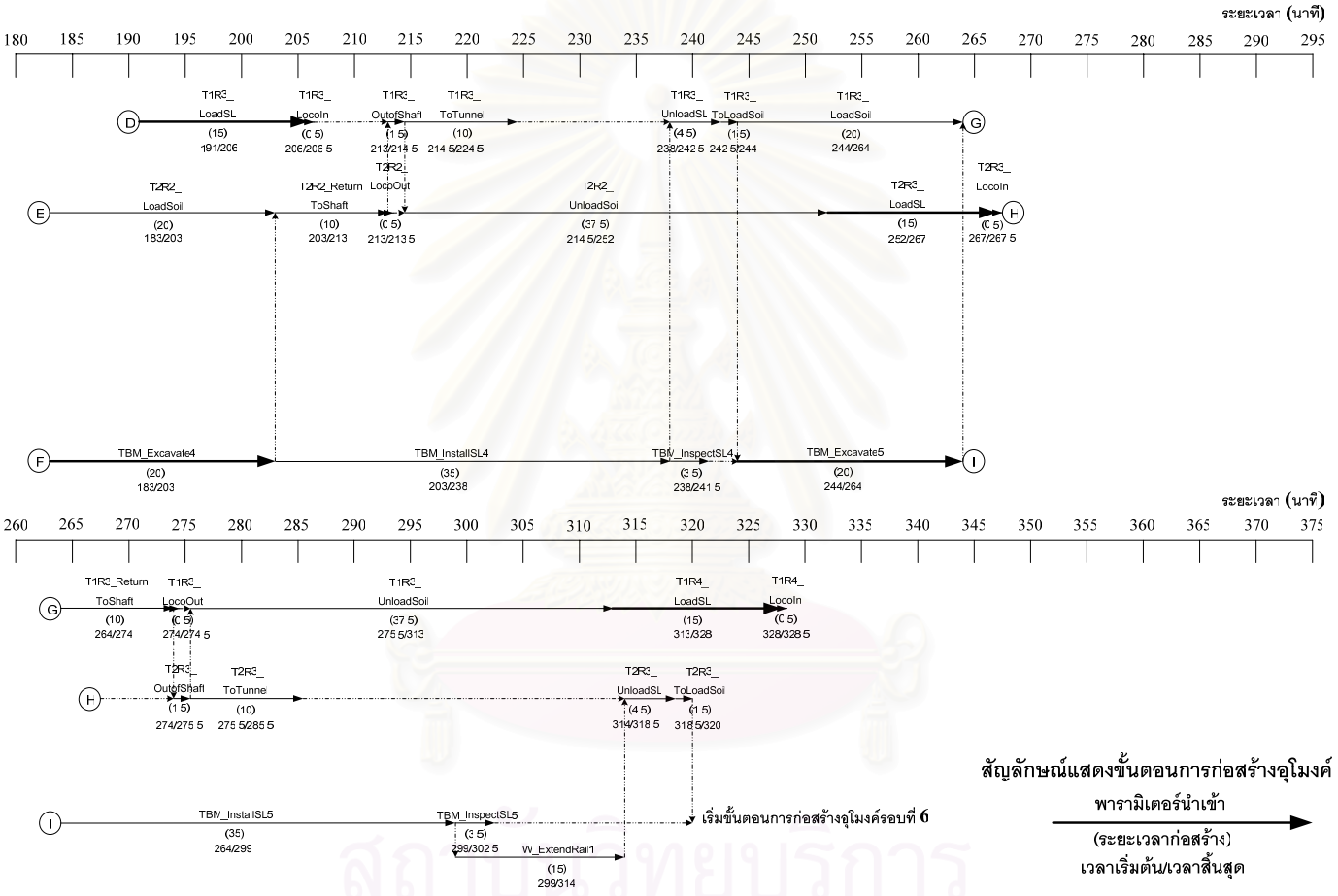


รูปที่ ค.2 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 1 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

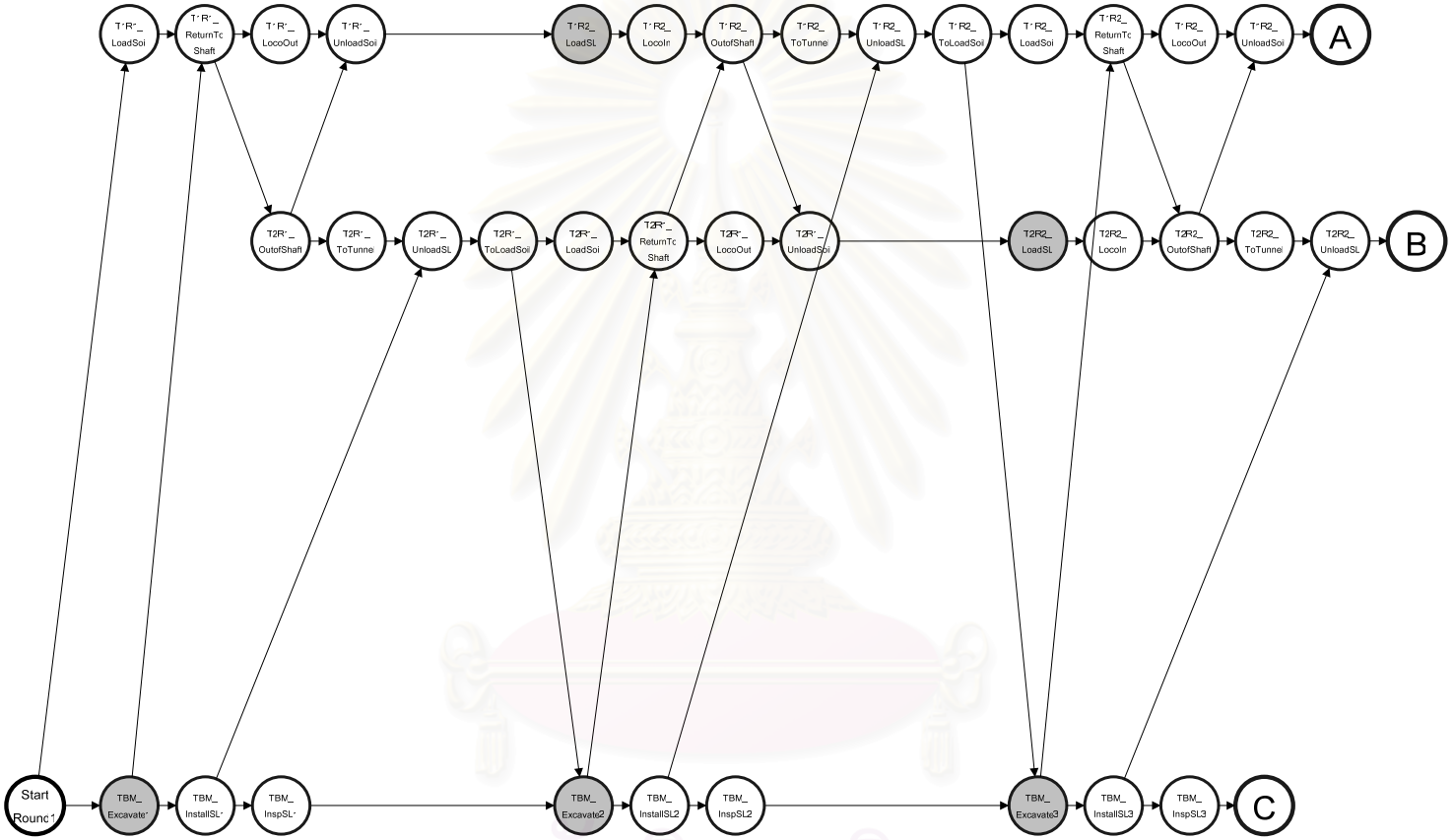


รูปที่ ค.3 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 2



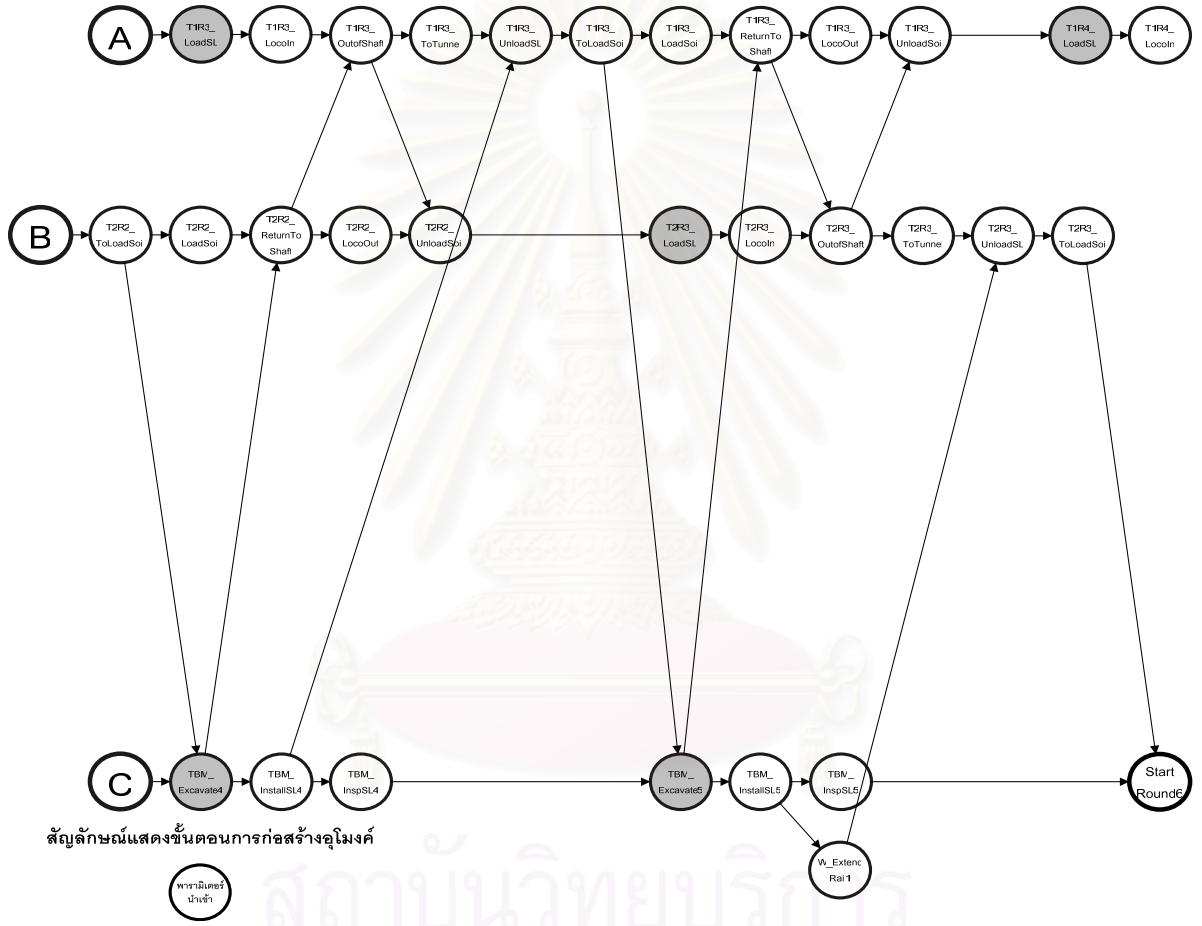
รูปที่ ค.3 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 2 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.4 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 2

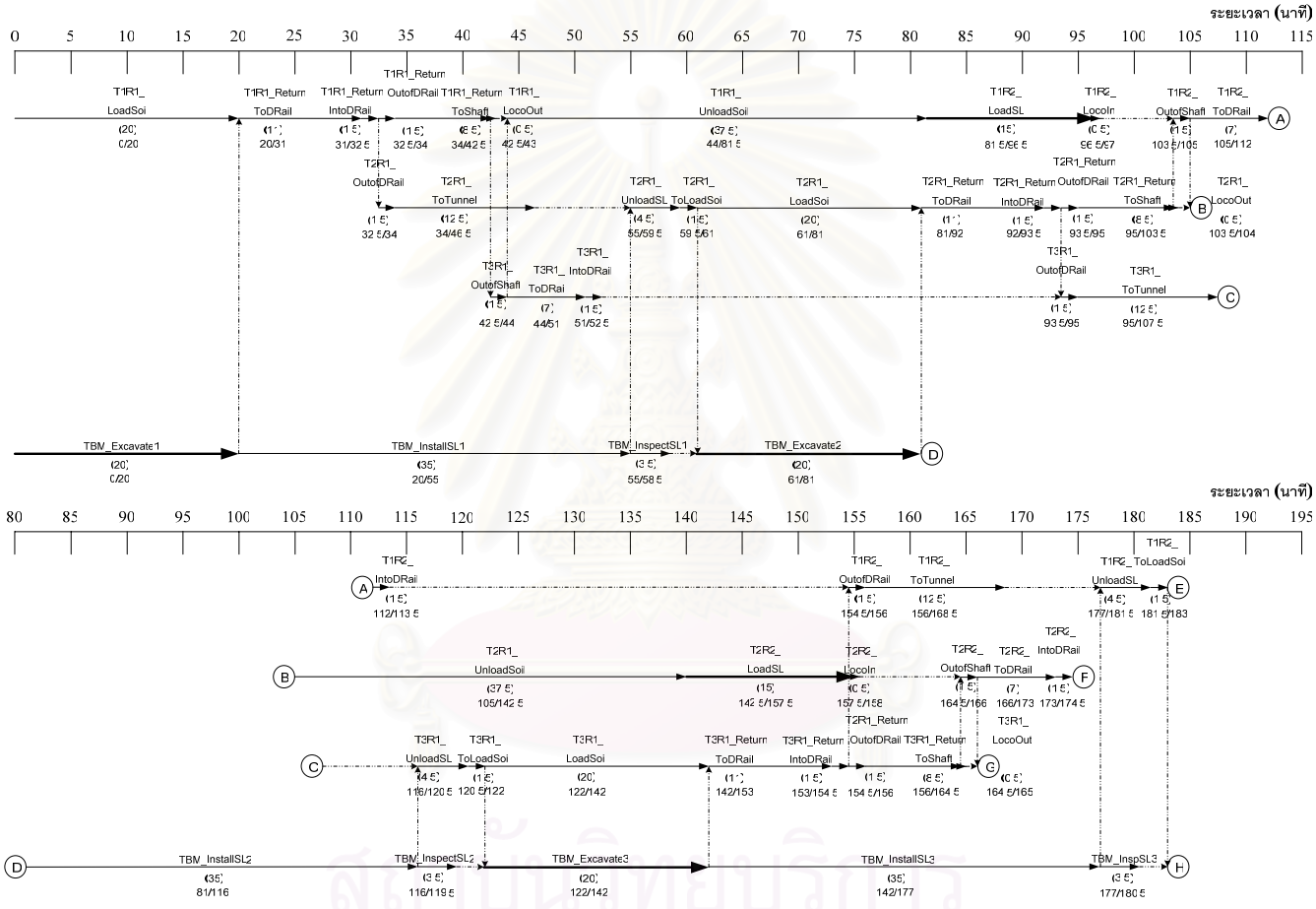
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



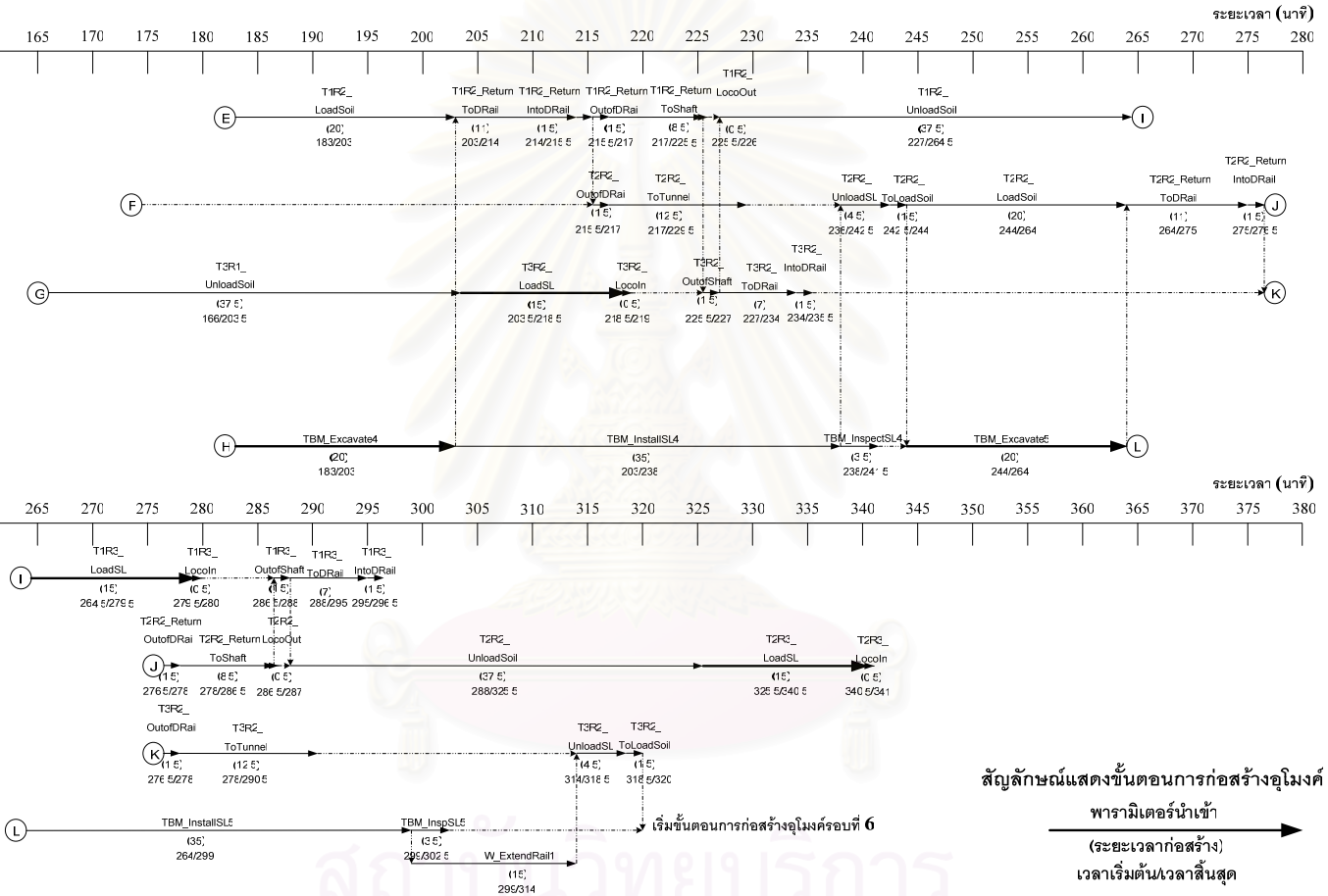
รูปที่ ค.4 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 2 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

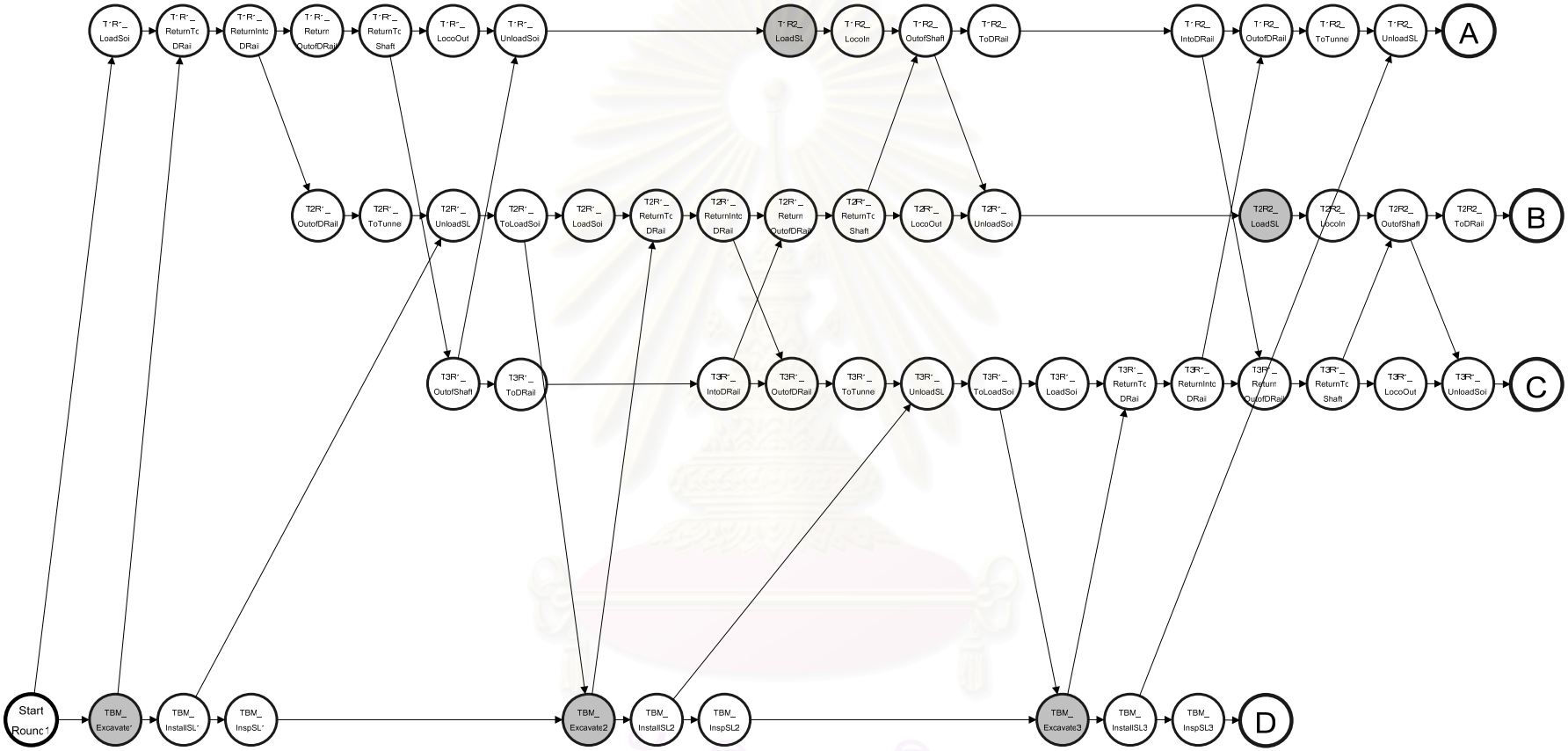
214



รูปที่ ค.5 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 3

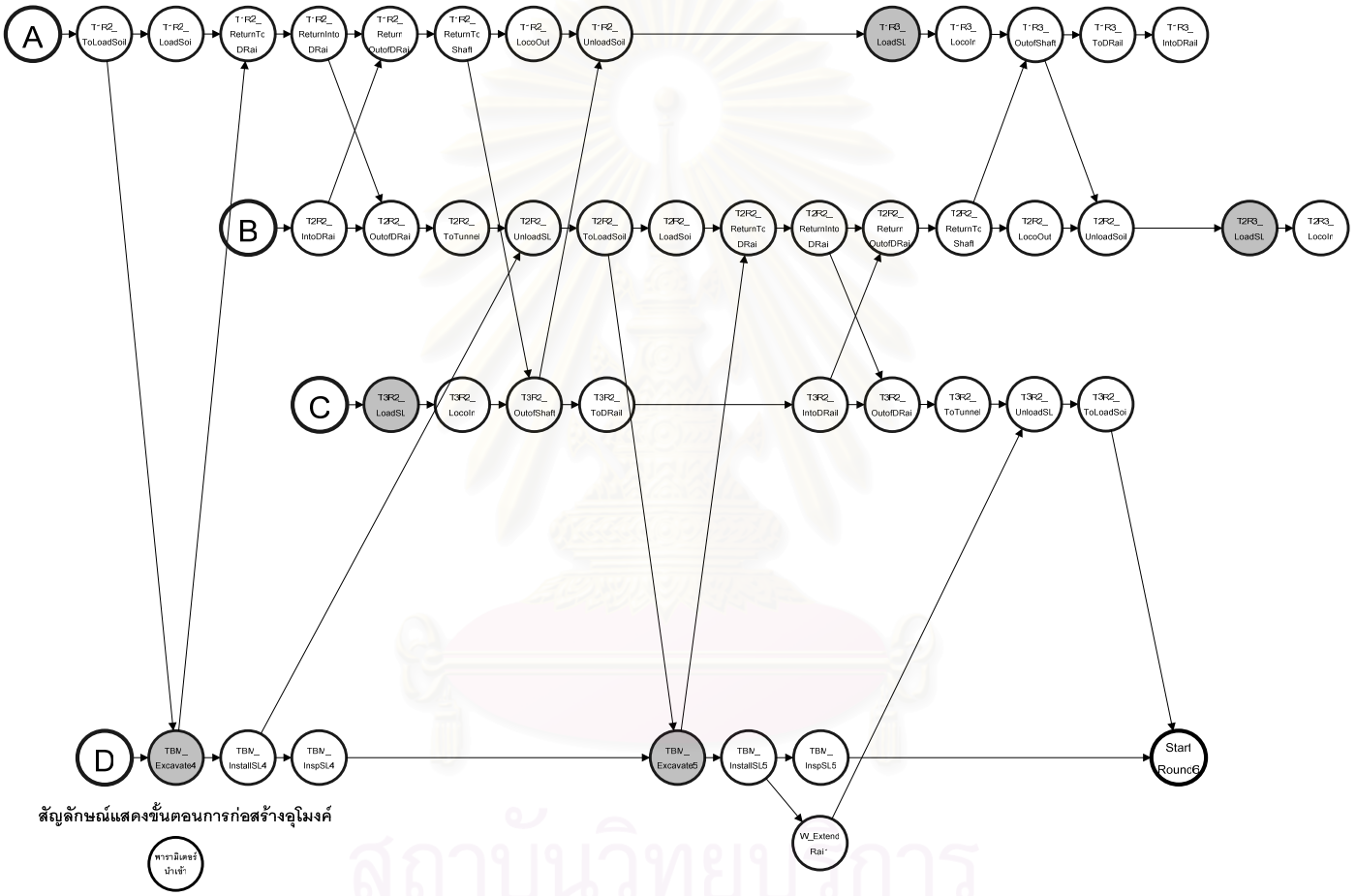


รูปที่ ค.5 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 3 (ต่อ)



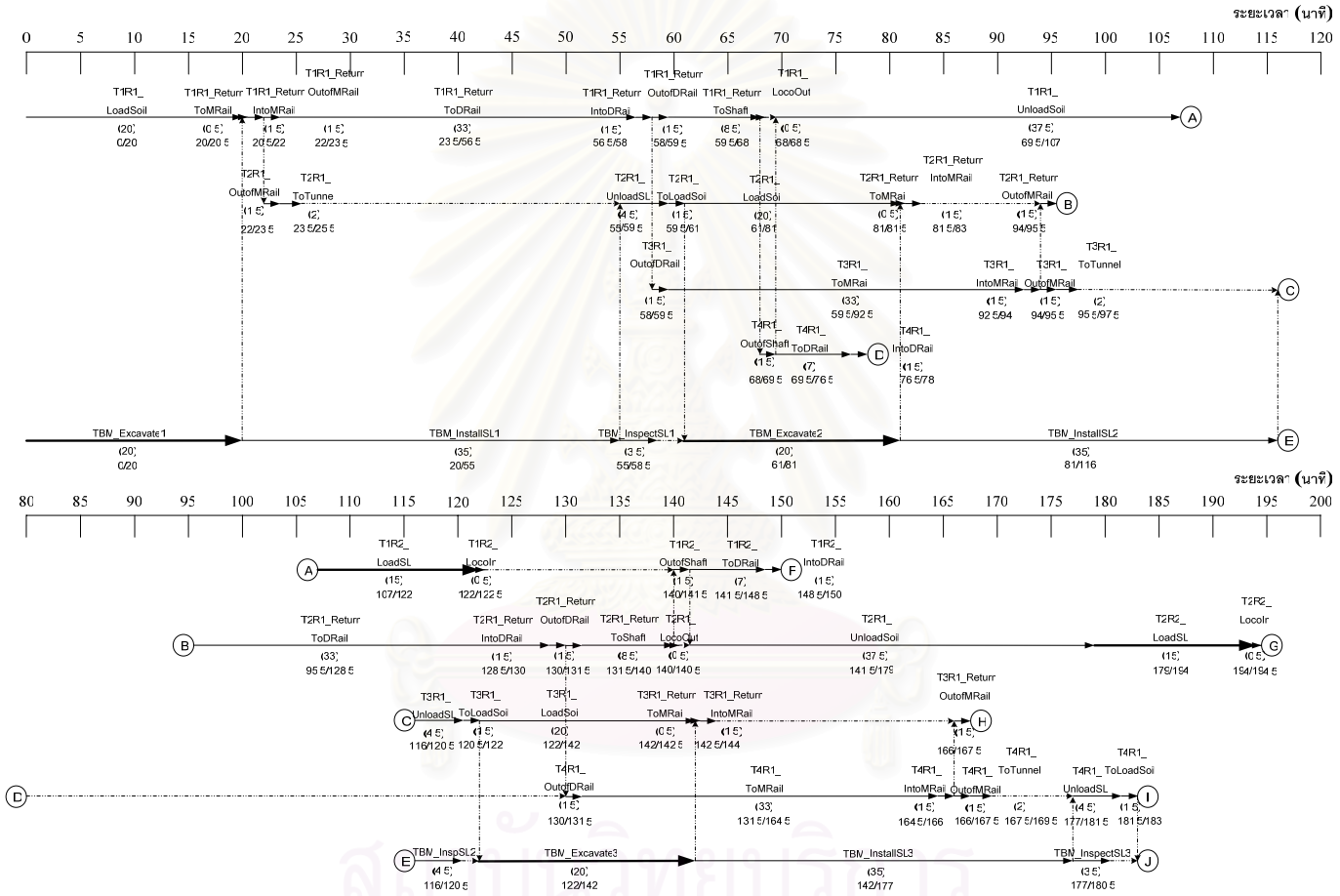
รูปที่ ค.6 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

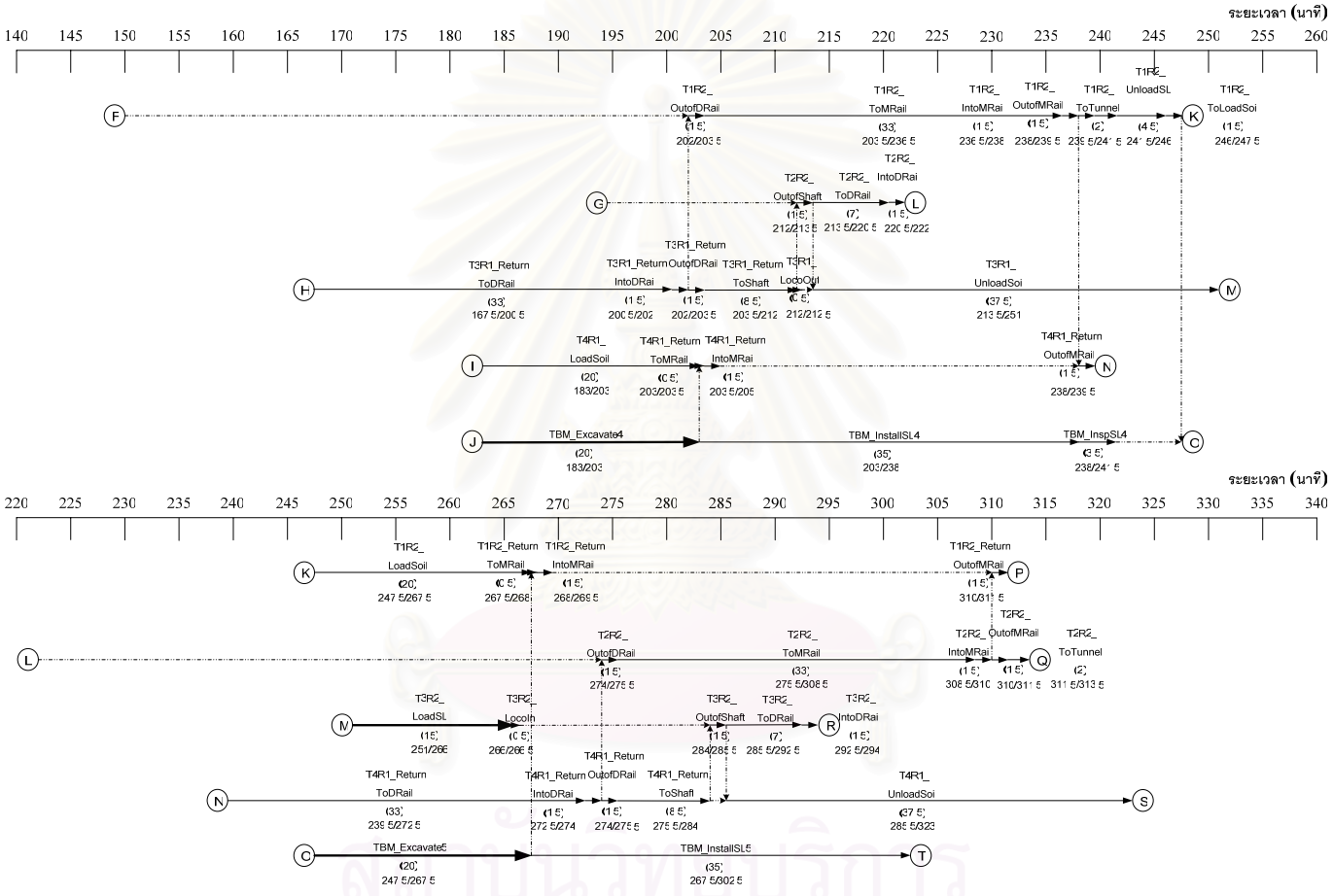


รูปที่ ค.6 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 3 (ต่อ)

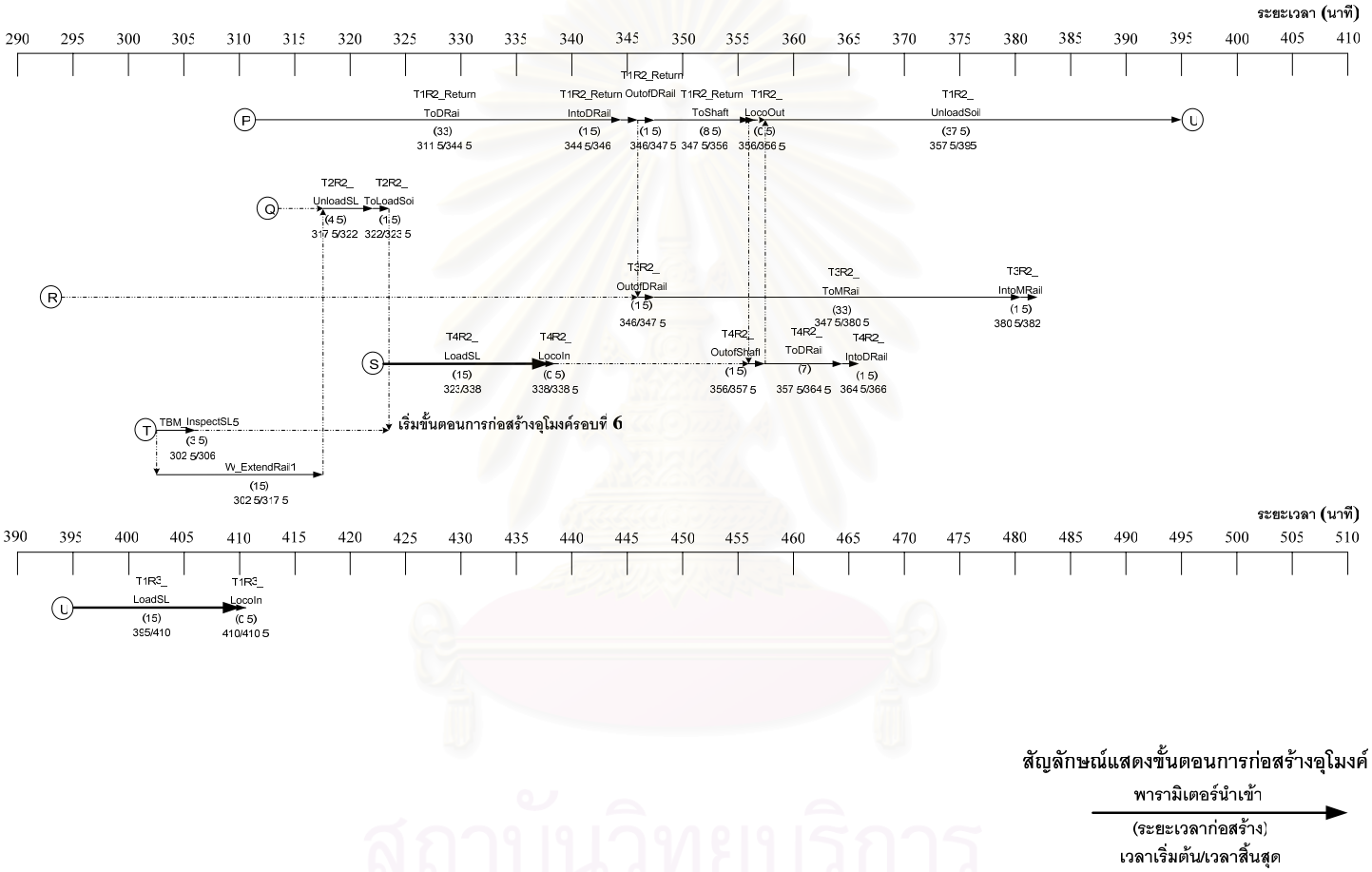
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.7 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 4

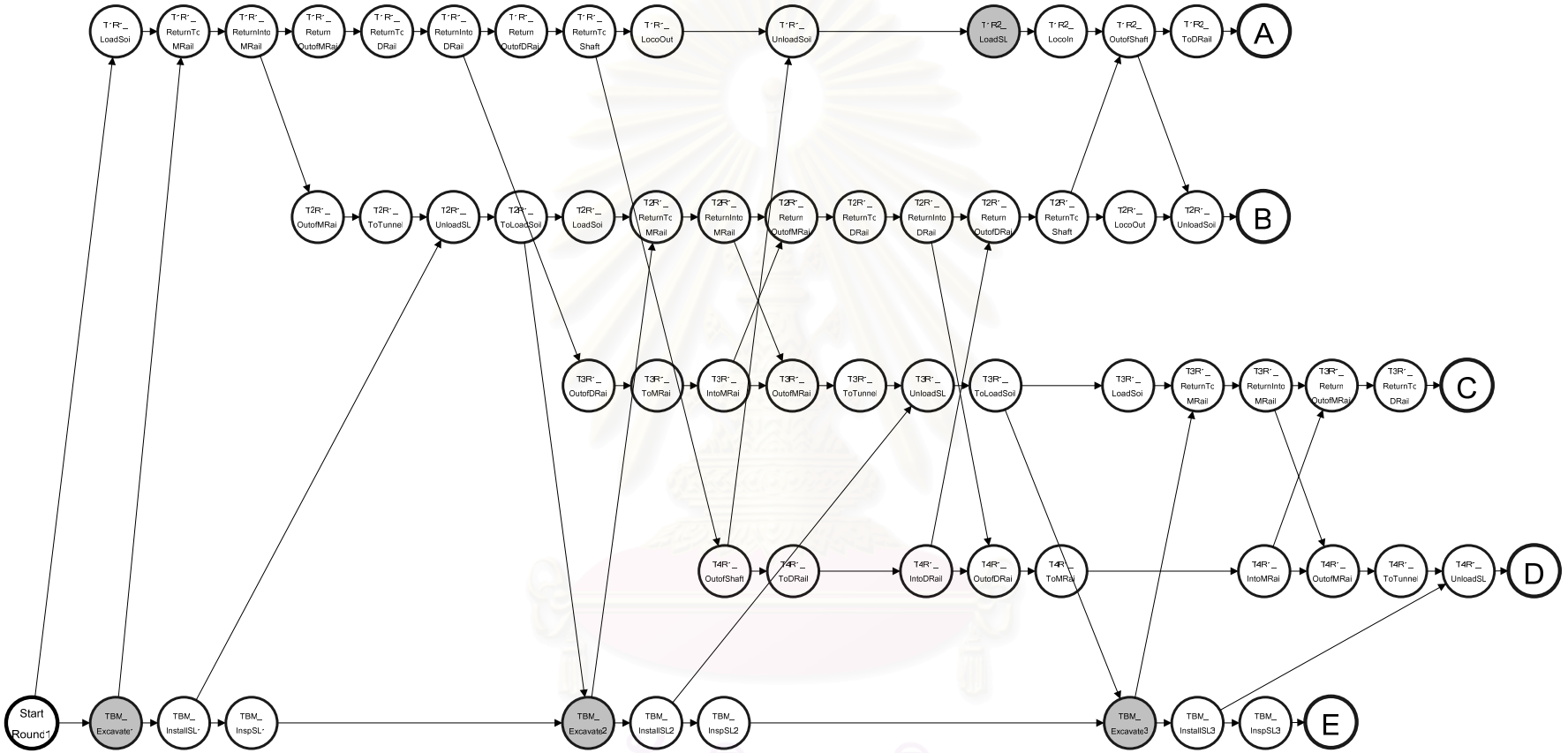


รูปที่ ค.7 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 4 (ต่อ)



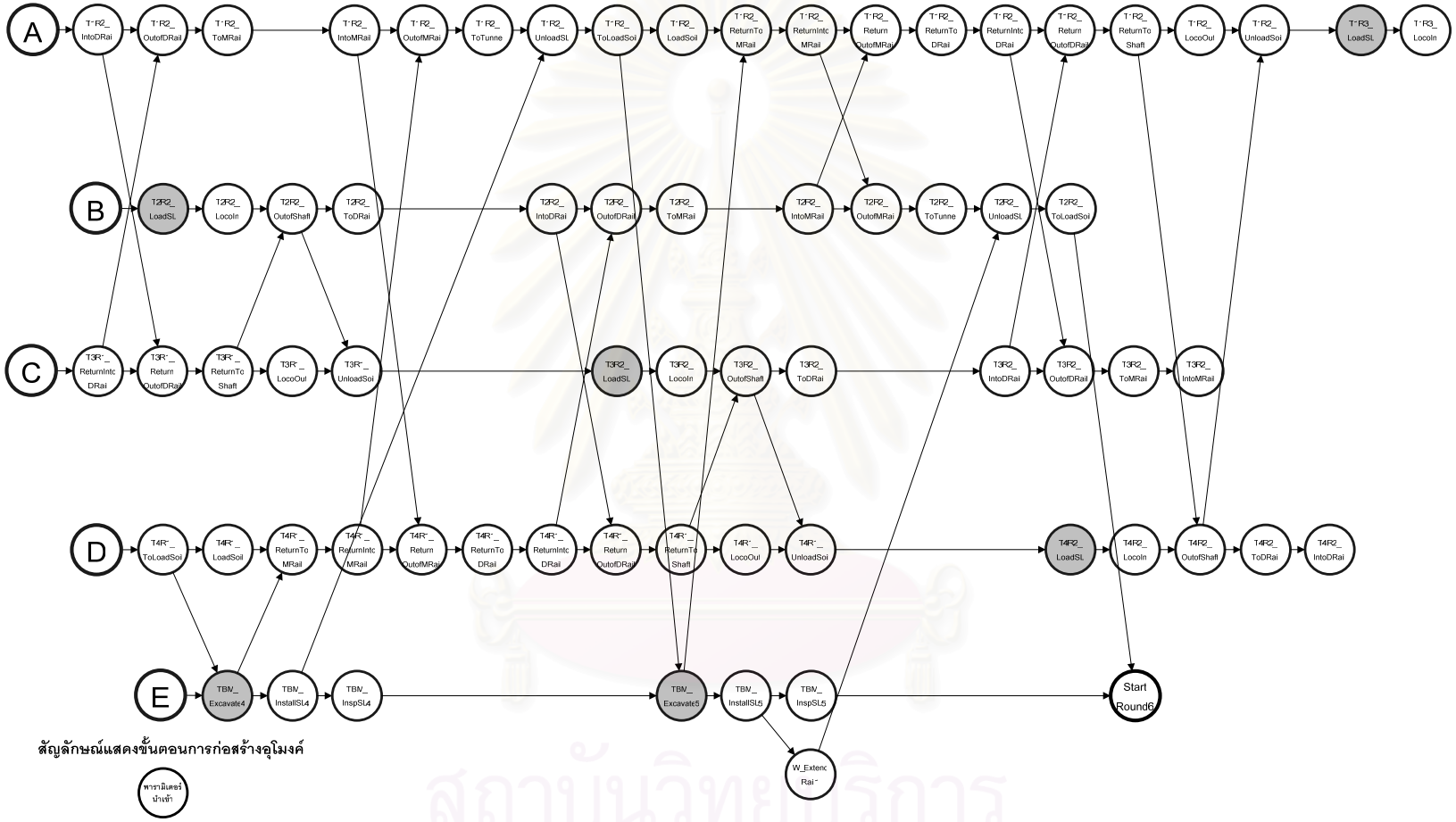
รูปที่ ค.7 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 4 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



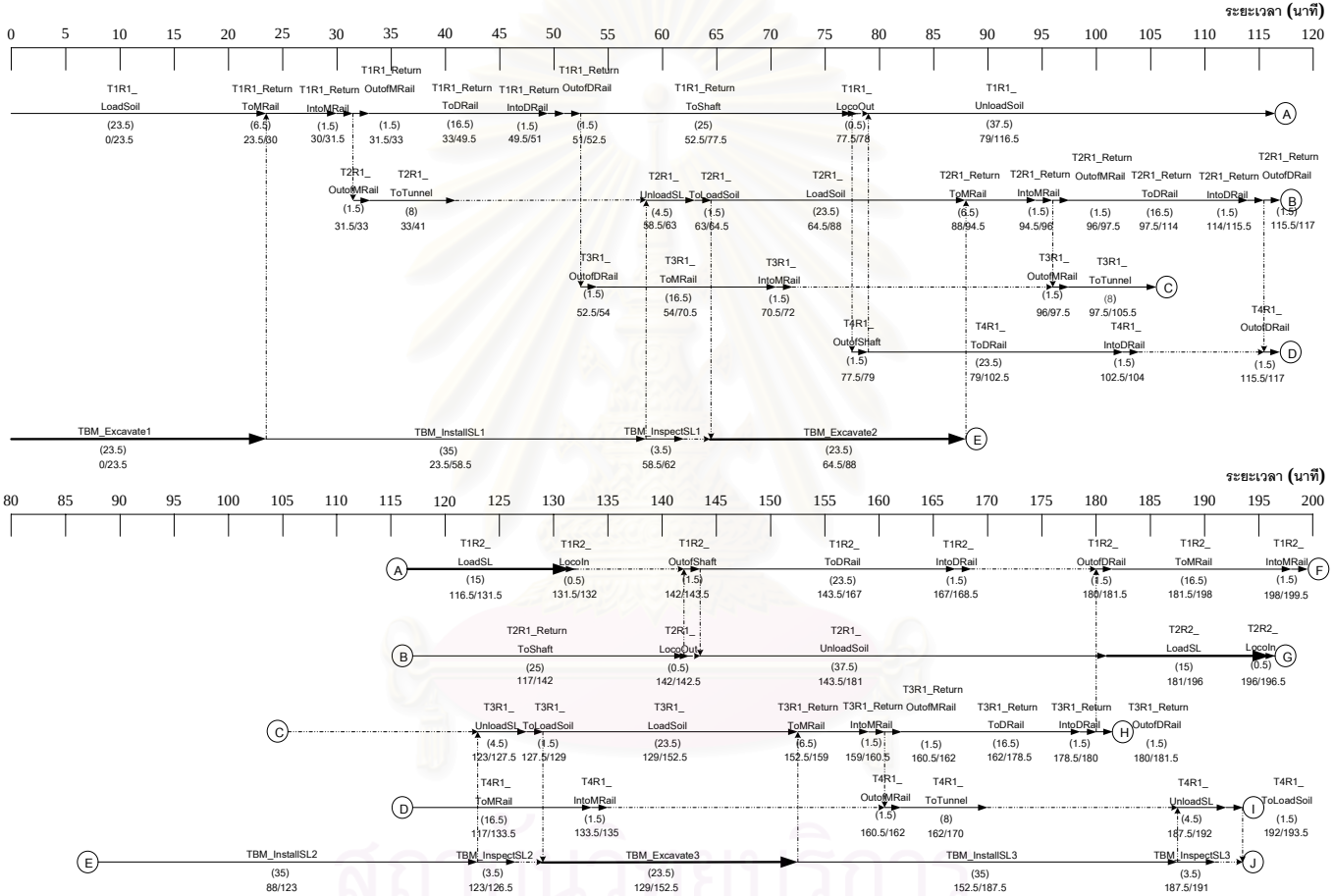
รูปที่ ค.8 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



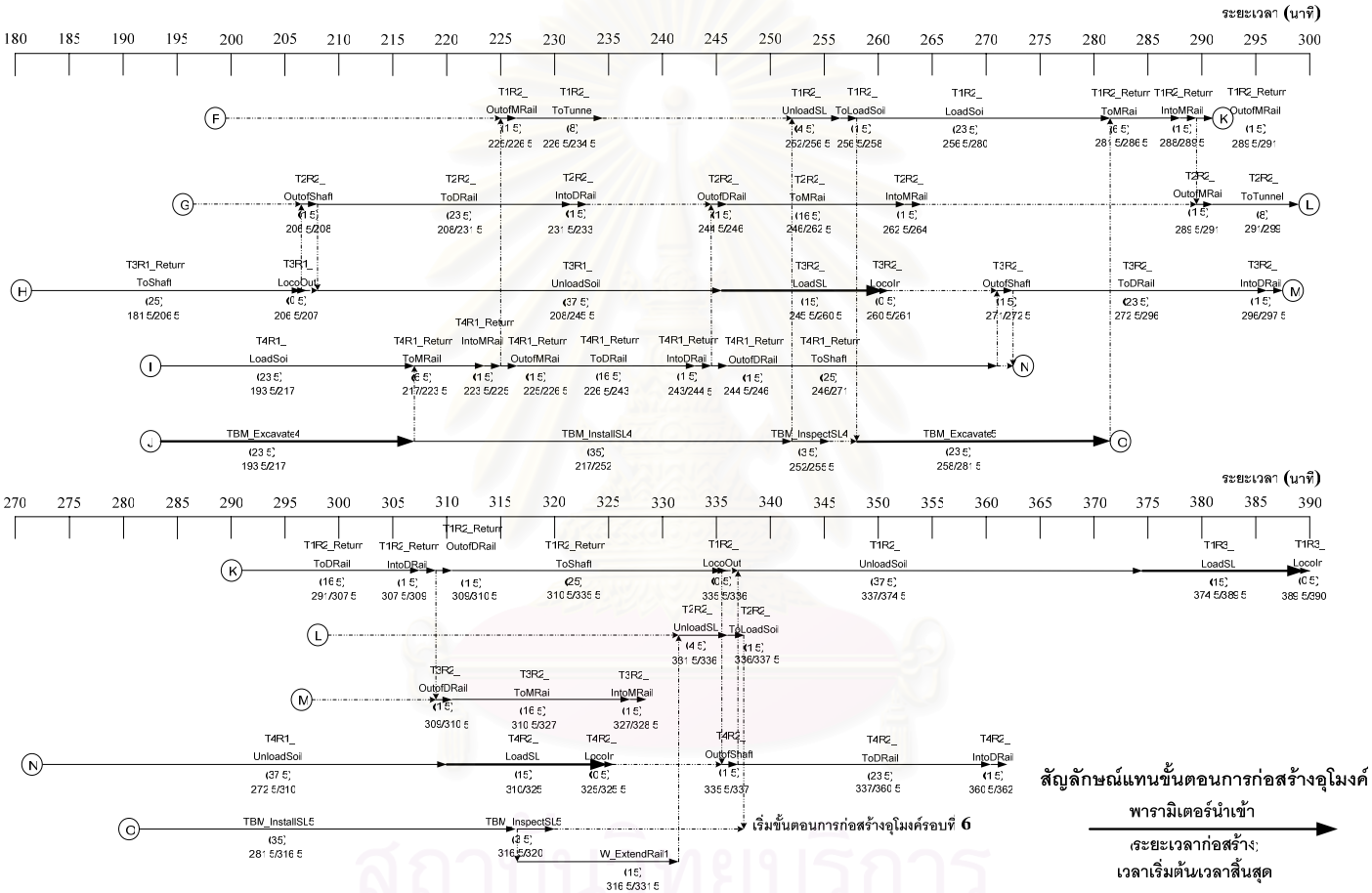
รูปที่ ค.8 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 4 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



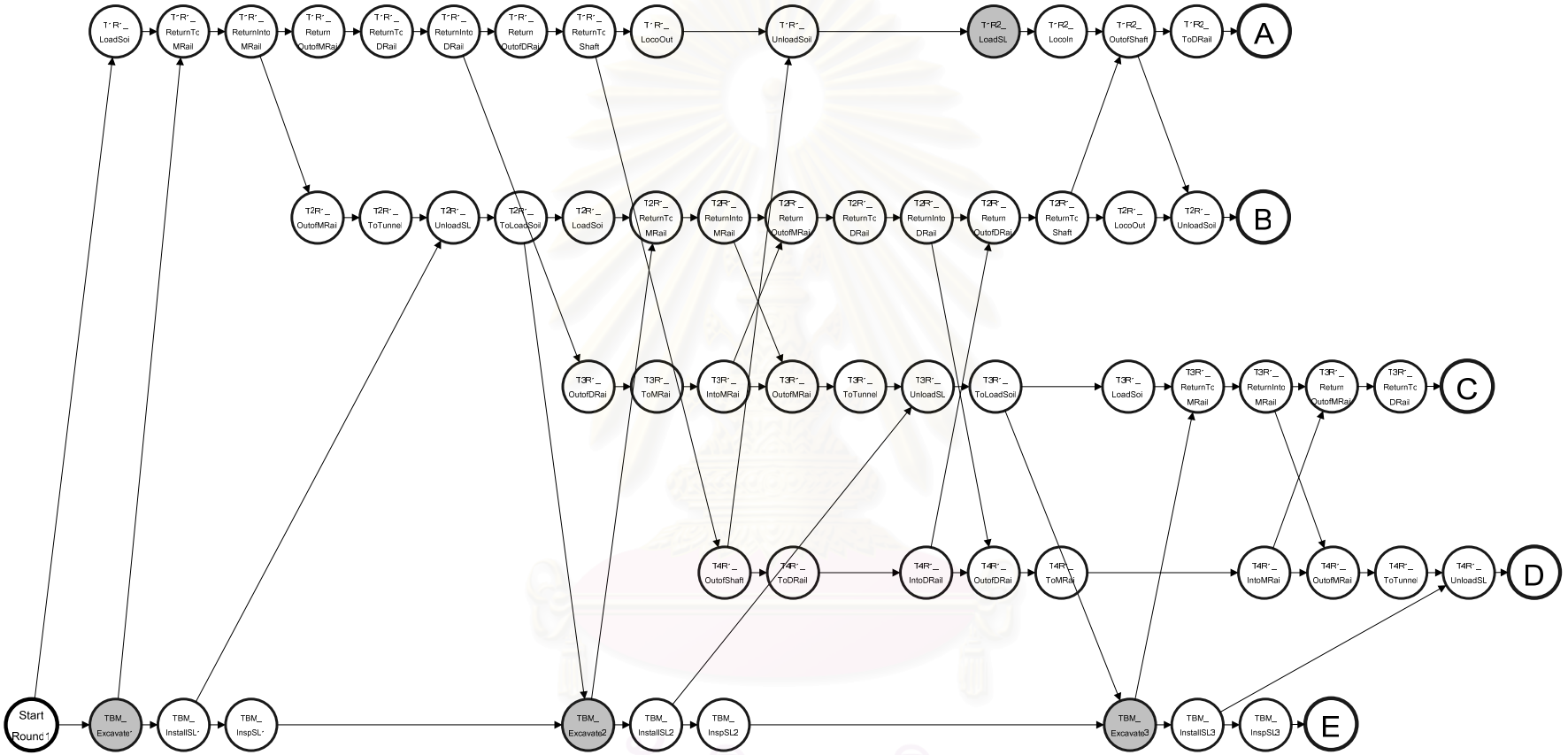
รูปที่ ค.9 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



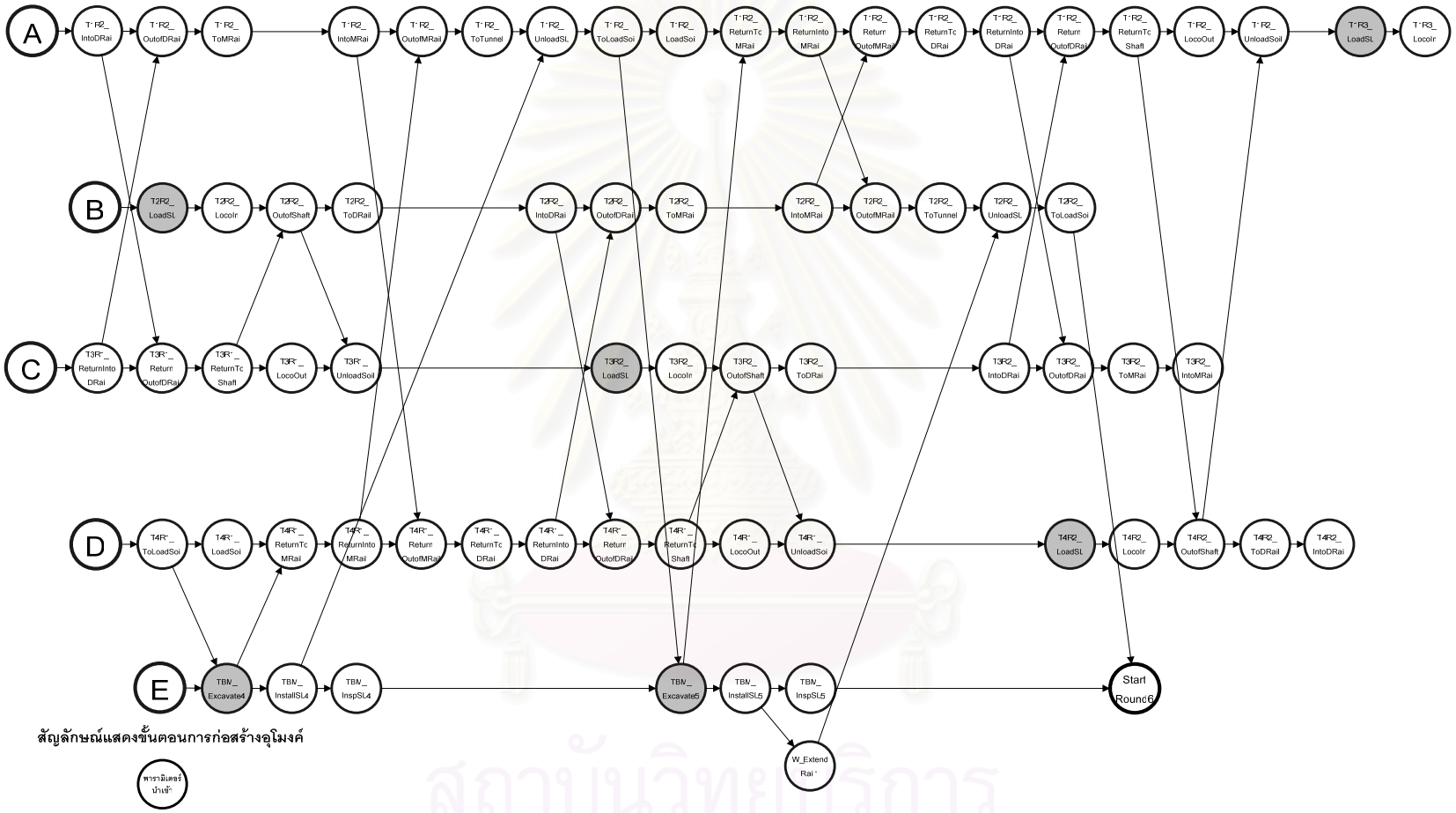
รูปที่ ค.9 แบบจำลองเบื้องต้นของแบบจำลองที่ 5 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.10 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.10 แบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท State-Based Simulation Model ของแบบจำลองที่ 5 (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง
สัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) ที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา ประกอบด้วย ความหมายของสัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า ค่าของพารามิเตอร์นำเข้า และสมการที่ใช้ในการคำนวณกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้จากข้อมูลโครงการกรณีศึกษาในบทที่ 5 แสดงในตารางที่ ง.1 ถึง ง.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
มิติรางพัก	
StrLengthWaitingRail	ความยาวช่วงทางตรง
YLengthWaitingRail	ความยาวช่วงตัว Y
มิติขบวนรถจักร	
TrainLength	ความยาวขบวนรถจักร
อัตราเร็วขบวนรถจักร	
SlowTrainSpeed	อัตราเร็วสำหรับการเข้าและออกจากรางพัก
TrainSpeed	อัตราเร็วปกติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
เหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	
TrainDerail	เวลาสูญเสียเนื่องจากขบวนรถจักรตกราง
ProbTrainDerail	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์	
CurStage	ช่วงดำเนินการตามแผนงาน Main Drive โครงการกรณีศึกษา
CurExcDst(1)	ระยะเคลื่อนที่ระหว่างปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์
CurYRail_DRailDst	ระยะเคลื่อนที่ระหว่างรางพักรูปตัว Y (YRail) กับรางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Double Rail (DRail)
CurDRail_MRailDst	ระยะเคลื่อนที่ระหว่างรางพัก DRail กับรางพักชนิดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Movable Type Double Rail (MRail)
IntoYRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก YRail ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
IntoDRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก DRail
IntoMRailDst	ระยะเคลื่อนที่เข้าไปในรางพัก MRail

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
OutofShaftDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
OutofDRailDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากรางพัก DRail
OutofMRailDst	ระยะเคลื่อนที่ออกจากรางพัก MRail
ToTunnelDst	ระยะเคลื่อนที่ไปหน้าอุโมงค์
Normal	
ChangeBattery Normal	การเปลี่ยนแบตเตอรี่
ChangeCutterBits Normal	การเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) ของ Tunnel Boring Machine (TBM)
ExtendRail Normal	การต่อรางความยาว 5 เมตรสำหรับขบวนรถจักร
HaulToDRail Normal	ขบวนรถจักรเดินทางไปที่รางพัก DRail
HaulToLoadSoil Normal	ขบวนรถจักรเคลื่อนไปที่สายพานลำเลียงดิน (Belt Conveyor) เพื่อรอรับดิน ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร
HaulToMRail Normal	ขบวนรถจักรเดินทางไปที่รางพัก MRail

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
HaulToTunnel Normal HaulToHydraulicSupport	ขบวนรถจักรเดินทางไปที่หน้าอุโมงค์ เวลาที่ขบวนรถจักรใช้เคลื่อนไปที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ (Hydraulic Support) ด้านหลัง TBM ระยะทางวิ่งประมาณ 40 เมตร
InspectSL Normal	การตรวจสอบดาดผนังอุโมงค์ (Segment Lining) หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย
InstallDRailandMRail Normal	การติดตั้งรางพัก DRail และ MRail
MonthlyStop Normal	การสับเปลี่ยนผลัดการทำงานประจำเดือนของกลุ่มคนงาน
RemoveMRail Normal	การเคลื่อนย้ายรางพัก MRail
ReturnToDRail Normal	ขบวนรถจักรเดินทางกลับไปที่รางพัก DRail
ReturnToMRail Normal	ขบวนรถจักรเดินทางกลับไปที่รางพัก MRail
ReturnToShaft Normal	ขบวนรถจักรเดินทางกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
SetUpForNextShift Normal	การเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ เช่น การเปลี่ยนกลุ่มคนงาน การถ่ายทอดคำสั่งและงานที่ต้องทำในผลัดใหม่ และการตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องจักรก่อนทำงาน เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
Combi	
Excavate Combi	การขุดเจาะอุโมงค์และส่งดินให้รถขนถ่ายดิน (Muck Car)
ExcLength	ระยะขุดเจาะอุโมงค์ต่อรอบของ TBM
ExcRate	อัตราขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM
TBMBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจาก TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง
ProbTBMBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง
HaulIntoDRail Combi	ขบวนรถจักรเข้าไปในรางพัก DRail
HaulIntoMRail Combi	ขบวนรถจักรเข้าไปในรางพัก MRail
HaulOutofDRail Combi	ขบวนรถจักรออกจากรางพัก DRail
HaulOutofMRail Combi	ขบวนรถจักรออกจากรางพัก MRail
HaulOutofShaft Combi	ขบวนรถจักรออกจากปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
InstallSL Combi	การติดตั้งดาดผนังอุโมงค์
PrepareToInst	เวลาที่ใช้เตรียมการประกอบดาดผนังอุโมงค์

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
Inst_InvertSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Invert Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_LeftSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Left Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_RightSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Right Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_CrownSL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Crown Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
Inst_KeySL	เวลาที่ใช้ติดตั้งและยึด Key Segment Lining ด้วยสลักเกลียว
SegmentErectorBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจากเครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Erector) และระบบสนับสนุนขัดข้อง
ProbSegmentErectorBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์เครื่องติดตั้งดาดผนังอุโมงค์และระบบสนับสนุนขัดข้อง
LoadSL Combi	การบรรจุดาดผนังอุโมงค์ชุดใหม่ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
Load_SL	เวลาที่ Gantry Crane ใช้เลื่อนไปเอาดาดผนังอุโมงค์จากที่กองเก็บ
SL_ToShaft	เวลาที่ Gantry Crane ใช้นำดาดผนังอุโมงค์ไปที่ปล่องขนถ่ายดิน
SL_ToUnderGround	เวลาที่ Gantry Crane ใช้หย่อนดาดผนังอุโมงค์ไปใส่ไว้ในรถขนส่งดาดผนังอุโมงค์ (Segment Car)
LocoIn Combi	การติดตั้งหัวรถจักรเข้าไปในขบวนรถจักร
CarShifter_Operate	เวลาที่ใช้นำหัวรถจักรไปติดตั้งในขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter)
Inst_Loco	เวลาที่ใช้ติดตั้งหัวรถจักร

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
LocoOut Combi	การถอดหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักร
Release_Loco	เวลาที่ใช้ถอดหัวรถจักร
CarShifter_Operate	เวลาที่ใช้นำหัวรถจักรออกจากขบวนรถจักรโดยใช้เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร
ReleaseLoco(2) Combi	การปล่อยหัวรถจักรเพื่อนำไปใช้งานภายในอุโมงค์
ReleaseTrain(2) Combi	การปล่อยขบวนรถจักรเพื่อนำไปใช้งานภายในอุโมงค์
ReturnIntoDRail Combi	ขบวนรถจักรเดินทางกลับเข้าไปในรางพัก DRail
ReturnIntoMRail Combi	ขบวนรถจักรเดินทางกลับเข้าไปในรางพัก MRail
ReturnOutofDRail Combi	ขบวนรถจักรเดินทางกลับออกจากรางพัก DRail
ReturnOutofMRail Combi	ขบวนรถจักรเดินทางกลับออกจาก MRail
UnloadSL Combi	ขบวนรถจักรนำดาดผนังอุโมงค์ไปเก็บไว้ที่เครื่องเก็บดาดผนังอุโมงค์ด้านหลัง TBM
UnloadSoil Combi	การนำดินไปทิ้งที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์
MuckCar_ToGround	เวลาที่ใช้ยึดและดึงรถขนถ่ายดินขึ้นมาจากใต้อุโมงค์
MuckCar_ToUnloadSoil	เวลาที่ใช้นำดินจากรถขนถ่ายดินไปทิ้ง
MuckCarToShaft	เวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับไปที่ปล่องขนถ่ายดิน

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
MuckCar_ToUnderGround	เวลาที่ใช้นำรถขนถ่ายดินกลับเข้าไปในอุโมงค์
CarShifterBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจากเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (Car Shifter) ขัดข้อง
GantryCraneBreakDown	เวลาสูญเสียเนื่องจาก Gantry Crane ขัดข้อง
GantryCraneStop	เวลาสูญเสียเนื่องจาก Gantry Crane ต้องหยุดทำงานเนื่องจากปัจจัยภายนอก เช่น ฝนตกหนักจนไม่สามารถทำงานได้ เป็นต้น
CoOptTempGantryCrane	ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการทำงานที่ลดลงในกรณีที่ใช้ Gantry Crane สำรองที่มีความสามารถในการทำงานต่ำกว่า Gantry Crane หลัก
ProbCarShifterBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์เครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรขัดข้อง
ProbGantryCraneBreakDown	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ Gantry Crane ขัดข้อง
ProbGantryCraneStop	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ Gantry Crane ต้องหยุดทำงานเนื่องจากปัจจัยภายนอก
ProbTempGantryCraneOperate	ความน่าจะเป็นการเกิดเหตุการณ์ที่ต้องนำ Gantry Crane สำรองที่มีความสามารถในการทำงานต่ำกว่า Gantry Crane หลักมาใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
Consolidator	
ChangeCondition Consolidator	การกำหนดให้แบบจำลองสถานการณ์เปลี่ยนสภาพชั้นดินและระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ตามตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ที่กำหนด
LengthEnough Consolidator	การกำหนดให้ ExtendRail Normal เริ่มทำงาน
IntDstToExtendRail	ระยะด้านหลัง TBM ที่ใช้ในการต่อราง
SupportProcesses Consolidator	การกำหนดให้ SupportProcessesDone Fork เริ่มทำงาน
Fork	
ChangeBatteryDone Fork	การตรวจสอบเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแบตเตอรี่
IntDstToChangeBattery	ระยะทางวิ่งของขบวนรถจักรโดยประมาณต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในแต่ละครั้ง
SupportProcessesDone Fork	การตรวจสอบเงื่อนไขเพื่อกำหนดประเภทการทำงานในกระบวนการสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive
IntDstToChangeCutterBits	ระยะการก่อสร้างอุโมงค์ต่อการเปลี่ยนฟันขุดเจาะของ TBM ในแต่ละครั้ง

ตารางที่ ง.1 ความหมายของสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	ความหมาย
IntTimeToMonthlyStop	ช่วงระยะห่างของเวลาต่อการหยุดก่อสร้างอุโมงค์เพื่อสับเปลี่ยนผลัดการทำงานประจำเดือนของกลุ่มคนงานในแต่ละครั้ง
IntTimeToRemoveMRail	ช่วงระยะห่างของเวลาต่อการเคลื่อนย้ายรางพัก MRail ในแต่ละครั้ง
TimeToEndShiftDone Fork	การตรวจสอบเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่
ShiftLength	ระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ในแต่ละผลัด

หมายเหตุ

(1) CurExcDst ไม่ใช่พารามิเตอร์นำเข้าแต่เป็นพารามิเตอร์สนับสนุนที่ใช้รวบรวมระยะการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โดย CurExcDst จะถูกใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งก่อสร้างอุโมงค์ ณ เวลาปัจจุบันภายในแบบจำลองสถานการณ์และใช้ในการคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในแบบจำลองสถานการณ์

(2) ReleaseLoco Combi และ ReleaseTrain Combi สามารถทำงานได้ในขณะที่ Gantry Crane ว่าง โดยโครงการกรณีศึกษาจะปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักรจากโรงเก็บเพื่อนำไปใช้งานภายในอุโมงค์ในขณะที่ไม่มีการก่อสร้างอุโมงค์ ดังนั้นการทำงานในขั้นตอนนี้จึงไม่มีผลต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model แสดงในตารางที่ ง.2 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
มิติรางพัก				
YLengthWaitingRail	เมตร	ค่าคงที่	10.80	(1)
StrLengthWaitingRail	เมตร	ค่าคงที่	60	(1)
มิติขบวนรถจักร				
TrainLength	เมตร	ค่าคงที่	52.40	(1)
อัตราเร็วขบวนรถจักร				
SlowTrainSpeed	เมตร/นาที	PERT	41.67/50/58.33	(1), (5)
TrainSpeed	เมตร/นาที	PERT	91.67/100/108.33	(1), (5)
เหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง				
TrainDerail	นาที	PERT	25/120/360	(2)

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
ProbTrainDerail	-	ค่าคงที่	0.0218	(2)
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์				
CurStage				
173.078 เมตร < CurExcDst ≤ 1,000 เมตร	-	ค่าคงที่	0	(3)
1,000 เมตร < CurExcDst ≤ 2,100 เมตร	-	ค่าคงที่	1	(3)
2,100 เมตร < CurExcDst ≤ 4,500 เมตร	-	ค่าคงที่	2	(3)
4,500 เมตร < CurExcDst ≤ 5,123.600 เมตร	-	ค่าคงที่	3	(3)
CurYRail_DRailDst				(3)
CurStage = 0	เมตร	ค่าคงที่	0	(3)
CurStage = 1-2	เมตร	ค่าคงที่	686	(3)
CurStage = 3	เมตร	ค่าคงที่	2,336	(3)
CurDRail_MRailDst				
CurStage = 0-1	เมตร	ค่าคงที่	0	(3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
CurStage = 2 (ขณะยังไม่ได้เริ่มเคลื่อนย้าย MRail)	เมตร	ค่าคงที่	916	(3)
CurStage = 3	เมตร	ค่าคงที่	1,666	(3)
Normal				
ChangeBattery Normal	นาที	PERT	10/15/20	(5)
ChangeCutterBits Normal	นาที	ค่าคงที่	10,080	(3)
ExtendRail Normal	นาที	PERT	12/15/20	(5)
HaulToLoadSoil Normal	นาที	PERT	0.88/1.50/1.88	(5)
HaulToTunnel Normal HaulToHydraulicSupport	นาที	PERT	0.88/1.50/5.88	(5)
InspectSL Normal	นาที	PERT	2.75/3.50/4.75	(5)
InstallDRailandMRail Normal	นาที	ค่าคงที่	4,320	(3)

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
MonthlyStop Normal	นาที	ค่าคงที่	720	(3)
RemoveMRail Normal	นาที	ค่าคงที่	720	(3)
SetUpForNextShift Normal	นาที	ค่าคงที่	30	(5)
Combi				
Excavate Combi				
ExcLength				
ทางตรง	เมตร	ค่าคงที่	1.20	(1)
ทางโค้ง	เมตร	ค่าคงที่	0.60	(1)
ExcRate				
Fine Sand	มิลลิเมตร/นาที	PERT	46/61/70	(2)
Silty Fine Sand	มิลลิเมตร/นาที	PERT	50/66/70	(2), (5)
Silty Clay	มิลลิเมตร/นาที	PERT	33/51/70	(2), (5)

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
TBMBreakDown	นาที	PERT	25/40/1,210	(2)
ProbTBMBreakDown	-	ค่าคงที่	0.0116	(2)
InstallSL Combi				
PrepareToInst	นาที	PERT	5.50/7/8.50	(5)
Inst_InvertSL	นาที	PERT	2.25/3/4.75	(5)
Inst_LeftSL	นาที	PERT	3.50/4.50/6	(5)
Inst_RightSL	นาที	PERT	3.50/4.50/6	(5)
Inst_CrownSL	นาที	PERT	3.75/5/12.50	(5)
Inst_KeySL	นาที	PERT	5/6/12.50	(5)
SegmentErectorBreakDown	นาที	PERT	45/90/160	(2)
ProbSegmentErectorBreakDown	-	ค่าคงที่	0.0023	(2)
LoadSL Combi				
Load_SL	นาที	แกมม่า (α / β)	22.9853/0.1960	(4)

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
SL_ToShaft	นาที	PERT	0.58/1.42/2.62	(4)
SL_ToUnderGround	นาที	แกมม่า (α / β)	25.3571/0.0735	(4)
LocoIn Combi				
CarShifter_Operate	นาที	แกมม่า (α / β)	14.9916/0.0173	(4)
Inst_Loco	นาที	PERT	0.23/0.32/0.77	(4)
LocoOut Combi				
Release_Loco	นาที	ปกติ (Mean/S.D.)	0.34/0.09	(4)
CarShifter_Operate	นาที	แกมม่า (α / β)	14.9916/0.0173	(4)
UnloadSL Combi	นาที	PERT	3.50/4.50/6.50	(5)
UnloadSoil Combi				
MuckCar_ToGround	นาที	PERT	1.77/1.93/5.57	(4)
MuckCar_ToUnloadSoil	นาที	แกมม่า (α / β)	18.9531/0.0951	(4)
MuckCar_ToShaft	นาที	ปกติ (Mean/S.D.)	0.71/0.17	(4)

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
MuckCar_ToUnderGround	นาที	PERT	1.20/1.60/4.40	(4)
CarShifterBreakDown	นาที	PERT	40/60/150	(2)
GantryCraneBreakDown	นาที	PERT	30/60/150	(2)
GantryCraneStop	นาที	PERT	70/90/120	(2)
CoOptTempGantryCrane	-	ค่าคงที่	0.50	(6)
ProbCarShifterBreakDown	-	ค่าคงที่	0.0014	(2)
ProbGantryCraneBreakDown	-	ค่าคงที่	0.0061	(2)
ProbGantryCraneStop	-	ค่าคงที่	0.0028	(2)
ProbTempGantryCraneOperate	-	ค่าคงที่	0.0210	(2)
Consolidator				
LengthEnough Consolidator				
InDstToExtendRail	เมตร	ค่าคงที่	6	(5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 ค่าพารามิเตอร์นำเข้าที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	Probabilistic Analysis		ที่มา
		ชนิด	ค่า	
Fork				
ChangeBatteryDone Fork				
IntDstToChangeBattery	เมตร	ค่าคงที่	15,000	(5)
SupportProcessesDone Fork				
IntDstToChangeCutterBits	เมตร	ค่าคงที่	2,953	(3)
IntTimeToMonthlyStop	เดือน	ค่าคงที่	1	(3)
IntTimeToRemoveMRail	วัน	ค่าคงที่	15	(3)
TimeToEndShiftDone Fork				
ShiftLength	นาที	ค่าคงที่	720	(3)

แหล่งที่มา

(1) ข้อมูลจากเอกสารทางด้านเทคนิคของโครงการกรณีศึกษา

(2) ข้อมูลจากเอกสารบันทึกการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(3) ข้อมูลจากแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ช่วง Main Drive ของโครงการกรณีศึกษา

(4) ข้อมูลสถิติการทำงานจากการจับเวลาขั้นตอนการทำงานระหว่างการก่อสร้างของโครงการกรณีศึกษา

(5) ข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกรของโครงการกรณีศึกษาที่มีประสบการณ์ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วย TBM ค้ำยันดินหน้าอุโมงค์ด้วยระบบ Earth Pressure Balance (EPB)

(6) ข้อมูลการประมาณค่าจากการสันนิษฐานโดยผู้วิจัย

สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model แสดงในตารางที่ ง.3 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
ระยะอ้างอิงการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์		
IntoYRailDst	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail
IntoDRailDst		
CurStage = 0	เมตร	-
CurStage = 1-3	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
IntoMRailDst		
CurStage = 0-1	เมตร	-
CurStage = 2-3	เมตร	StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail
OutofShaftDst	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
OutofDRailDst		
CurStage = 0	เมตร	-
CurStage = 1-3	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
OutofMRailDst		
CurStage = 0-1	เมตร	-
CurStage = 2-3	เมตร	YLengthWaitingRail + TrainLength
ToTunnelDst	เมตร	CurExcDst – TrainLength – IntoYRailDst – CurYRail_DRailDst – CurDRail_MRailDst – IntoDRailDst – OutofDRailDst – IntoMRailDst – OutofMRailDst

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
Normal		
HaulToDRail Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed + TrainDerail
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed
HaulToMRail Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed + TrainDerail
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed
HaulToTunnel Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed + HaulToHydraulicSupport + TrainDerail
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed + HaulToHydraulicSupport
ReturnToDRail Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed + TrainDerail

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurDRail_MRailDst/TrainSpeed
ReturnToMRail Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed + TrainDerail
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	ToTunnelDst/TrainSpeed
ReturnToShaft Normal		
เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed + IntoYRailDst/SlowTrainSpeed + TrainDerail
ไม่เกิดเหตุการณ์ขบวนรถจักรตกราง	นาที	CurYRail_DRailDst/TrainSpeed + IntoYRailDst/SlowTrainSpeed
Combi		
Excavate Combi		
เกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง	นาที	(ExcLength x 1,000)/ExcRate + TBMBreakDown
ไม่เกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง	นาที	(ExcLength x 1,000)/ExcRate

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
HaulIntoDRail Combi	นาที	IntoDRailDst/SlowTrainSpeed
HaulIntoMRail Combi	นาที	IntoMRailDst/SlowTrainSpeed
HaulOutofDRail Combi	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
HaulOutofMRail Combi	นาที	OutofMRailDst/SlowTrainSpeed
HaulOutofShaft Combi	นาที	OutofShaftDst/SlowTrainSpeed
InstallSL Combi		
เกิดเหตุการณ์ Segment Erector และระบบสนับสนุนขัดข้อง	นาที	PrepareToInst + Inst_InvertSL + Inst_LeftSL + Inst_RightSL + (Inst_CrownSL x 2) + Inst_KeySL + SegmentErectorBreakDown
ไม่เกิดเหตุการณ์ Segment Erector และระบบสนับสนุนขัดข้อง	นาที	PrepareToInst + Inst_InvertSL + Inst_LeftSL + Inst_RightSL + (Inst_CrownSL x 2) + Inst_KeySL
LoadSL Combi	นาที	(Load_SL + SL_ToShaft + SL_ToUnderGround) x 2
LocoIn Combi	นาที	CarShifter_Operate + Inst_Loco
LocoOut Combi	นาที	Release_Loco + CarShifter_Operate

ตารางที่ ง.3 สมการที่ใช้คำนวณระยะเวลาขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์ภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model (ต่อ)

สัญลักษณ์และพารามิเตอร์นำเข้า	หน่วย	สมการ
ReturnIntoDRail Combi	นาที	IntoDRailDst/SlowTrainSpeed
ReturnIntoMRail Combi	นาที	IntoMRailDst/SlowTrainSpeed
ReturnOutofDRail Combi	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
ReturnOutofMRail Combi	นาที	OutofDRailDst/SlowTrainSpeed
UnloadSoil Combi		
เกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง	นาที	((MuckCar_ToGround + MuckCar_ToUnloadSoil + MuckCar_ToShaft + MuckCar_ToUnderGround) x 6)/ CoOptTempGantryCrane + CarShifterBreakDown + GantryCraneBreakDown + GantryCraneStop
ไม่เกิดเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อขั้นตอนการนำดินไปทิ้ง	นาที	(MuckCar_ToGround + MuckCar_ToUnloadSoil + MuckCar_ToShaft + MuckCar_ToUnderGround) x 6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ
ตัวอย่างชุดคำสั่งที่ใช้สร้างแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์ ประเภท Discrete-Event Simulation Model ของโครงการกรณีศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างชุดคำสั่งแบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) การก่อสร้างอุโมงค์ประเภท Discrete-Event Simulation Model โครงการกรณีศึกษาที่สร้างโดยใช้โปรแกรม Stroboscope มีดังนี้

```
PRINT StdOutput "    _____________________________________________\n";
PRINT StdOutput \n;
PRINT StdOutput "              Development of Simulation Models\n";
PRINT StdOutput "          for Drainage Tunneling Project Planning\n";
PRINT StdOutput "    _____________________________________________\n";
PRINT StdOutput \n;
/****************************************xTyL_zkm*************************************************+

/*****************************1. Resource and Decision Parameters*************************+

/1.1 Constant Parameters
        VARIABLE NumToSim                   20; /Number to Simulate
        VARIABLE NumTBMs                     1; /Number of TBMs
        VARIABLE NumInitLocos                2; /Number of Initial Locomotives
        VARIABLE NumInitTrains               2; /Number of Initial Trains
        VARIABLE NumLocosInStorage           2; /Number of Locomotive in Loco
                                                /Storage
        VARIABLE NumTrainsInStorage          2; /Number of Trains in Train
                                                /Storage
        VARIABLE NumCarShifters              1; /Number of Car Shifters
        VARIABLE CapHydraulicSupport         1; /Capacity of Hydraulic Support
                                                /for Segment Lining Sets
        VARIABLE CapShaft_DRail              1; /Capacity of Shaft_DRail
        VARIABLE CapDRail_MRail              1; /Capacity of DRail_MRail
        VARIABLE CapMRail_Tunnel             1; /Capacity of MRail_Tunnel
        VARIABLE CapEntranceDRail            1; /Capacity of Entrance DRail
```

VARIABLE CapEntranceMRail 1; /Capacity of Entrance MRail

VARIABLE CapExitYRail 1; /Capacity of Exit YRail

VARIABLE CapExitDRail 1; /Capacity of Exit DRail

VARIABLE CapExitMRail 1; /Capacity of Exit MRail

VARIABLE IntDstToExtendRail 6; /Interval Distance to
/Extend Rail (m)

VARIABLE ShiftLength 720; /Shift Length per Crew (min)

VARIABLE TrainLength 52.40; /Train Length (m)

VARIABLE 7 7

VARIABLE 7 7

VARIABLE 7 7

/1.1.1 Stage of the Excavation Parameter

/(0 = Stage 1, 1 = Stage 2, 2 = Stage 3, 3 = Stage 4)

SAVEVALUE CurExcDst InitExcDst; /Current Excavation
/Distance (m)

VARIABLE CurStage 'CurExcDst > 4500 ? 3 :
CurExcDst > 2100 ? 2 :
CurExcDst > 1000 ? 1 : 0';

/1.1.2 Waiting Rail Specification Parameters

VARIABLE StrLengthWaitingRail 60; /Straight Length of
/Waiting Rail (m)

VARIABLE YLengthWaitingRail 10.80; /Y Length of
/Waiting Rail (m)

/1.1.3 Train Speed Parameters

VARIABLE SlowTrainSpeed Pert[41.67,50,58.33]; /(m/min)

VARIABLE TrainSpeed Pert[91.67,100,108.33]; /(m/min)

/1.1.4 Probability of the Unforeseeable Events Parameters

```
VARIABLE ProbCarShifterBreakDown          0.0014;
VARIABLE ProbGantryCraneBreakDown         0.0061;
VARIABLE ProbGantryCraneStop              0.0028;
VARIABLE ProbTempGantryCraneOperate       0.0210;
VARIABLE ProbSegmentErectorBreakDown      0.0023;
VARIABLE ProbTBMBreakDown                 0.0116;
VARIABLE ProbTrainDerail                  0.0218;
```

/1.2 Array Parameters

/1.2.1 Excavation Rate Parameter

```
/(Row 0 = Fine Sand, 1 = Silty Fine Sand, 2 = Silty Clay)
ARRAY ExcRateTable 3 3    {
                            46    61    70
                            50    66    70
                            33    51    70 };          /(mm/min)
```

/1.2.2 Excavation Length Parameter

```
/(Row 0 = 0.60 m for Curve, 1 = 1.20 m for Straight)
ARRAY ExcLengthTable 2 1  {
                            0.60
                            1.20 };                   /(m)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

/1.2.3 Distance between YRail and DRail Parameter

```
/(Row 0 = Stage 1, 1 = Stage 2, 2 = Stage 3, 3 = Stage 4)
ARRAY YRail_DRailTable 4 1 {
                                    0
                                    686
                                    686
                                    2336 };                    /(m)
```

/1.2.4 Distance between DRail and MRail Parameter

```
/(Row 0 = Stage 1, 1 = Stage 2, 2 = Stage 3, 3 = Stage 4)
ARRAY DRail_MRailTable 4 1 {
                                    0
                                    0
                                    916
                                    1666 };                    /(m)
```

/1.2.5 Number of Tunnel Section Parameter

```
/(Row 0 = Stage 1, 1 = Stage 2, 2 = Stage 3, 3 = Stage 4)
ARRAY SectionTable 4 1      {
                                    2
                                    4
                                    6
                                    6 };
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Array Parameters

Array Parameters เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้สร้างพารามิเตอร์นำเข้าสำหรับจัดเก็บข้อมูลที่มีการอ้างอิงในรูปแบบของตาราง โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้จัดเก็บข้อมูลโครงการกรณีศึกษาที่มีการอ้างอิงในรูปแบบของตารางจำนวน 5 ชุดข้อมูลได้แก่

(1) อัตราขุดเจาะอุโมงค์ตามสภาพชั้นดินที่แตกต่างกันของ Tunnel Boring Machine (TBM)

(2) ระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ซึ่งมี 2 ระยะ ได้แก่ 0.60 เมตรสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ทางโค้ง และ 1.20 เมตรสำหรับการขุดเจาะอุโมงค์ทางตรง

(3) ระยะทางระหว่างรางพักรูปตัว Y (YRail) กับรางพักชนิดที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Double Rail (DRail)

(4) ระยะทางระหว่างรางพัก DRail กับรางพักชนิดที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ที่เรียกว่า Movable Type Double Rail (MRail)

(5) จำนวนช่วงของอุโมงค์โดยแบ่งช่วงตามจำนวนรางพักที่ใช้

```
/*************************************2. Auxiliary Parameters*************************************+

/2.1 Collector Parameters

    /2.1.1 Collector Parameters of the Productivity
    COLLECTOR Est_WorkingTime*;                 /Estimation Working
                                                /Time          (Day)
    COLLECTOR Est_AdvanceRate*;                 /Estimation Advance
                                                /Rate          (m/12-hr Shift)
    COLLECTOR Val_WorkingTime*;                 /Validation Working
                                                /Time          (Day)
    COLLECTOR Val_AdvanceRate*;                 /Validation Advance
                                                /Rate          (m/12-hr Shift)

    COLLECTOR       7
    COLLECTOR       7
    COLLECTOR       7
```

/2.1.2 Collector Parameters of the Support Processes Durations

```
COLLECTOR SumDurChangeCutterBits;          /Summary Durations of
                                           /Changing Cutter Bits
                                           /from n Cycles          (min)
COLLECTOR SumDurInstallDRailandMRail;      /Summary Durations of
                                           /Installing DRail and
                                           /MRail from n Cycles    (min)
COLLECTOR SumDurMonthlyStop;               /Summary Durations of
                                           /Monthly Stop
                                           /from n Cycles          (min)
COLLECTOR       7
COLLECTOR       7
COLLECTOR       7
```

/2.2 Initial Value of the Auxiliary Parameters

```
SAVEVALUE CurYRail_DRailDst          0; /Current Distance between
                                        /YRail and DRail          (m)
SAVEVALUE CurDRail_MRailDst          0; /Current Distance between
                                        /DRail and MRail          (m)
SAVEVALUE ChangeCutterBitsDst        0; /Change Cutter Bits
                                        /Distance                 (m)
SAVEVALUE ExcLength                  0; /Excavation Length        (m)
SAVEVALUE NumCurWorkingLocos   NumInitLocos;
SAVEVALUE NumCurWorkingTrains  NumInitTrains;
SAVEVALUE TimeToEndShift             0; /Time to End Shift
SAVEVALUE       7                    7
SAVEVALUE       7                    7
SAVEVALUE       7                    7
```

```
/0 = Not Assigning, 3 = Change Cutter Bits, 4 = Install DRail and MRail,
/5 = Monthly Stoppage,   6 = Remove MRail
SAVEVALUE AssignSupportProcesses          0;

/0 = Fine Sand, 1 = Silty Fine Sand, 2 = Silty Clay
SAVEVALUE GroundClass                     0;

/0 = Not End Shift, 1 = End Shift
SAVEVALUE SwitchCheckTimeToEndShift       0;

/0 = Not Releasing, 1 = Releasing
SAVEVALUE SwitchReleaseLoco               0;

/0 = Not Releasing, 1 = Releasing
SAVEVALUE SwitchReleaseTrain              0;

/0 = Not Tunneling, 1 = Tunneling
SAVEVALUE SwitchTunneling                 1;
```

/2.3 Condition and Equation of Auxiliary Parameters

/2.3.1 Excavate Rate Parameter

```
VARIABLE ExcRate     'Pert[ExcRateTable[GroundClass,0],
                           ExcRateTable[GroundClass,1],
                           ExcRateTable[GroundClass,2]]';    /(mm/min)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

/2.3.2 Validation of the Simulation Time Parameter

```
VARIABLE Val_SimTime        'SimTime - SumDurMonthlyStop.SumVal -
                             SumDurInstallDRailandMRail.SumVal -
                             SumDurRemoveMRail.SumVal -
                             SumDurChangeCutterBits.SumVal'; /(min)
```

/2.3.3 Into YRail Distance Parameter

```
VARIABLE IntoYRailDst       'StrLengthWaitingRail +
                             YLengthWaitingRail';            /(m)
```

/2.3.4 Out of Shaft Distance Parameter

```
VARIABLE OutofShaftDst      'YLengthWaitingRail +
                             TrainLength';                   /(m)
```

/2.3.5 Current Distance to Tunnel Parameter

```
VARIABLE ToTunnelDst    'CurExcDst - TrainLength - IntoYRailDst -
                         CurYRail_DRailDst - CurDRail_MRailDst -
                         IntoDRailDst - OutofDRailDst -
                         IntoMRailDst - OutofMRailDst';  /(m)
```

<u>ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Condition and Equation of Auxiliary Parameters</u>

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Condition and Equation of Auxiliary Parameters สำหรับแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาใช้ในการกำหนดเงื่อนไขและสมการการคำนวณภายในแบบจำลองสถานการณ์ แบ่งได้เป็น 5 กลุ่มดังนี้

(1) Excavate Rate Parameter เป็นเงื่อนไขอัตราการขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามสภาพชั้นดินที่ขุดเจาะ

(2) Validation of the Simulation Time Parameter เป็นสมการประมาณอัตราการก่อสร้างอุโมงค์และระยะเวลาก่อสร้างอุโมงค์ที่ใช้สำหรับทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์

(3) Into YRail Distance Parameter เป็นสมการคำนวณระยะทางที่ขบวนรถจักรใช้เข้าไปในรางพัก YRail ที่ต้นอุโมงค์

(4) Out of Shaft Distance Parameter เป็นสมการคำนวณระยะทางที่ขบวนรถจักรใช้ออกจากปล่องขนถ่ายดิน (Shaft) ต้นอุโมงค์

(5) Current Distance to Tunnel Parameter เป็นสมการคำนวณระยะการเดินทางของขบวนรถจักรระหว่างรางพักที่อยู่ใกล้หน้าอุโมงค์มากที่สุดกับหน้าอุโมงค์

```
/***************************************3. Resource Types*****************************************+

/3.1 Generic Resource Type
        GENTYPE TBM;
        GENTYPE Locomotive;
        GENTYPE Cs;                         /Car Shifter
        GENTYPE HS;                         /Hydraulic Support
        GENTYPE Lng;                        /Length
        GENTYPE   7
        GENTYPE   7
        GENTYPE   7

/3.2 Characterized Resource Type
                CHARTYPE            Train       IntDstToChangeBattery;
                /                                   (m)
                SUBTYPE     Train   Xiandai      15000;

                /Total Distance before Charge Up Battery
                SAVEPROP    Train       TrainDst;
                VARPROP     Train   BatteryStatus
                                    'IntDstToChangeBattery - TrainDst';
```

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Characterizes Resource Type

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Characterized Resource Type ใช้ในการสร้างพารามิเตอร์ทรัพยากรขบวนรถจักรของโครงการกรณีศึกษา เนื่องจากขบวนรถจักรแต่ละขบวนต้องเก็บค่าผลรวมระยะการเดินทางไปกลับระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับหน้าอุโมงค์ โดยเก็บค่าดังกล่าวไว้ใน SAVEPROP TrainDst และเก็บค่าแบตเตอรี่ที่เหลือไว้ใน VARPROP BatteryStatus

```
/*************************************4. Network Nodes*************************************+

/4.1 NORMAL
        NORMAL ChangeBattery;
        NORMAL ExtendRail;
        NORMAL MonthlyStop;
        NORMAL InstallDRailandMRail;
        NORMAL RemoveMRail;
        NORMAL ChangeCutterBits;
        NORMAL ReturnToShaft;
        NORMAL SetUpForNextShift;
        NORMAL      7
        NORMAL      7
        NORMAL      7

/4.2 COMBI
        COMBI ReleaseTrain;
        COMBI LoadSL;
        COMBI ReleaseLoco;
        COMBI LocoIn;
        COMBI HaulOutofShaft;
        COMBI HaulOutofDRail;
        COMBI Excavate;
        COMBI InstallSL;
        COMBI ReturnOutofMRail;
```

```
COMBI ReturnIntoDRail;
COMBI ReturnOutofDRail;
COMBI LocoOut;
COMBI      7
COMBI      7
COMBI      7

/4.3 CONSOLIDATOR
CONSOLIDATOR ChangeCondition;
CONSOLIDATOR LengthEnough;
CONSOLIDATOR SupportProcesses;

/4.4 FORK
FORK ChangeBatteryDone                Train;
FORK SupportProcessesDone             Sch;
FORK TimeToEndShiftDone               Train;

/4.5 QUEUE
QUEUE LocoStorage                     Locomotive;
QUEUE LocoUnits                       Locomotive;
QUEUE TrainWait_1                     Train;
QUEUE CarShifterUnits                 Cs;
QUEUE EntranceYRail                   YRail;
QUEUE      7                            7
QUEUE      7                            7
QUEUE      7                            7

/*****************************************5. Network Links*****************************************+

LINK Tr7          ChangeBatteryDone     TrainWait_1;
LINK Tr8          ChangeBatteryDone     ChangeBattery;
```

```
LINK Tr9          ChangeBattery          TrainWait_1;
LINK Tr11         HaulOutofShaft         HaulToDRail          Train;
LINK Cs2          LocoIn                 CarShifterUnits;
LINK Cs3          ChangeBattery          CarShifterUnits;
LINK YRail2       HaulOutofShaft         EntranceYRail;
LINK SDRail2      HaulIntoDRail          Shaft_DRail;
LINK DRail2       HaulOutofDRail         EntranceDRail;
LINK DMRail2      HaulIntoMRail          DRail_MRail;
LINK Tr22         HaulToTunnel           WaitToUnloadSL;
LINK Lng2         LengthEnough           ExtendRail           Lng;
LINK Sch1         Excavate               SupportProcesses     Sch;
LINK Sch2         SupportProcesses       SupportProcessesDone;
LINK Sch3         SupportProcessesDone   ChangeCutterBits;
LINK Sch4         SupportProcessesDone   InstallDRailandMRail;
LINK Sch5         SupportProcessesDone   MonthlyStop;
LINK Sch6         SupportProcessesDone   RemoveMRail;
LINK Tr40         TimeToEndShiftDone     WaitToLocoOut;
LINK Tr41         TimeToEndShiftDone     SetUpForNextShift;
LINK  7           7                      7
LINK  7           7                      7
LINK  7           7                      7
```

/**********6. General Section of the Tunneling Simulation**********+

/6.1 Priority of the Haul-Return in Tunnel

/6.1.1 Priority of the Haul-Return between Shaft and DRail

```
PRIORITY ReturnOutofDRail    1;
PRIORITY HaulOutofShaft      0;
```

/6.1.2 Priority of the Haul-Return between DRail and MRail

PRIORITY HaulOutofDRail 1;

PRIORITY ReturnOutofMRail 0;

<u>ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Priority of the Haul-Return in Tunnel</u>

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Priority of the Haul-Return in Tunnel ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาใช้กำหนดความสำคัญของเส้นทางระหว่างปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์กับรางพัก DRail และเส้นทางระหว่างรางพัก DRail กับรางพัก MRail โดยใช้คำสั่ง PRIORITY ควบคุมให้ QUEUE ที่เกี่ยวข้องปล่อยทรัพยากรให้กับขั้นตอนที่มีความสำคัญมากกว่าเริ่มทำงานก่อน โดยคำสั่ง PRIORITY จะใช้ในขั้นตอน ReturnOutofDRail Combi ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ขบวนรถจักรเดินทางออกจากรางพัก DRail เพื่อเดินทางต่อไปยัง MRail ซึ่งจะถูกกำหนดให้มีค่า PRIORITY เท่ากับ 1 และขั้นตอน HaulOutofShaft Combi มีค่า PRIORITY เท่ากับ 0 นั่นคือในกรณีที่ ReturnOutofDRail Combi และ HaulOutofShaft Combi พร้อมที่จะเริ่มทำงานในเวลาเดียวกัน Shaft_DRail Queue จะปล่อย SDRail ผ่าน SDRail3 Link เพื่อให้ ReturnOutofDRail Combi ทำงานก่อน เช่นเดียวกับในกรณีของขั้นตอน HaulOutofDRail Combi ซึ่งจะได้เริ่มทำงานก่อนขั้นตอน ReturnOutofMRail Combi ในกรณีที่ขั้นตอนทั้งสองพร้อมที่จะเริ่มทำงานในเวลาเดียวกัน

/6.2 Releasing Resources

RELEASEAMT Cs2 'CarShifterUnits.CurCount < 1 &
!ChangeBattery.CurInst ? 1 : 0';

RELEASEAMT Cs3 'CarShifterUnits.CurCount < 1 ? 1 : 0';

RELEASEAMT YRail2 'EntranceYRail.CurCount < 1 ? 1 : 0';

RELEASEAMT SDRail2 1;

RELEASEAMT DRail2 1;

RELEASEAMT DMRail2 1;

RELEASEAMT Sch1 'AssignSupportProcesses != 0 ? 1 : 0';

RELEASEAMT 7 7;

RELEASEAMT 7 7;

RELEASEAMT 7 7;

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Releasing Resources

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Releasing Resources ใช้กำหนดให้แบบจำลองสถานการณ์ปล่อยทรัพยากรออกมา ณ ขั้นตอนการทำงานที่กำหนดเพื่อให้สามารถจำลองสถานการณ์ได้ถูกต้องตามหลักการก่อสร้างอุโมงค์ สำหรับการอธิบายขั้นตอนการทำงานของกลุ่มชุดคำสั่งย่อยดังกล่าวที่ใช้ในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษาจะยกตัวอย่างการปล่อยเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักร (CarShifter) ผ่านทาง Cs2 Link โดยคำสั่ง RELEASEAMT Cs2 จะสั่งให้ปล่อยเครื่องเคลื่อนย้ายขบวนรถจักรหรือ Cs ผ่านทาง Cs2 Link เมื่อ LocoIn Combi ทำงานเสร็จเรียบร้อย โดยจะปล่อยออกมา 1 ตัวในกรณีที่ Cs ใน CarShifterUnits Queue มีจำนวนเท่ากับ 0 และขั้นตอน ChangeBattery Normal ณ ขณะนั้นไม่ได้ทำงาน หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวก็จะไม่ทำการปล่อย Cs ออกมา (กำหนดให้ปล่อยออกมา 0 ตัว)

/6.3 Tunneling Policies

```
SEMAPHORE Excavate          'CurExcDst < FinExcDst   &
                             SwitchTunneling == 1    &
                             !SetUpForNextShift.CurInst';
SEMAPHORE InstallSL         'SwitchTunneling == 1    &
                             !SetUpForNextShift.CurInst';
SEMAPHORE LoadSL            'CurExcDst < FinExcDst   &
                             SwitchTunneling == 1  &
                             !SetUpForNextShift.CurInst';
SEMAPHORE     7                        7
SEMAPHORE     7                        7
SEMAPHORE     7                        7
```

/Shaft Policies when Release Train and Locomotive

```
SEMAPHORE LocoOut           '!ReleaseTrain.CurInst      &
                             !ReleaseLoco.CurInst       &
                             !LoadSL.CurInst            &
                             !LocoIn.CurInst            &
                             !ChangeBattery.CurInst';
```

```
/Shaft Policies when Start Simulation Model
SEMAPHORE LoadSL                    '!LocoIn.CurInst            &
                                     !ChangeBattery.CurInst &
                                     !HaulOutofShaft.CurInst &
                                     TrainWait_1.CurCount == 0';
```

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Tunneling Policies

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Tunneling Policies ใช้กำหนดกฎการทำงานของขั้นตอนทั่วไปภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา เช่น ขั้นตอน Excavate Combi, InstallSL Combi และ LoadSL Combi เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการกำหนดกฎการทำงานเมื่อมีการปล่อยขบวนรถจักรและหัวรถจักร (Locomotive) ออกมาใช้งานภายในอุโมงค์ (Shaft Policies when Release Train and Locomotive) โดยกำหนดให้ LocoOut Combi สามารถปล่อยหัวรถจักรออกมาได้เมื่อขั้นตอนต่อไปนี้ไม่ได้ทำงาน ได้แก่ ขั้นตอน ReleaseTrain Combi, ReleaseLoco Combi, LoadSL Combi, LocoIn Combi และ ChangeBattery Normal และใช้กำหนดกฎการทำงานที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์เมื่อเริ่มต้นจำลองสถานการณ์ (Shaft Policies when Start Simulation Model) เพื่อให้ขั้นตอนการทำงานถูกต้องตรงกับสภาพการทำงานจริงของโครงการที่ศึกษา โดยกำหนดให้ LoadSL Combi จะเริ่มทำงานได้เมื่อขั้นตอน LocoIn Combi, ChangeBattery Normal และ HaulOutofShaft Combi ไม่ได้ทำงานและไม่มีขบวนรถจักรอยู่ใน TrainWait_1 Queue

```
/**********************7. Specific Section of the Tunneling Simulation*******************+

/7.1 Current Excavation Distance
    ONSTART Excavate CurExcDst 'CurExcDst + ExcLength';                    /(m)
```

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Current Excavation Distance

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Current Excavation Distance ใช้ในการคำนวณตำแหน่งการก่อสร้างอุโมงค์ ณ เวลาปัจจุบันภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา โดยให้แบบจำลองสถานการณ์ทำการเพิ่มระยะทางก่อสร้างอุโมงค์ ณ เวลาปัจจุบันที่เก็บอยู่ใน SAVEVALUE CurExcDst ซึ่งจะเพิ่มค่าตามระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM ในรอบนั้นที่เก็บอยู่ใน

SAVEVALUE ExcLength ก่อนที่จะเริ่มขั้นตอนการขุดเจาะอุโมงค์ใน Excavate Combi (ทรัพยากรที่ใช้ในการขุดเจาะอุโมงค์ ได้แก่ TBM และ Train นั้นได้เข้าไปอยู่ใน Excavate Combi เรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ได้เริ่มขุดเจาะอุโมงค์)

/7.2 Controlling of the Shift Termination

/7.2.1 Decision of TimeToEndShiftDone Fork

```
STRENGTH Tr40        'SwitchCheckTimeToEndShift == 0';
STRENGTH Tr41        'SwitchCheckTimeToEndShift == 1';
```

/7.2.2 Checking Time to End Shift

```
ONEND ReturnToShaft SwitchCheckTimeToEndShift
                    'TimeToEndShift <= SimTime/ShiftLength ?
                     1 : 0';
ONSTART SetUpForNextShift TimeToEndShift
                          'TimeToEndShift + 1';
ONSTART SetUpForNextShift SwitchCheckTimeToEndShift    0;
```

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Controlling of the Shift Termination

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Controlling of the Shift Termination ใช้ควบคุมขั้นตอนสำหรับการเตรียมก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ของโครงการกรณีศึกษาหลังจากที่ผลัดเก่าทำงานครบระยะเวลาก่อสร้าง 12 ชั่วโมงที่กำหนดไว้ใน VARIABLE ShiftLength เรียบร้อยแล้ว เช่น การเปลี่ยนกลุ่มคนงาน การถ่ายทอดคำสั่งและงานที่ต้องทำในผลัดใหม่ และการตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องจักรก่อนทำการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ เป็นต้น สำหรับการทำงานดังกล่าวจะเริ่มเมื่อ TimeToEndShiftDone Fork ปล่อยขบวนรถจักรให้ไหลผ่าน Tr41 Link ไปยังขั้นตอน SetUpForNextShift Normal ซึ่งเป็นขั้นตอนสำหรับการเตรียมก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการตัดสินใจของ TimeToEndShiftDone Fork ได้แก่ ค่าของ SAVEVALUE SwitchCheckTimeToEndShift ที่ใช้แทนคำสั่งให้ขั้นตอนเตรียมการก่อสร้างอุโมงค์ผลัดใหม่ทำงาน นั่นคือหากมีค่าเท่ากับ 1 ก็จะปล่อยให้ขบวนรถจักรไหลผ่าน Tr41 Link ไปทำงานในขั้นตอนดังกล่าว แต่ถ้าหากมีค่าเท่ากับ 0 ก็จะปล่อยให้ไหลผ่าน Tr40 Link เพื่อไปทำงาน

ในขั้นตอนอื่นต่อไป สำหรับการกำหนดค่า SAVEVALUE SwitchCheckTimeToEndShift นั้น จะเริ่มเมื่อขบวนรถจักรเดินทางกลับมายังปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ในขั้นตอน ReturnToShaft Normal เสร็จเรียบร้อยโดยใช้คำสั่ง ONEND มีเงื่อนไขคือ หาก SimTime/ShiftLength ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ก่อสร้างอุโมงค์ครบผลัดที่กำหนด 12 ชั่วโมงมีค่ามากกว่า SAVEVALUE TimeToEndShift ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สนับสนุนการประมวลผลที่ใช้เก็บระยะเวลาอ้างอิงการทำงานครบผลัด 12 ชั่วโมง SAVEVALUE SwitchCheckTimeToEndShif จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะทำให้ TimeToEndShiftDone Fork ปล่อยขบวนรถจักรให้ไหลผ่าน Tr41 Link เข้าสู่ SetUpForNextShift Normal และหลังจากที่ทำงานเสร็จเรียบร้อย ขบวนรถจักรก็จะออกจาก SetUpForNextShift Normal ผ่าน Tr42 Link โดย SAVEVALUE TimeToEndShift จะถูกเพิ่มค่าขึ้นอีก 1 ค่า และ SAVEVALUE SwitchCheckTimeToEndShif จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 อีกครั้ง

/7.3 Controlling of the Support Processes

CONSOLIDATEWHEN SupportProcesses 'SupportProcesses.Sch.Count == 1';

ONEND SupportProcesses SwitchTunneling 0;

/7.3.1 Decision of SupportProcessesDone Fork

STRENGTH Sch3 'AssignSupportProcesses == 3'; /Change Cutter Bits

STRENGTH Sch4 'AssignSupportProcesses == 4'; /Install DRail and /MRail

STRENGTH Sch5 'AssignSupportProcesses == 5'; /Monthly Stoppage

STRENGTH Sch6 'AssignSupportProcesses == 6'; /Remove MRail

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

/7.3.2 Assigning Support Processes

```
BEFOREEND Excavate AssignSupportProcesses
'ChangeCutterBitsDst >= (IntDstToChangeCutterBits - TBMLength) ? 3 :
 NumCurWorkingLocos  >  1 & PreStage != CurStage                ? 4 :
 TimeToMonthlyStop   <= SimTime/60/24/30                        ? 5 :
 (TimeToRemoveMRail  != 0                  &
  TimeToRemoveMRail <= SimTime/60/24 &
  (4500 - CurExcDst) >= IntDstMRail_TBM)                        ? 6 :
                                                                  0';
```

/7.3.3 ChangeCutterBits Normal

```
ONSTART Excavate ChangeCutterBitsDst
                        'ChangeCutterBitsDst + ExcLength';
ONEND ChangeCutterBits ChangeCutterBitsDst      0;
ONEND ChangeCutterBits SwitchTunneling          1;
ONEND ChangeCutterBits SumDurChangeCutterBits
                        'SimTime - ChangeCutterBits.LastStart';
```

/7.3.4 InstallDRailandMRail Normal

```
ONEND InstallDRailandMRail PreStage       CurStage;
ONEND InstallDRailandMRail SwitchTunneling        1;
ONEND InstallDRailandMRail SumDurInstallDRailandMRail
                        'SimTime - InstallDRailandMRail.LastStart';
```

/7.3.5 MonthlyStop Normal

```
ONEND MonthlyStop TimeToMonthlyStop
                        'TimeToMonthlyStop + IntTimeToMonthlyStop';
ONEND MonthlyStop SwitchTunneling               1;
ONEND MonthlyStop SumDurMonthlyStop
                        'SimTime - MonthlyStop.LastStart';
```

/7.3.6 RemoveMRail Normal

```
/Date to Remove MRail
ONEND InstallDRailandMRail TimeToRemoveMRail
                    'CurStage == 2 ?
                     SimTime/60/24 + IntTimeToRemoveMRail :
                     TimeToRemoveMRail';

ONEND RemoveMRail TimeToRemoveMRail
                    'TimeToRemoveMRail + IntTimeToRemoveMRail';
ONEND RemoveMRail SwitchTunneling          1;
ONEND RemoveMRail SumDurRemoveMRail
                    'SimTime - RemoveMRail.LastStart';
```

<u>ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Controlling of the Support Processes</u>

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Controlling of the Support Processes ใช้ควบคุมขั้นตอนการทำงานสำหรับกระบวนการสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา ได้แก่ ขั้นตอน ChangeCutterBits Normal, InstallDRailandMRail Normal, MonthlyStop Normal และ RemoveMRail Normal สำหรับการเลือกประเภทของงานที่จะทำนั้นได้ใช้คำสั่ง STRENGTH กำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจเลือกโดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

(1) หลังจากที่ขั้นตอน Excavate Combi ขุดเจาะอุโมงค์เสร็จเรียบร้อยแต่ยังไม่ได้ปล่อยทรัพยากรที่เกี่ยวข้องออกมา แบบจำลองสถานการณ์จะทำการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานของขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ตามที่ได้กำหนดไว้ในคำสั่ง BEFOREEND หากเงื่อนไขผ่านจะกำหนดค่าประเภทการทำงานใน SAVEVALUE AssignSupportProcesses ระหว่าง 3 ถึง 6 โดยตัวเลขแต่ละค่าจะแทนประเภทการทำงาน เช่น 3 แทนการเปลี่ยนฟันขุดเจาะ (Cutter Bit) ของ TBM เป็นต้น แต่ถ้าหากไม่มีเงื่อนไขใดผ่านจะกำหนดให้ SAVEVALUE AssignSupportProcesses มีค่าเท่ากับ 0

(2) เมื่อเงื่อนไขการทำงานขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ผ่าน Sch1 Link จะปล่อย Sch ซึ่งเป็นทรัพยากรกำหนดการทำงานขั้นตอนสนับสนุนการก่อสร้างอุโมงค์ออกมาโดยใช้

คำสั่งที่อยู่ในกลุ่มคำสั่งย่อย Releasing Resources ได้แก่คำสั่ง RELEASEAMT Sch1 'AssignSupportProcesses != 0 ? 1 : 0';

(3) หลังจากนั้น Sch จะไหลเข้าสู่ SupportProcesses Consolidator ซึ่งมีหน้าที่ปล่อย Sch ที่เก็บไว้ไปให้ขั้นตอนถัดไป ได้แก่ SupportProcessesDone Fork สำหรับคำสั่งที่ใช้ควบคุม SupportProcesses Consolidator ได้แก่ CONSOLIDATEWHEN ซึ่งใช้กำหนดเงื่อนไขให้ CONSOLIDATOR ปล่อย Sch เมื่อ Sch ใน SupportProcesses Consolidator มีค่าเท่ากับ 1

(4) ขั้นตอนต่อไป SupportProcessesDone Fork จะทำการเลือกงานที่จะทำโดยการปล่อย Sch ให้เข้าสู่ขั้นตอนที่กำหนดไว้ใน SAVEVALUE AssignSupportProcesses ตัวอย่างเช่น หาก SAVEVALUE AssignSupportProcesses มีค่าเท่ากับ 3 SupportProcessesDone Fork จะปล่อย Sch ให้เข้าสู่ ChangeCutterBits Normal เพื่อทำการเปลี่ยนฟันขุดเจาะของ TBM ต่อไป

/7.4 Controlling of the Locomotive and Train

/7.4.1 Decision of ChangeBatteryDone Fork

```
STRENGTH Tr7        'LocoIn.Train.BatteryStatus >  0';
STRENGTH Tr8        'LocoIn.Train.BatteryStatus <= 0';
```

/7.4.2 Changing Battery

```
ONRELEASE Tr9 TrainDst                  0;
ONRELEASE Tr22 TrainDst          'TrainDst + (CurExcDst * 2)';
```

/7.4.3 Releasing Locomotive from Storage

```
ONEND InstallDRailandMRail SwitchReleaseLoco      1;
SEMAPHORE ReleaseLoco   'SwitchReleaseLoco == 1          &
                         CurStage != 3                   &
                         CarShifterUnits.CurCount == 1   &
                         EntranceYRail.CurCount  == 1';
ONEND ReleaseLoco SwitchReleaseLoco               0;
ONEND ReleaseLoco NumCurWorkingLocos
                         'NumCurWorkingLocos + 1';
```

/7.4.4 Releasing Train from Storage

```
ONEND InstallDRailandMRail SwitchReleaseTrain        1;
SEMAPHORE ReleaseTrain    'SwitchReleaseTrain == 1            &
                          CurStage != 3                       &
                          CarShifterUnits.CurCount   == 1     &
                          EntranceYRail.CurCount     == 1';
ONEND ReleaseTrain SwitchReleaseTrain                 0;
ONEND ReleaseLoco NumCurWorkingTrains
                          'NumCurWorkingTrains + 1';
```

/7.4.5. Train Policies

```
ONEND HaulOutofShaft          SwitchCheckShaft 'CurStage == 0 ? 0 : 1';
ONEND HaulOutofDRail          SwitchCheckDRail 'CurStage == 1 ? 0 : 1';
ONEND ReturnIntoDRail         SwitchCheckDRail 1;
ONEND ReturnToShaft           SwitchCheckShaft 1;
SEMAPHORE HaulOutofShaft 'TrainWait_3.CurCount == 0 &
                          SwitchCheckShaft == 1';
SEMAPHORE HaulOutofDRail  'TrainWait_5.CurCount == 0 &
                          SwitchCheckDRail == 1';
SEMAPHORE ReturnOutofMRail 'TrainWait_9.CurCount == 0';
```

<u>ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Controlling of the Locomotive and Train</u>

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Controlling of the Locomotive and Train ใช้ในการควบคุมขั้นตอนการทำงานของหัวรถจักรและขบวนรถจักรในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Decision of ChangeBatteryDone Fork และ Changing Battery) การปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักรจากโรงเก็บ (Releasing Locomotive from Storage และ Releasing Locomotive from Storage) เพื่อนำไปใช้งานภายในอุโมงค์ตามแผนงานและตำแหน่งการก่อสร้างอุโมงค์ที่กำหนดไว้ มีรายละเอียดดังนี้

(1) Decision of ChangeBatteryDone Fork ใช้กำหนดเงื่อนไขการตัดสินใจของ ChangeBatteryDone Fork

(2) Changing Battery ใช้ควบคุมการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในขั้นตอน ChangeBattery Normal โดยจะเริ่มได้เมื่อ VARPROP BatteryStatus ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บสถานะแบตเตอรี่ของขบวนรถจักรแต่ละขบวนมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อเงื่อนไขดังกล่าวผ่าน ChangeBatteryDone Fork จะปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr8 Link เข้าสู่ ChangeBattery Normal แต่ถ้าหาก VARPROP BatteryStatus มีค่ามากกว่า 0 ChangeBatteryDone Fork จะปล่อยขบวนรถจักรผ่าน Tr7 Link เข้าสู่ TrainWait_1 Queue เพื่อเดินทางไปที่หน้าอุโมงค์ต่อไป สำหรับการกำหนดค่าของ BatteryStatus นั้นได้ใช้คำสั่ง VARPROP Train BatteryStatus 'IntDstToChangeBattery - TrainDst'; ระบุในกลุ่มชุดคำสั่งย่อย Characterized Resource Type ทำการกำหนดค่า ในขณะที่พารามิเตอร์ IntDstToChangeBattery นั้นเป็นพารามิเตอร์คุณสมบัติของทรัพยากรประเภท CHARTYPE โครงการกรณีศึกษา ได้แก่ ขบวนรถจักร โดยขบวนรถจักรได้ใช้ IntDstToChangeBattery กำหนดระยะทางวิ่งโดยประมาณต่อการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 15,000 เมตร และ SAVEPROP TrainDst เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เก็บรวบรวมระยะทางวิ่งของขบวนรถจักรแต่ละขบวนโดยใช้คำสั่ง ONRELEASE Tr22 TrainDst 'TrainDst + (CurExcDst * 2)'; เป็นการให้แบบจำลองสถานการณ์คำนวณระยะทางวิ่งของขบวนรถจักรในแต่ละรอบตามสมการที่ระบุอยู่ในคำสั่ง ONRELEASE เมื่อขบวนรถจักรไหลเข้ามาอยู่ใน Tr22 Link และจะกำหนดให้ SAVEPROP TrainDst มีค่าเท่ากับ 0 ทุกครั้งหลังจากที่เปลี่ยนแบตเตอรี่ในขั้นตอน ChangeBattery Normal เสร็จเรียบร้อย

(3) Releasing Locomotive from Storage และ Releasing Train from Storage ใช้ควบคุมการปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักรซึ่งจะถูกปล่อยออกมาจาก LocoStorage Queue และ TrainStorage Queue ได้เมื่อเงื่อนไขที่กำหนดไว้ใน ReleaseLoco Combi และ ReleaseTrain Combi ผ่าน สำหรับเงื่อนไขแรกได้แก่ SAVEVALUE SWitchReleaseLoco และ SAVEVALUE SwitchReleaseTrain จะต้องมีค่าเท่ากับ 1 (0 ไม่ปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักร, 1 ปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักร) สำหรับการคำนวณค่าดังกล่าวจะเริ่มหลังจากที่ขั้นตอน InstallDRailandMRail Normal ทำงานและปล่อยทรัพยากรที่เกี่ยวข้องให้ขั้นตอนถัดไปเสร็จเรียบร้อย เงื่อนไขต่อไปได้แก่ VARIABLE CurStage จะต้องไม่เท่ากับ 3 (ไม่ปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักรในช่วงก่อสร้างอุโมงค์ Main Drive ที่ 4) และจะต้องไม่มีขบวนรถจักรทำงานอยู่ที่ปล่องขนถ่ายดินต้นอุโมงค์ นั่นคือ CarShaifterUnits Queue และ EntranceYRail Queue มีค่าเท่ากับ 1 ต่อมาหลังจากที่ปล่อยหัวรถจักรและขบวนรถจักรในขั้นตอน ReleaseLoco Combi และ ReleaseTrain Combi เสร็จเรียบร้อย SAVEVALUE SwitchReleaseLoco และ SAVEVALUE SwitchReleaseTrain จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 อีกครั้งโดย SAVEVALUE

NumCurWorkingLocos และ SAVEVALUE NumCurWorkingTrains ซึ่งใช้บันทึกจำนวนหัวรถจักรและขบวนรถจักรที่ใช้งานอยู่ภายในอุโมงค์จะถูกเพิ่มค่าขึ้น 1 ค่า

(4) Train Policies ใช้กำหนดกฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์ของแบบจำลองสถานการณ์ให้ตรงกับกฎการเดินทางของขบวนรถจักรภายในอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษา ตัวอย่างเช่น การกำหนดให้ขบวนรถจักรไม่สามารถไปหยุดรออยู่ที่รางระหว่างรางพักเพื่อที่จะเข้าไปในรางพักถัดไปได้ นั่นคือขบวนรถจักรจะออกจากรางพักได้เมื่อรางพักถัดไปว่างเท่านั้น เป็นต้น

/7.5 Controlling of the Rail Arrangement

/7.5.1 Starting Extend Rail Process

```
CONSOLIDATEWHEN LengthEnough
                'LengthEnough.Lng.Count >= IntDstToExtendRail';
```

/7.5.2 Into DRail Distance

```
ONEND InstallDRailandMRail IntoDRailDst
                'CurStage >= 1 ?
                 StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail : 0';        /(m)
```

/7.5.3 Into MRail Distance

```
ONEND InstallDRailandMRail IntoMRailDst
                'CurStage >= 2 ?
                 StrLengthWaitingRail + YLengthWaitingRail : 0';        /(m)
```

/7.5.4 Out of DRail Distance

```
ONEND InstallDRailandMRail OutofDRailDst
                'CurStage >= 1 ?
                 YLengthWaitingRail + TrainLength : 0';                 /(m)
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
/7.5.5 Out of MRail Distance
        ONEND InstallDRailandMRail OutofMRailDst
                        'CurStage >= 2 ?
                        YLengthWaitingRail + TrainLength : 0';          /(m)

/7.5.6 Current Distance between YRail and DRail
        ONEND InstallDRailandMRail CurYRail_DRailDst
                        'YRail_DRailTable[CurStage, 0]';

/7.5.7 Current Distance between DRail and MRail

        /When Installing
        ONEND InstallDRailandMRail CurDRail_MRailDst
                        'DRail_MRailTable[CurStage, 0]';

        /When Removing
        ONEND RemoveMRail CurDRail_MRailDst
                        'CurExcDst - TrainLength - IntoYRailDst -
                        CurYRail_DRailDst - IntoDRailDst -
                        OutofDRailDst - IntDstMRail_TBM';
```

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Controlling of the Rail Arrangement

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Controlling of the Rail Arrangement ใช้ในการควบคุมการต่อราง สำหรับขบวนรถจักร ควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรภายในแบบจำลองสถานการณ์ และปรับระยะห่างระหว่างรางพักในแต่ละช่วงตามแผนงานที่โครงการกรณีศึกษาได้กำหนดไว้ มีรายละเอียดดังนี้

(1) Starting Extend Rail Process ใช้ควบคุมการต่อรางสำหรับขบวนรถจักร โดยจะเริ่มเมื่อ LengthEnough Consolidator ปล่อย Lng ซึ่งเป็นทรัพยากรที่แทนระยะช่องว่างด้านหลัง TBM ผ่าน Lng2 Link ไปให้ ExtendRail Normal เมื่อผลรวมของ Lng ที่อยู่ใน LengthEnough Consolidator มากกว่าหรือเท่ากับ VARIABLE IntDstToExtendRail (กำหนดไว้ 6 เมตรสำหรับ

การต่อรางความยาว 5 เมตร) และเมื่อ LengthEnough Consolidator ทำงานเสร็จเรียบร้อย ผลรวมของ Lng ที่อยู่ใน LengthEnough Consolidator ก็จะถูกกำหนดค่าเป็น 0 และจะเริ่มต้นรวบรวมค่าของ Lng ใหม่อีกครั้ง

(2) Into DRail Distance, Out of DRail Distance, Into MRail Distance และ Out of MRail Distance ใช้ควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของขบวนรถจักรในการเข้าและออกจากรางพักโดยให้มีค่าเท่ากับ 0 ในช่วงที่ยังไม่ได้ติดตั้งรางพัก สำหรับช่วงที่มีการติดตั้งรางพักเสร็จเรียบร้อยแล้วจะกำหนดให้การเคลื่อนที่เข้ารางพักมีค่าเท่ากับผลรวมของ VARIABLE StrLengthWaitingRail และ VARIABLE YLengthWaitingRail ในขณะที่การเคลื่อนที่ออกจากรางพักจะมีค่าเท่ากับผลรวมของ VARIABLE YLengthWaitingRail และ VARIABLE TrainLength

(3) Current Distance between YRail and DRail และ Current Distance between DRail and MRail ใช้ปรับระยะห่างระหว่างรางพักในแต่ละช่วงให้สอดคล้องกับแผนงานโครงการกรณีศึกษา

/7.6 Controlling of the Change Condition

CONSOLIDATEWHEN ChangeCondition '(ChangeCondition.Train.Count == 1)';

/7.6.1 Changing Excavation Length

ONEND ChangeCondition ExcLength

'CurExcDst > 5099.591 ? ExcLengthTable[1,0] :
CurExcDst > 5075.551 ? ExcLengthTable[0,0] :
CurExcDst > 4961.456 ? ExcLengthTable[1,0] :
CurExcDst > 4852.074 ? ExcLengthTable[0,0] :
CurExcDst > 4497.779 ? ExcLengthTable[1,0] :
CurExcDst > 4446.093 ? ExcLengthTable[0,0] :

7 7
7 7
7 7

/7.6.2 Changing Ground Class

ONEND ChangeCondition GroundClass

'CurExcDst >= 4333.000 - TBMLength ? 2 :

CurExcDst >= 3750.000 - TBMLength ? 1 :

0';

ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Controlling of the Change Condition

กลุ่มชุดคำสั่งย่อย Controlling of the Change Condition ใช้ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสถานะภายในแบบจำลองสถานการณ์การก่อสร้างอุโมงค์โครงการกรณีศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM สำหรับทางตรงและทางโค้ง และการเปลี่ยนสภาพชั้นดินที่ขุดเจาะโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจแนวเส้นทางก่อนการก่อสร้างอุโมงค์ โดย ChangeCondition Consolidator จะทำงานทุกครั้งที่ขบวนรถจักรไหลผ่านเข้าไป หลังจากนั้นคำสั่ง ONEND จะทำงานโดยให้ SAVEVALUE ExcLength เปลี่ยนระยะขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM และ SAVEVALUE GroundClass เปลี่ยนสภาพของชั้นดินที่ขุดเจาะซึ่งจะมีผลต่ออัตราขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM

/**********8. Tunneling Durations**********+

DURATION ChangeBattery	Pert[10,15,20];	/(min)
DURATION ExtendRail	Pert[12,15,20];	/(min)
DURATION HaulToLoadSoil	Pert[0.88,1.50,1.88];	/(min)
DURATION InspectSL	Pert[2.75,3.50,4.75];	/(min)
DURATION UnloadSL	Pert[3.50,4.50,6.50];	/(min)
DURATION SetUpForNextShift	30;	/(min)

```
/8.1 Excavate Combi
     VARIABLE TBMBreakDown    Pert[25,40,1210];                    /(min)
     DURATION Excavate        'ProbTBMBreakDown <= Rnd[]  ?
                               (ExcLength * 1000)/ExcRate :
                               (ExcLength * 1000)/ExcRate +
                               TBMBreakDown';                      /(min)

     7                         7                         7
     7                         7                         7
     7                         7                         7
```

<u>ส่วนอธิบายเพิ่มเติม Tunneling Durations</u>

กลุ่มชุดคำสั่ง Tunneling Durations เป็นกลุ่มชุดคำสั่งที่ใช้กำหนดระยะเวลาทำงานในกระบวนการก่อสร้างอุโมงค์ของโครงการกรณีศึกษาโดยใช้คำสั่ง DURATION สำหรับการคำนวณเวลาสูญเสียจากเหตุการณ์ที่มีผลกระทบต่อผลิตภาพการก่อสร้างอุโมงค์จะอธิบายการคำนวณโดยใช้ตัวอย่างของเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนการขุดเจาะขัดข้องที่ใช้ในการคำนวณเวลาที่ใช้สำหรับขุดเจาะอุโมงค์ของ TBM จากขั้นตอน Excavate Combi ซึ่งมี 2 กรณีคือ เมื่อ VARIABLE ProbTBMBreakDown ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เก็บค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้องสำหรับการขุดเจาะในแต่ละรอบมีค่ามากกว่า Rnd[] ซึ่งเป็นตัวเลขสุ่มจากแบบจำลองสถานการณ์ แสดงว่าการขุดเจาะอุโมงค์ในรอบนั้นไม่เกิดเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้อง ดังนั้นเวลาขุดเจาะอุโมงค์ที่ได้จะเป็นเวลาขุดเจาะตามปกติจากสมการ (SAVEVALUE ExcLength x 1,000)/(VARIABLE ExcRate) แต่ถ้าหาก VARIABLE ProbTBMBreakDown มีค่าน้อยกว่า Rnd[] แสดงว่าการขุดเจาะอุโมงค์ในรอบนั้นมีเหตุการณ์ TBM และระบบสนับสนุนขัดข้องเกิดขึ้น ดังนั้นเวลาขุดเจาะที่ได้จะต้องรวมเวลาสูญเสียที่เกิดจากการซ่อม TBM และระบบสนับสนุนด้วยโดยใช้สมการ (SAVEVALUE ExcLength x 1,000)/(VARIABLE ExcRate) + VARIABLE TBMBreakDown

```
/*************************9. QUEUE Initialization and Simulating***********************+

/9.1 Printing the Header of the Output Table
        PRINT StdOutput "     Results from Simulation\n";
        PRINT StdOutput "
=======|=====================|=========================
   Round  |             Validation             |             Estimation
          |_____________________________ |_____________________________
          | Working Time   Advance Rate |     Working Time   Advance Rate
          |      (days)     (m/12-hr Shift)   |          (days)      (m/12-hr Shift)
=======|=====================|=========================\n";

/9.2 Definition of the Loop until Desired Interval is Accomplished
        WHILE 'Val_WorkingTime.nSamples < NumToSim';
        CLEAR;

        /9.2.1 QUEUE Initialization
                INIT TBMUnits                   NumTBMs;
                INIT LocoUnits                  NumInitLocos;
                INIT TrainUnits                 NumInitTrains           Xiandai;
                INIT LocoStorage                NumLocosInStorage;
                INIT TrainStorage               NumTrainsInStorage    Xiandai;
                INIT CarShifterUnits            NumCarShifters;
                INIT      7                             7
                INIT      7                             7
                INIT      7                             7

        /9.2.2 Simulating the Simulation model until Distance = 5123.600 meters
                SIMULATEUNTIL               'CurExcDst        >= FinExcDst &
                                             Excavate.TotInst == InspectSL.TotInst &
                                             SwitchTunneling != 0';
```

```
/9.2.3 Collecting Statistics of Interest for this Run
        COLLECT Est_WorkingTime          'SimTime/60/24';
        COLLECT Est_AdvanceRate
                         '(CurExcDst - InitExcDst)/SimTime * ShiftLength';
        COLLECT Val_WorkingTime          'Val_SimTime/60/24';
        COLLECT Val_AdvanceRate
                         '(CurExcDst - InitExcDst)/Val_SimTime * ShiftLength';
        COLLECT      7                        7
        COLLECT      7                        7
        COLLECT      7                        7

/***********************************10. Printing Results************************************+

/10.1 Working Time and Advance Rate
      PRINT StdOutput " %8.0f   | %7.0f %16.2f    | %7.0f %16.2f\n"
            Val_WorkingTime.nSamples
            Val_SimTime/60/24
            '(CurExcDst - InitExcDst)/Val_SimTime * ShiftLength'
             SimTime/60/24
           '(CurExcDst - InitExcDst)/SimTime * ShiftLength';
      WEND;

            7                  7                  7
            7                  7                  7
            7                  7                  7

/END Model
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐพงษ์ ศรุติรัตนวรกุล เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษาปี พ.ศ. 2543 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย