



การเปรียบเทียบการจำลองกระบวนการก่อสร้างด้วยโปรแกรมอารีน่าและโปรแกรมคอสโมส COMPARING CONSTRUCTION PROCESS SIMULATION BETWEEN THE ARENA AND COSMOS PROGRAMS

ณัชพิชชา สุริ¹ และ จิรวัดน์ ดำริห์นันต์²

¹นักศึกษาปริญญาโท และ ²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีวิธีการและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการต่าง ๆ ที่ซับซ้อนดังเช่นกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมและกระบวนการก่อสร้าง กรณีกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม โปรแกรมที่ให้ผลการจำลองสถานการณ์ที่เป็นที่ยอมรับโปรแกรมหนึ่งคือโปรแกรมอารีน่า หากแต่อารีน่ายังไม่ได้มีการประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างอย่างชัดเจน ในขณะที่มีงานวิจัยหลายชิ้นแสดงการจำลองกระบวนการก่อสร้างโดยใช้โปรแกรมคอสโมสซิมูเลเตอร์ แต่ยังไม่มียานวิจัยที่เปรียบเทียบผลที่ได้จากคอสโมสกับโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนามาก่อนยาวนานอย่างอารีน่า บทความนี้แสดงการประยุกต์ใช้อารีน่าในการจำลองกระบวนการก่อสร้างจริง 2 กระบวนการ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวกับผลที่ได้จากการจำลองกระบวนการเดียวกันของคอสโมส จากการศึกษาพบว่าการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน แสดงว่าอารีน่าสามารถใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างได้ และแสดงด้วยว่าผลลัพธ์ที่ได้จากคอสโมสถูกต้องเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากอารีน่า งานวิจัยนี้ยังได้เปรียบเทียบวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทั้งสองเพื่อให้เห็นความแตกต่างและความเหมาะสมของแต่ละโปรแกรมกรณีใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างด้วย

คำสำคัญ: การจำลองกระบวนการก่อสร้าง, โปรแกรมอารีน่า, โปรแกรมคอสโมสซิมูเลเตอร์

ABSTRACT

Methodologies and computer programs exist to simulate complex industrial production and construction processes. For the former, Arena software provides acceptable simulation results, but has not yet been applied to clearly simulate construction processes. Construction processes have often been simulated by the COSMOS simulator. Construction process simulation between the Arena and COSMOS simulator programs has yet to be done. In this research, Arena was used to simulate two construction processes and compared to COSMOS's simulation of the same situations. Results were that both programs provided consistent simulations. Arena simulated construction processes closely, and COSMOS accurately compared to Arena's findings. Modelling methodologies of the programs were also juxtaposed, to reveal differences and precision of construction process simulation.

KEYWORDS: Construction process, Simulation, Arena program, COSMOS simulator

1. บทนำ

โปรแกรมอารีนา (Arena Simulation Software) เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลอง (modelling) และการจำลองสถานการณ์ (simulation) [ในบทความนี้จะเรียก “การสร้างแบบจำลอง” และ “การจำลองสถานการณ์” เป็นคำรวมว่า “การจำลอง”] ที่นำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม แต่การประยุกต์ใช้โปรแกรมอารีนาในการจำลองกระบวนการก่อสร้างมีอยู่เป็นจำนวนน้อย ในขณะที่โปรแกรมคอสโมสซิมิวเลเตอร์ (COSMOS Simulator) ได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับการสร้างแบบจำลองและจำลองสถานการณ์กระบวนการก่อสร้าง และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการก่อสร้างหลากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการขนถ่ายดินของเขื่อนคลองท่าด่าน [1] กระบวนการเทคอนกรีตพื้นของอาคารสูง 8 ชั้นโดยเครื่องยิงคอนกรีต [2] และกระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการขุดเจาะอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดิน [3] เป็นต้น แต่ผลจากการจำลองสถานการณ์ยังไม่ได้รับการเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางอย่างเช่นโปรแกรมอารีนา นอกจากนี้ยังไม่เคยมีการศึกษาวิธีการที่ต่างกันในการสร้างแบบจำลองของทั้งสองโปรแกรมมาก่อน ดังนั้นในการจำลองกระบวนการก่อสร้างด้วยโปรแกรมทั้งสองจะแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมอารีนาสามารถประยุกต์ใช้กับกระบวนการก่อสร้างได้อย่างไร การจำลองด้วยโปรแกรมทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและสอดคล้องกันเพียงใด และวิธีการสร้างแบบจำลองของทั้งสองโปรแกรมมีความยากง่ายแตกต่างกันอย่างไรในกรณีประยุกต์ใช้กับกระบวนการก่อสร้าง บทความนี้จะนำเสนอการจำลองกระบวนการก่อสร้างด้วยโปรแกรมทั้งสอง โดยใช้สถานการณ์ตัวอย่าง 2 สถานการณ์ ประกอบด้วย กระบวนการเทคอนกรีตพื้นด้วยเครื่องยิงคอนกรีต และกระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการขุดเจาะของอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดิน

2. วรรณกรรมเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองกระบวนการก่อสร้างด้วยโปรแกรมคอสโมสและโปรแกรมอารีนา

โปรแกรมคอสโมสได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่เป็นเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง (discrete-event systems) อย่างเช่นเหตุการณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการก่อสร้างโดยทั่วไป คอสโมสมีพื้นฐานมาจากวิธีการเพตริเน็ตส์ (Petri Nets-based methodology) แต่ด้วยข้อจำกัดบางประการของเพตริเน็ตส์ ทำให้คอสโมสถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดและให้มีความเหมาะสมกับการจำลองกระบวนการก่อสร้างมากยิ่งขึ้น [4] คอสโมสได้ถูกนำไปใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างต่าง ๆ ดังที่กล่าวเป็นตัวอย่างแล้วข้างต้น [1]-[3] การจำลองเหล่านี้มักมีเป้าหมายเพื่อหาปริมาณทรัพยากร เช่น จำนวนรถบรรทุก จำนวนเครื่องยิงคอนกรีต และจำนวนขบวนรถจักรขนถ่ายดินและวัสดุอุปกรณ์ (supply train) ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในกระบวนการนั้น ๆ หรือใช้ในการหาเวลาสูญเสียที่เกิดจากการรอคอยของทรัพยากรต่าง ๆ ในกระบวนการ เพื่อหาจุดที่เป็นปัญหาในการดำเนินงาน (bottle neck analysis) เป็นต้น

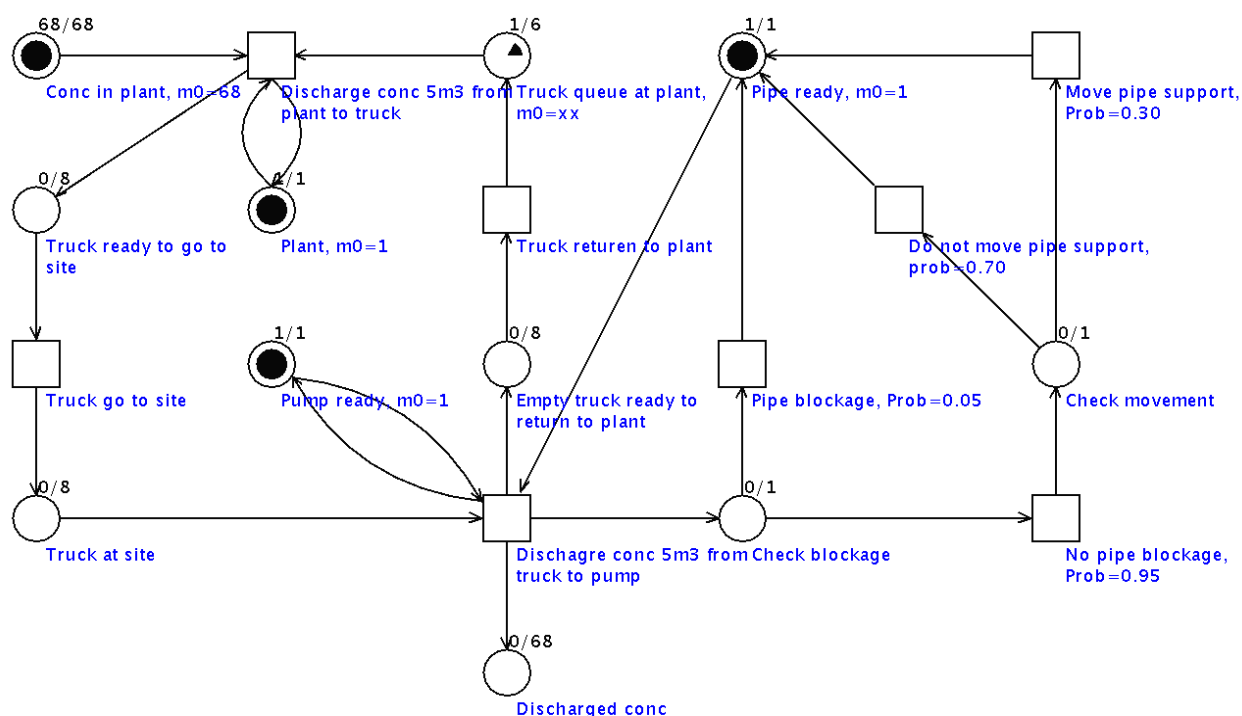
โปรแกรมอารีนาได้รับการประยุกต์ใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างอยู่เป็นจำนวนหนึ่ง เช่น กระบวนการขนถ่ายดิน (earthwork operation) ที่ใช้รถขุดตักและรถบรรทุกทำงานร่วมกัน โดยจำลองสถานการณ์เพื่อหาจำนวนที่เหมาะสมของรถบรรทุกที่จะใช้ในกระบวนการ [5] กระบวนการขุดเจาะอุโมงค์ในหินแข็งโดยใช้เครื่องขุดเจาะอุโมงค์เพื่อจำลองการจัดระบบรางในรูปแบบต่าง ๆ สำหรับขบวนรถ (locomotive and train) ภายในอุโมงค์ [6] และกระบวนการเทคอนกรีตคานและพื้น โดยใช้เครื่องยิงคอนกรีตและรถบรรทุกคอนกรีตผสมเสร็จขนาดจุ 7 ลูกบาศก์เมตรต่อคัน กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ทั้งโปรแกรมอารีนาและโปรแกรมวิทเนส (WITNESS) เป็นเครื่องมือในการจำลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองสถานการณ์เดียวกันจากโปรแกรมทั้งสอง [7]

3. กระบวนการก่อสร้างตัวอย่าง

กระบวนการก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในบทความนี้ตีพิมพ์อยู่ใน [2] และ [3] คำอธิบายกระบวนการโดยสังเขป และแบบจำลองของกระบวนการ พร้อมทั้งผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

3.1 กระบวนการเทคอนกรีตพื้นโดยใช้เครื่องยิงคอนกรีต

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการเทคอนกรีตพื้นของอาคารสูง 8 ชั้นแห่งหนึ่ง โดยใช้เครื่องยิงคอนกรีต คอนกรีตถูกผลิตจากโรงผสมคอนกรีตและถูกขนส่งไปยังเครื่องยิงคอนกรีตด้วยรถบรรทุกทุกคอนกรีตผสมเสร็จ จากนั้นเครื่องยิงคอนกรีตจะลำเลียงคอนกรีตผ่านท่อไปยังพื้นที่ที่ต้องการ ในระหว่างการเทคอนกรีตบางครั้งท่ออาจเกิดการอุดตัน ซึ่งกรณีนั้นจะต้องทำการตัดและเปลี่ยนท่อช่วงใหม่ นอกจากนี้บางขณะจะต้องมีการย้ายตำแหน่งของฐานรองรับท่อเป็นระยะ ๆ เมื่อปลายท่อไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ เวลาในการทำงานของแต่ละกิจกรรมเป็นเวลาที่มึรูปแบบการกระจายตัวแบบสามเหลี่ยม (triangular distribution) ซึ่งเป็นรูปแบบของเวลาที่ไม่งคงที่หากแต่สามารถแปรเปลี่ยนได้ (stochastic duration) แบบจำลองกระบวนการนี้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงในรูปที่ 1 และผลบางประการที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองเพทรีเน็ตส์ของกระบวนการเทคอนกรีตพื้นด้วยเครื่องยิงคอนกรีต

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์กระบวนการเทคอนกรีตพื้นด้วยเครื่องยิงคอนกรีต

รถบรรทุกคันที่	อัตราการผลิตคอนกรีต (ลบ.ม./ชม.)	เวลารอคอย (นาที)		ความยาวของแถวคอย (หน่วย)	
		ที่เครื่องผสมคอนกรีต	ที่เครื่องยิงคอนกรีต	ที่เครื่องผสมคอนกรีต	ที่เครื่องยิงคอนกรีต
1	16.1	0	0.1	0	0
2	29.2	0.3	1.6	0.1	0.2
3	35.0	2.0	4.8	0.3	0.5
4	35.3	4.1	10.5	0.5	1.2
5	35.6	6.6	15.7	0.9	1.8
6	35.7	9.6	20.2	1.3	2.4

3.2 กระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการขุดเจาะของอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดิน

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการขุดเจาะของอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดิน โดยใช้เครื่องขุดเจาะอุโมงค์ (Tunnel Boring Machine, TBM) ร่วมกับขบวนรถจักรขนถ่ายดินและวัสดุอุปกรณ์ (supply train) ขบวนรถจักรฯ ในอุโมงค์จะวิ่งอยู่บนรางทางเดียว (รถวิ่งสวนกันไม่ได้) ขกเว้นจุดพักรถจะเป็นทางคู่ (double tracks) แบบจำลองในกรณีศึกษาเป็นกรณีที่มีจุดพักรถ 2 จุด และมีขบวนรถจักร 4 ขบวน กติการการวิ่งของขบวนรถจักรฯ ในอุโมงค์คือ รถหนัก (รถที่บรรทุกดินอยู่) จะสามารถวิ่งในรางทางคู่ได้ก็ต่อเมื่อมีรถเบา (รถเปล่า) จอดพักอยู่ เวลาของทุกกิจกรรมในกระบวนการนี้เป็นเวลาแบบคงที่ (deterministic duration) แบบจำลองของกระบวนการแสดงในรูปที่ 2 เวลาที่ใช้ในการดำเนินกระบวนการตั้งแต่เริ่มจนเสร็จสิ้นเท่ากับ 46,690 นาที

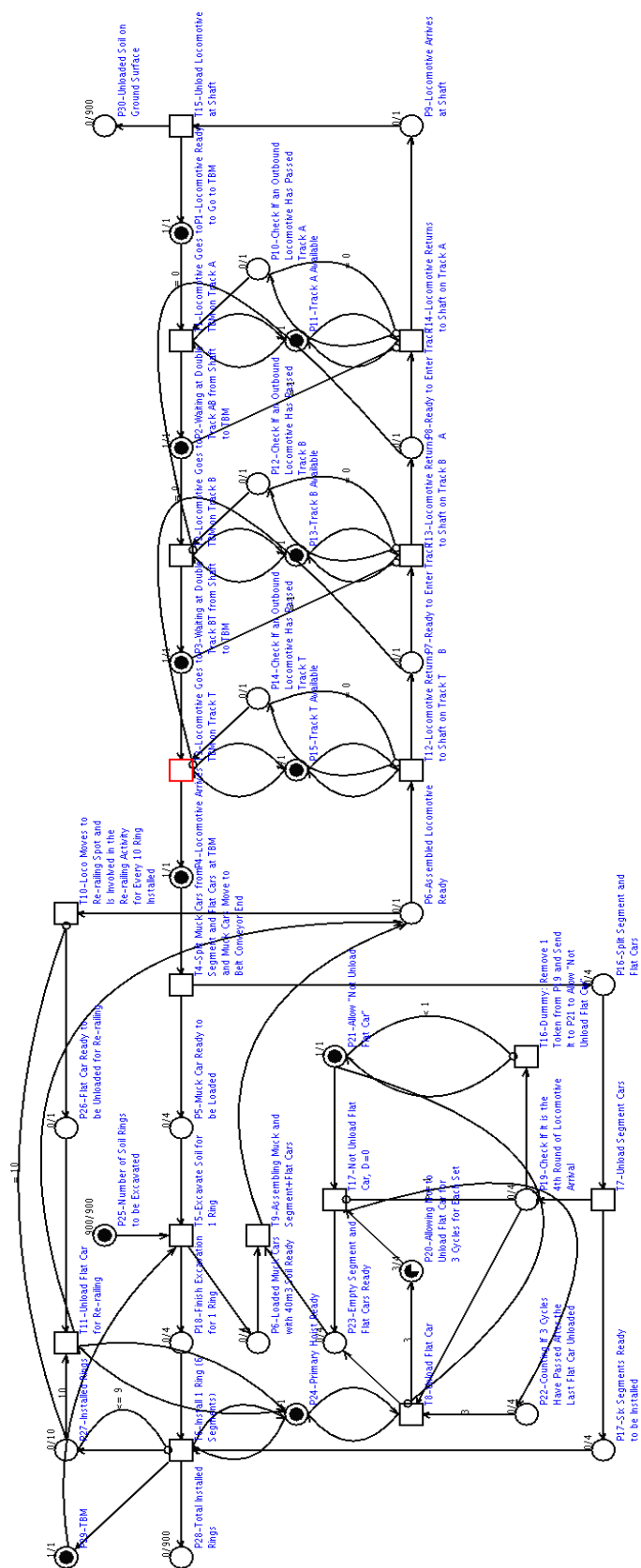
4. การสร้างแบบจำลองสถานการณ์กระบวนการก่อสร้างด้วยโปรแกรมอริน่า

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมอริน่าสำหรับกระบวนการก่อสร้างทั้งสองกรณีแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

4.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการเทคอนกรีตพื้นด้วยโปรแกรมอริน่า

หน่วยโมดูลที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือหน่วยโมดูลที่อยู่ในบัญชีแสดงกรรมวิธีพื้นฐาน (Basic Process Panel) และบัญชีแสดงกรรมวิธีก้าวหน้า (Advanced Process Panel)

ขั้นตอนแรกคือการสร้างคอนกรีตหรือวัตถุที่สนใจ [วัตถุที่สนใจ (entity) คือวัตถุหรือทรัพยากรที่เป็นตัวดำเนินกระบวนการ และสามารถเคลื่อนที่ในกระบวนการในแบบจำลองได้] เข้าไปในกระบวนการในแบบจำลองโดย Create Module จากนั้นคอนกรีตจะไปอยู่ในรูปของแถวคอยใน Hold Module แบบ Infinity hold ซึ่งคอนกรีตจะออกจากโมดูลนี้ก็ต่อเมื่อมี Pickup Module มารับคอนกรีตออกไป โดย Pickup Module เป็นโมดูลที่ใช้รวมวัตถุสองชนิดเข้าด้วยกัน โดยวัตถุชนิดแรกคือวัตถุที่เข้ามาใน Pickup Module และวัตถุอีกชนิดคือวัตถุที่รออยู่ในแถวคอยของ Hold Module



รูปที่ 2 แบบจำลองกระบวนการขนถ่ายสินค้าในระหว่างการดูแลของตู้ในตู้ขบวนรถไฟ

ขั้นตอนต่อมาคือการสร้างรถบรรทุกเข้าไปในกระบวนการด้วย Create Module เช่นกัน จากนั้นรถบรรทุกจะเข้าสู่ Hold Module แบบ Scan for condition เพื่อตรวจว่าในครั้งนั้น ๆ มีคอนกรีตที่ Plant เพียงพอสำหรับการขนถ่ายสู่รถบรรทุกหรือไม่ หากมีคอนกรีตเพียงพอรถบรรทุกจะเข้าสู่ Seize Module เพื่อทำการจองทรัพยากร Plant เมื่อสามารถจอง Plant ได้ รถบรรทุกจะเข้าสู่ Pickup Module เพื่อนำเอาคอนกรีตออกจาก Hold Module ที่ตั้งชื่อไว้ว่า “Hold for truck” จากนั้น Pickup Module จะทำให้วัตถุที่สนใจทั้งสองรวมกันเป็นวัตถุก้อนเดียวกัน

ลำดับต่อไปวัตถุจะเข้าสู่ Delay Module เพื่อเริ่มกิจกรรมถ่ายคอนกรีตลงสู่รถบรรทุก (T1) เมื่อเสร็จกิจกรรมกรรมก็จะปล่อย Plant ให้ว่างด้วย Release Module และรถบรรทุกพร้อมคอนกรีตจะเดินทางไปยังเครื่องยิงคอนกรีต (T2) เมื่อถึงเครื่องยิงคอนกรีตต้องเข้าแถวคอยเพื่อจองทรัพยากรเครื่องยิงคอนกรีตและท่อ หากทรัพยากรทั้งสองว่างก็เข้าสู่กิจกรรมถ่ายคอนกรีตสู่เครื่องยิงคอนกรีต (T3) เมื่อออกจากโมดูลนี้รถบรรทุกและคอนกรีตจะถูกแยกออกจากกันด้วย Dropoff Module ซึ่งมีทางออกสองทางคือทางออกด้าน Members ซึ่งเป็นทางออกของคอนกรีตที่ถูกถ่ายไปสู่เครื่องยิงคอนกรีตด้วยกิจกรรม T3 อีกทางหนึ่งเป็นทางออกด้าน Original ซึ่งเป็นทางออกของรถบรรทุก

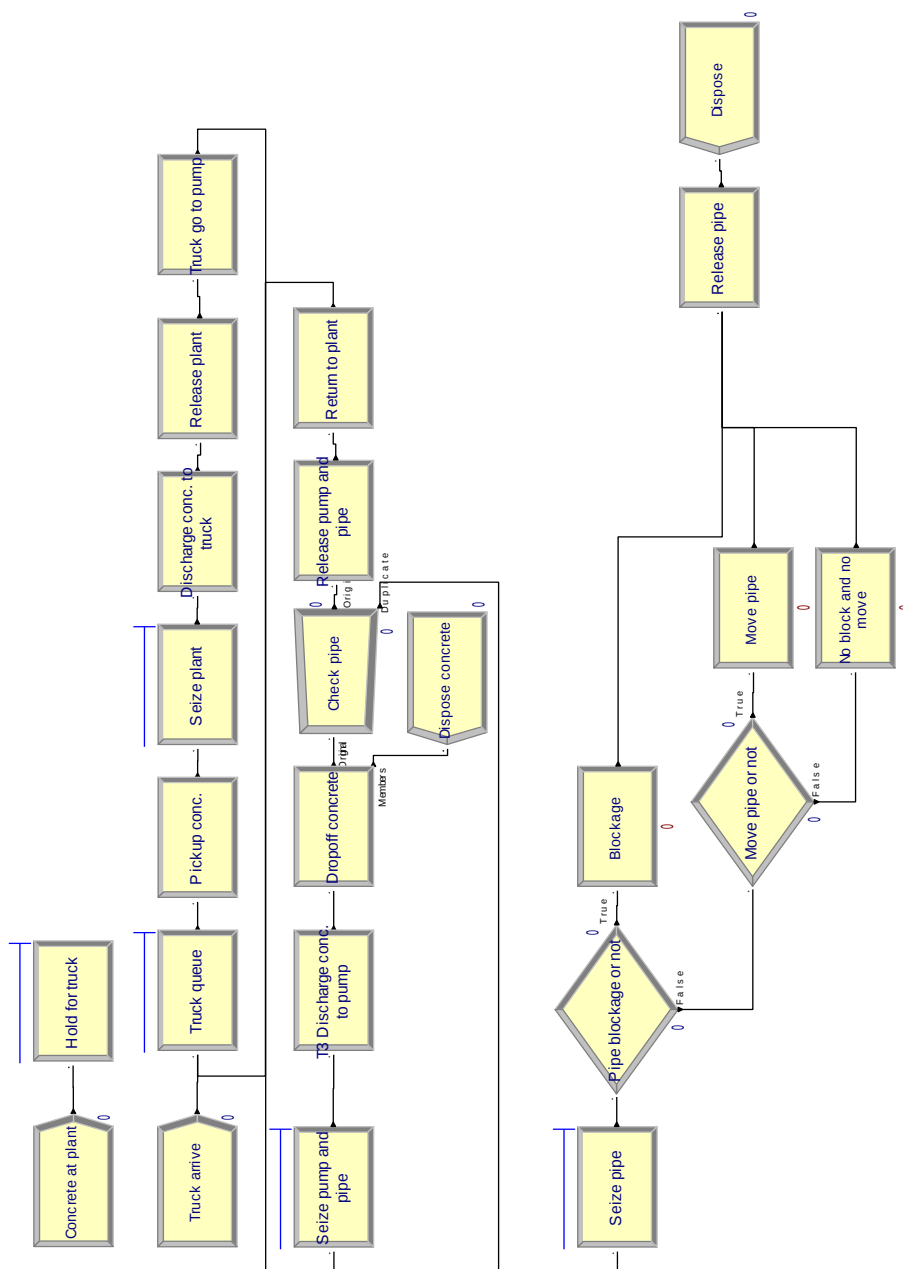
เมื่อเสร็จกิจกรรม T3 จะมีการปล่อยเครื่องยิงคอนกรีตและท่อให้ว่าง แต่ท่อจะยังไม่สามารถกลับไปดำเนินการกิจกรรม T3 ต่อได้ เนื่องจากต้องมีการตรวจสอบสภาพท่อว่ามีการอุดตันหรือไม่ ดังนั้นจึงต้องสร้าง Separate Module ขึ้นมา เพื่อใช้สำหรับแตกการดำเนินงานออกเป็นสองเส้นทาง เส้นทางแรกคือเส้นทางรถบรรทุกเพื่อไปรับคอนกรีตในรอบถัดไป (T4) อีกเส้นทางหนึ่งคือการตรวจสอบท่อ โดยต้องมีการจองท่อเพื่อใช้ในการตรวจสอบด้วย Seize Module การตรวจสอบท่อว่าเกิดการอุดตันหรือไม่จะใช้ Decide Module แบบ 2-Way by chance เพื่อกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้น หากเกิดการอุดตันขึ้นจะออกจากโมดูลนี้ด้วยทางออก True เพื่อเข้าสู่กิจกรรมตัดท่อ (T5) หากท่อไม่อุดตันก็จะออกในทางออก False จากนั้นจะมีการตรวจสอบต่อไปว่าต้องมีการย้ายฐานรองรับท่อหรือไม่ด้วย Decide Module เช่นกัน หากต้องมีการย้ายฐานรองรับท่อก็จะออกในทางออก True เพื่อทำกิจกรรมย้ายฐานรองรับท่อ (T6) หากไม่มีการย้ายท่อเกิดขึ้นก็จะออกในทางออก False

เมื่อตรวจสอบทั้งกรณีอุดตันและการย้ายฐานรองรับท่อ พร้อมทั้งแก้ไขท่อที่อุดตันหรือดำเนินการย้ายฐานรองรับท่อแล้วแต่กรณีแล้ว ก็จะทำการปล่อยท่อให้อยู่ในสภาพว่างงานด้วย Release Module เพื่อให้ท่อกลับไปทำกิจกรรม T3 ต่อไปได้ ในการจองท่อเพื่อใช้ในการดำเนินการกิจกรรม จะเห็นได้ว่าการใช้โมดูลเพื่อจองท่ออยู่ 2 โมดูล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดลำดับความสำคัญขึ้นว่าหากมีทรัพยากรที่ใช้ร่วมกัน กิจกรรมใดจะสามารถได้ใช้ทรัพยากรนั้นก่อน แบบจำลองที่สร้างได้จากกระบวนการตัวอย่างนี้ด้วยโปรแกรมอริโนแสดงไว้ในรูปที่ 3

4.2 การสร้างแบบจำลองกระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการผลิตของอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดินด้วยโปรแกรมอริโน

ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งมีความซับซ้อนของกระบวนการและเงื่อนไขต่าง ๆ ก่อนข้างมาก จะมีการเลือกใช้โมดูลที่อยู่ในกรรมวิธีทั้งสาม ได้แก่ บัญชีแสดงกรรมวิธีพื้นฐาน (Basic Process Panel) บัญชีแสดงกรรมวิธีก้าวหน้า (Advanced process Panel) และบัญชีแสดงกรรมวิธีขนส่ง (Advanced Transfer Panel)

สถานีของกระบวนการนี้มีทั้งหมด 7 สถานี ซึ่งสร้างโดย Station Module ประกอบด้วย สถานี “s TBM”, “s Track A”, “s Track B”, “s Track T”, “s Shaft”, “s Double track AB” และ “s Double track BT”



รูปที่ 3 แบบจำลองการนำของกระบวนการเทคนิคการคิดค้น

หลังจากที่สร้างสถานีทั้ง 7 แล้ว กิจกรรมต่าง ๆ จะถูกสร้างโดยแบ่งออกตามสถานีที่อยู่ เริ่มต้นจากสถานี “s Track A” ซึ่งในราง A นั้นขบวนรถจะสามารถวิ่งเข้าและวิ่งออกได้ทั้งสองทิศทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้าง Decide Module เพื่อแยกขบวนรถออกเป็นขาเข้าและขาออก ใน Decide Module ที่ชื่อว่า “Decide going or returning on track A” ได้กำหนดไว้ว่าหากวัตถุที่เป็นประเภท “ST going on track A” เข้ามาในโมดูลนี้จะออกในทางออก True หรือทางขาเข้า TBM แต่วัตถุที่มีประเภทเป็นอย่างอื่นจะออกในทางออก False หรือ ทางรถขาออกกลับสู่ปากปล่องอุโมงค์ (หมายเหตุ: ประเภทของวัตถุจะถูกตั้งโดย Assign Module สาเหตุที่ต้องมีการกำหนดชื่อประเภทซึ่งเป็นการกำหนดประเภทให้กับขบวนรถก็เพื่อใช้ในการกำหนดประเภทของรถขาเข้าและรถขาออก เนื่องจาก Decide Module ชนิดเลือกตามเงื่อนไข (2-Way by condition) จะใช้ประเภทของวัตถุในการกำหนดทางออก True

หรือ False) เมื่อขบวนรถขาเข้าออกจาก Decide Module ในทางออก True แล้ว ก็จะทำการจองทรัพยากรราง A ด้วย Seize Module หลังจากจองทรัพยากรได้แล้วก็จะเริ่มทำกิจกรรม T1 ด้วย Route Module เพื่อเดินทางไปสถานี s Double track AB หรือ สถานีชื่อ “Double track AB” เพื่อเดินทางเข้าไปยัง TBM ทั้งนี้วัตถุหนึ่ง ๆ สามารถจะมีลักษณะสมบัติ (attribute) ที่แตกต่างกันได้ แม้ว่าจะ เป็นวัตถุที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เช่น วัตถุที่ใช้แทนรถบรรทุกเหมือนกัน แต่ก็อาจมีขนาดไม่เท่ากัน (อาจเป็นรถหกล้อกับรถสิบล้อ) การที่เป็นรถบรรทุกเหมือนกันคือการที่เป็นกลุ่มเดียวกันแต่มีลักษณะสมบัติในเรื่องของขนาดที่ต่างกันนั้น กล่าวได้ว่าขนาดเป็น ลักษณะสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุในกลุ่มรถบรรทุก ในกรณีนี้ผู้ใช้โปรแกรมอธิบายสามารถกำหนดลักษณะสมบัติของวัตถุได้โดย การกำหนด “ประเภท” ของวัตถุนั้น ๆ เช่น การกำหนดให้ขบวนรถมีลักษณะสมบัติ (ประเภท) เป็น “ST going on track A” เป็นต้น

เมื่อถึงสถานี “s Double track AB” ขบวนรถจะเข้าสู่ Decide Module เพื่อเลือกทางออก True (ขาเข้าสู่ TBM) และขบวนรถก็ จะทำการปล่อยทรัพยากรราง A ให้ว่างด้วย Release Module จากนั้นจะเข้าสู่ Assign Module เพื่อกำหนดประเภทให้วัตถุ ซึ่งโมดูล นี้เป็นการกำหนดประเภทให้กับขบวนรถที่กำลังจะเดินทางด้วยราง B จึงกำหนดประเภทให้เป็น “ST going on track B” ก่อนที่จะ เดินทางด้วยราง B นั้นจะต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขก่อนด้วย Hold Module โดยขบวนรถจะสามารถผ่านโมดูลนี้ไปได้ก็ต่อเมื่อไม่ มีการใช้ราง A ในขบวนรถขาออก มีขบวนรถขาออกผ่านราง B ไปแล้ว และไม่มีขบวนรถขาเข้าที่กำลังจะใช้ราง A เมื่อวัตถุตรง ตามเงื่อนไขเหล่านี้ วัตถุจะสามารถออกจากโมดูลนี้ได้ จากนั้นวัตถุจะเข้าสู่ Pickup Module เพื่อทำการดึงเงื่อนไขขบวนรถขาออก ที่ใช้ราง B ออกไป เพื่อให้ขบวนรถขาออกในรอบถัดไปสามารถใช้ราง B

หลังจากตรวจสอบเงื่อนไขเสร็จสิ้น ขบวนรถหรือวัตถุที่สนใจก็เข้าสู่ Route Module เพื่อไปยังสถานี “s Track B” เมื่อถึงสถานี “s Track B” ก็จะเข้าสู่ Decide Module เพื่อกำหนดขบวนรถขาเข้าหรือขบวนรถขาออกเช่นเดียวกับสถานี “s Track A” ที่ได้กล่าว แล้วข้างต้น และเมื่อวัตถุประเภท “ST going on track B” ออกมาจาก Decide Module ด้วยทางออก True ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ก็ จะทำการจองทรัพยากรราง B และเดินทางต่อไปยังสถานี “s Double track BT” ด้วยกิจกรรม T2 เมื่อถึงสถานี “s Double track BT” ขบวนรถก็จะดำเนินกิจกรรมเหมือนดังที่ได้กล่าวไว้ในกรณีสถานี “s Double track AB” เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขและส่งขบวนรถไป ยังสถานะ “s Track T”

เมื่อขบวนรถถึงสถานี “s Track T” ก็จะใช้ Seize Module ในการจองราง T เพื่อให้ขบวนรถเดินทางไปยัง TBM หรือ สถานี “s TBM” ด้วยกิจกรรม T3 เมื่อถึงสถานี “s TBM” ก็ทำการปล่อยราง T ให้ว่าง จากนั้นขบวนรถจะแยกออกเป็นสองส่วน โดยแยกรถ รถขนดิน (muck car) ออกจากรถขนอุปกรณ์และรถพื้นเรียบ (segment and flat cars) ด้วยกิจกรรม T4 ซึ่งใช้ Separate Module ชื่อ “Split supply train” ซึ่งเป็นการแยกออกจากกันร้อยละ 100 นั้นแสดงว่าเมื่อออกจากโมดูลนี้ขบวนรถจะแยกออกจากกันในทุก ๆ ครั้ง กำหนดให้วัตถุที่สนใจที่ออกในทางออก Original ทำกิจกรรมในส่วนของการรถขนอุปกรณ์และรถพื้นเรียบ และวัตถุที่สนใจที่ ออกในทางออก Duplicate จะทำกิจกรรมในส่วนของการรถขนดิน

ในส่วนของการรถขนดินที่ออกมาจาก Separate Module ชื่อ “Split supply train” ในทางออก Duplicate จะเข้าสู่ Hold Module ชื่อ “Hold for checking soil” เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขว่ามีดินในแถวคอยของ Hold Module ชื่อ “Hold soil” หรือไม่ หากมีดิน วัตถุที่ สนใจจะสามารถออกจากโมดูลนี้ได้ เมื่อตรวจสอบเงื่อนไขผ่านแล้ว จึงใช้ Pickup Module ในการหยิบดินออกจากแถวคอย Hold soil ที่ละ 1 หน่วย โดยที่ปริมาณดิน 1 หน่วยในที่นี้จะเท่ากับปริมาณดินที่ขุดเจาะออกมาสำหรับการติดตั้งวงแหวน (segment) 1 วง จากนั้นวัตถุก็จะเข้าสู่ Process Module เพื่อทำกิจกรรม T5 ในกิจกรรม T5 จะมีการจองและใช้ทรัพยากร TBM แต่ยังไม่มีการปล่อย ทรัพยากรให้ว่างหลังจากจบกิจกรรมนี้ หลังจากกิจกรรมที่ 5 จบลงวัตถุที่สนใจจะเข้าสู่ Separate Module ชื่อ “Separate muck cars and installing ring” เพื่อแยกรถขนดินที่บรรทุกดินเต็มแล้วและกิจกรรมการติดตั้งวงแหวนออกจากกัน โดยรถขนดินจะออกใน

ทางออก Original และไปรออยู่ใน Hold Module ชื่อ “Hold for segment and flat cars” จนกว่ารถขนอุปกรณ์และรฟพื้นเรียบจะเสร็จกิจกรรมและไปรอรถขนดินอยู่ในแถวคอย “Hold for assembling” ในส่วนของวัตถุที่สนใจอีกวัตถุหนึ่งจะออกในทางออก Duplicate ของ Separate Module ชื่อ “Separate muck car and installing ring” เพื่อไปทำกิจกรรมติดตั้งวงแหวน โดยก่อนอื่นวัตถุที่สนใจจะเข้าสู่ Hold Module ที่ชื่อ Hold for 10th round เพื่อตั้งเงื่อนไขว่าวัตถุที่สนใจจะสามารถออกจากโมดูลนี้ได้ก็ต่อเมื่อติดตั้งวงแหวนไปแล้วไม่เกิน 9 ครั้ง จากนั้นจึงจะเข้าทำกิจกรรม T6 ที่ Process Module ได้ และเมื่อเสร็จกิจกรรม T6 TBM ที่ยังไม่มีการปล่อยให้ว่างในกิจกรรม T5 ก็จะถูกทำให้ว่างโดย Release Module จากนั้นวัตถุที่สนใจจะเข้าสู่ Separate Module ที่ชื่อ “Separate installing ring and counter” เพื่อแยกให้วัตถุที่สนใจที่ออกในทางออก Original ให้นำวงแหวนออกจากระบบด้วย Dispose Module ส่วนวัตถุที่สนใจที่ออกในทางออก Duplicate จะเข้าสู่ Hold Module ที่ชื่อ “Hold for 10 rounds” เพื่อนับจำนวนรอบที่ทำการติดตั้งวงแหวนให้ครบ 10 ครั้ง หลังจากรถขนดินพร้อมกับรถขนอุปกรณ์และรฟพื้นเรียบมารอเพื่อประกอบขบวนรถกลับแล้ว ก็จะใช้ Pickup Module ในการหยิบรถขนอุปกรณ์และรฟพื้นเรียบออกจากแถวคอย Hold for assembling จากนั้นก็เข้าสู่ Process Module เพื่อดำเนินกิจกรรม T9

ต่อจากกิจกรรม T9 วัตถุที่สนใจจะเข้าสู่ Decide Module ที่ชื่อ “Decide to T10 or T12” เพื่อพิจารณาเลือกทางออกให้กับวัตถุตามเงื่อนไขที่วางไว้ นั่นคือถ้าหากมีการติดตั้งวงแหวนครบ 10 รอบแล้ววัตถุจะออกในทางออก True และไปเข้าสู่ Process Module เพื่อทำกิจกรรม T10 จากนั้นจะใช้ Pickup Module หยิบวัตถุออกจากแถวคอย Hold 10 rounds เพื่อให้เริ่มต้นนับรอบของการติดตั้งวงแหวนใหม่ และวัตถุจะเข้าสู่ Process Module เพื่อทำกิจกรรม T11 จากนั้นวัตถุจะกลับไปเข้า Decide Module ที่ชื่อ “Decide to T10 or T12” อีกครั้ง เพื่อพิจารณาทางออกใหม่ วัตถุที่ออกในทางออก False ของ Decide Module ที่ชื่อ “Decide to T10 or T12” คือวัตถุที่ไม่ได้อยู่ในรอบที่ 10 ของทุก ๆ การติดตั้งวงแหวน วัตถุดังกล่าวจะเข้าสู่ Assign Module เพื่อกำหนดประเภทให้กับวัตถุ และนำไปใช้ในการเลือกทางออกของ Decide Module เมื่อเข้าสู่ราง T หรือ สถานีที่ชื่อ “s Track T” วัตถุจะออกในทางออก False เนื่องจากประเภทของวัตถุที่ตั้งไว้ใน Assign Module ไม่ตรงตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ใน Decide Module ใน Decide Module ของทุก ๆ สถานีจะกำหนดให้ทางออก False คือรางรถขาออกไปสู่ปากปล่องอุโมงค์ ในขณะที่ทางออก True คือรางรถขาเข้าไปสู่ TBM

หลังจากขบวนรถออกจาก Decide Module ก็เข้าสู่ Hold Module ที่ชื่อ “Hold for checking track T” เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เมื่อสามารถออกจาก Hold Module ได้แล้ว จะมี Seize Module ทำการจองราง T เพื่อให้วัตถุเดินทางกลับสู่ปากปล่องด้วยกิจกรรม T12 Route Module ของกิจกรรม T12 จะส่งวัตถุมายังสถานี “s Double track BT” จากนั้นวัตถุก็จะเข้าสู่ Decide Module เพื่อเลือกทางออกกลับ หลังจากนั้นทำการปล่อยราง T ให้ว่างด้วย Release Module และวัตถุจะเข้าสู่ Separate Module ที่ชื่อ “Separate supply train and passing track T” วัตถุที่ออกในทางออก Duplicate จะเข้าสู่ Hold Module เพื่อแสดงให้เห็นว่ามีขบวนรถผ่านราง T มาแล้ว ในขณะที่วัตถุที่ออกในทางออก Original จะเข้าสู่ Assign Module เพื่อเปลี่ยนประเภทให้กับวัตถุเป็น “ST returning on track B” เพื่อใช้ในการเลือกทางออกของ Decide Module เมื่อเข้าสถานี “s Track B” หลังออกจาก Assign Module วัตถุจะเข้าสู่ Hold Module เพื่อรอตรวจสอบเงื่อนไขที่ตั้งไว้และเมื่อสามารถผ่านออกจาก Hold Module ได้ วัตถุจะถูกส่งไปยังสถานะ “s Track B” โดย Route Module เมื่อวัตถุเข้าสู่สถานี “s Track B” ก็จะมีการจองทรัพยากรและทำกิจกรรม T13 เพื่อส่งวัตถุไปยังสถานี “s Double track AB” กิจกรรมรถขาออกที่เกิดในสถานี “s Double track AB” และ “s Track A” จะเหมือนกับที่กล่าวไว้แล้วในกรณีสถานี “s Double track BT” และ “s Track B”

เมื่อวัตถุถึงปากปล่อง หรือสถานี “s Shaft” จะมี Release Module เพื่อทำการปล่อยราง A ให้ว่าง จากนั้นจะเข้าสู่ Separate Module วัตถุที่ออกในทางออก Duplicate ของโมดูลนี้จะเข้าสู่ Hold Module เพื่อแสดงให้เห็นว่าขบวนรถผ่านราง A มาแล้ว

ในขณะที่วัตถุที่ออกในทางออก Original จะเข้าทำกิจกรรม T15 และเข้าสู่ Separate Module อีกอันที่ชื่อ “Separate supply train and soil” วัตถุที่ออกในทางออก Duplicate ของโมดูลนี้จะออกจากระบบโดย Dispose Module เพื่อแสดงให้เห็นถึงการที่ดินทั้ง ส่วน วัตถุที่ออกในทางออก Original จะเข้าสู่ Assign Module เพื่อทำการกำหนดประเภทให้กับวัตถุเพื่อใช้สำหรับการเลือกทางออกใน Decide Module เมื่อเข้าสู่สถานี “s Track A” จากนั้นวัตถุจะเข้าสู่ Hold Module เพื่อตรวจเงื่อนไขที่กำหนดไว้และเมื่อวัตถุออกจาก Hold Module ได้ จะมีการหยิบวัตถุออกจากแถวคอย “Hold passing track A” จากนั้นวัตถุจะถูกส่งไปสถานี “s Track A” โดย Route Module เพื่อเริ่มกิจกรรมใหม่ในรอบต่อไป ภาพรวมทั้งหมดของแบบจำลองแสดงอยู่ในรูปที่ 4 (ก) และรูปที่ 4 (ข)

5. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของโปรแกรมคอสโมสและโปรแกรมอริน่า

5.1 ผลจากการจำลองสถานการณ์กระบวนการเทคอนกรีตพื้น

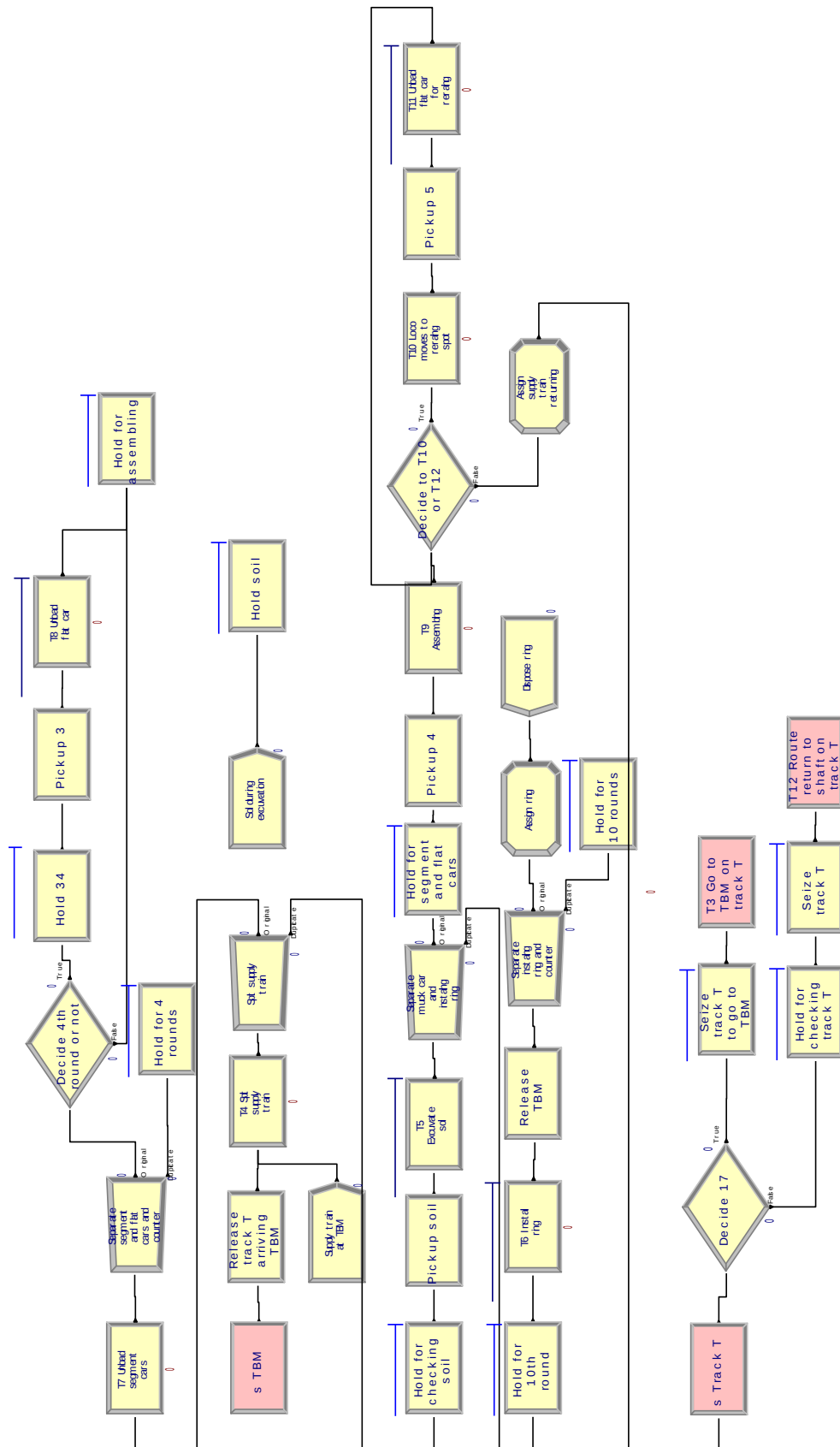
ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาที่ 1 แสดงไว้ในตารางที่ 2 และรูปที่ 5 ผลลัพธ์จากทั้งสองโปรแกรมสอดคล้องกันนี้ผลลัพธ์ที่ได้ทั้งเวลารอคอย ความยาวของแถวคอย และอัตราการเทคอนกรีต จากทั้งสองโปรแกรมมีค่าไม่เท่ากัน เช่น อัตราการเทคอนกรีตกรณีรถบรรทุก 3 คัน จากคอสโมสและอริน่าที่แสดงในตารางที่ 2 มีค่าเท่ากับ 35.0 และ 34.6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการทำกิจกรรมในการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้เป็นเวลาที่มีการกระจายตัว แต่จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ต่าง ๆ ทุกกรณีจากทั้งสองโปรแกรมก็ยังคงมีความสอดคล้องกันไปในทางเดียวกัน เพื่อเป็นการตรวจสอบให้ชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐาน (hypothesis test) โดยการทดสอบใช้ระดับความมั่นใจ (confidence interval) ที่ 95% และผลจากการทดสอบสมมติฐานจะถูกยอมรับได้เมื่อค่า z อยู่ในช่วง -1.96-1.96 โดยค่า z จะหาได้จากสมการ (1) [8] ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

$$Z = \frac{\bar{x}_C - \bar{x}_A}{\sqrt{\frac{s_C^2}{n_C} + \frac{s_A^2}{n_A}}} \quad (1)$$

5.2 ผลจากการจำลองสถานการณ์กระบวนการขนถ่ายดินในระหว่างการขุดเจาะของอุโมงค์ระบายน้ำใต้ดิน

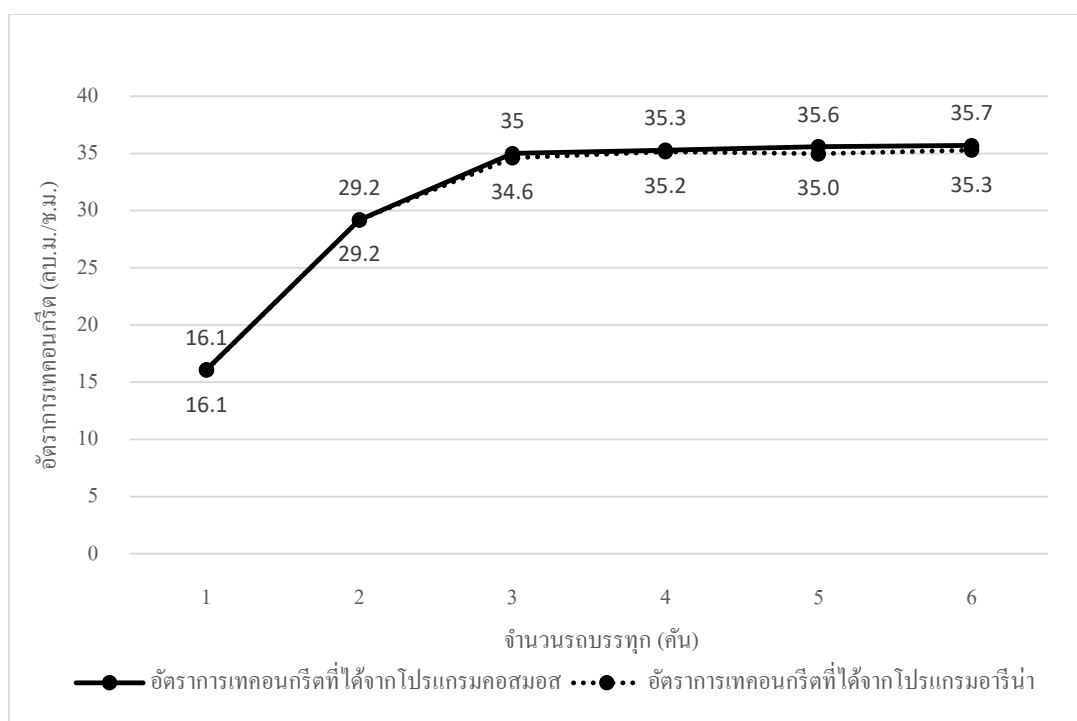
ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ที่เห็นได้เด่นชัดที่สุดคือเวลารวมทั้งหมดในการทำกระบวนการนั้น ๆ ให้เสร็จสิ้น โดยนับตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเสร็จสิ้นสมบูรณ์ทั้งกระบวนการ ในที่นี้เรียกเวลาที่ใช้ในการทำกระบวนการตั้งแต่เริ่มจนเสร็จสิ้นนี้ว่า “เวลากระบวนการ” (process duration) กรณีของกระบวนการในกรณีศึกษาที่ 2 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาในการทำกิจกรรมทุกกิจกรรมเป็นเวลาคงที่ พบว่าเวลากระบวนการจากการรันโปรแกรมทั้งสองมีค่าเท่ากับ 46,690 นาฬิกา แสดงว่าในกรณีนี้คอสโมสให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับผลจากโปรแกรมอริน่า ในขณะเดียวกันยังแสดงให้เห็นด้วยว่าโปรแกรมอริน่าสามารถใช้ในการจำลองกระบวนการก่อสร้างได้





ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากแบบจำลองกระบวนการเทคโนโลยีการเกษตรที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์และโปรแกรมอาร์โน

รอบการปลูก ครั้งที่	คอมพิวเตอร์					อาร์โน				
	อัตราการใช้ เทคโนโลยี การเกษตร (ลบ.ม./ ชม.)	เวลาการปลูก (นาฬิกา)		ความยาวของแถวปลูก (หน่วย)		อัตราการใช้ เทคโนโลยี การเกษตร (ลบ.ม./ ชม.)	เวลาการปลูก (นาฬิกา)		ความยาวของแถวปลูก (หน่วย)	
		ที่เครื่อง ผสม คอนกรีต	ที่เครื่อง ยี้ งคอนกรีต	ที่เครื่อง ผสม คอนกรีต	ที่เครื่อง ยี้ งคอนกรีต		ที่เครื่อง ผสม คอนกรีต	ที่เครื่อง ยี้ งคอนกรีต	ที่เครื่อง ผสม คอนกรีต	ที่เครื่อง ยี้ งคอนกรีต
1	16.1	0.0	0.1	0.0	0.0	16.1	0.0	0.2	0.0	0.0
2	29.2	0.3	1.6	0.1	0.2	29.2	0.3	1.6	0.0	0.6
3	35	2.0	4.8	0.3	0.5	34.6	2.0	5.1	0.2	0.6
4	35.3	4.1	10.5	0.5	1.2	35.2	4.4	10.5	0.5	1.2
5	35.6	6.6	15.7	0.9	1.8	35.0	6.7	16.0	0.8	1.9
6	35.7	9.6	20.2	1.3	2.4	35.3	10.9	19.7	1.3	2.3



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงอัตราการใช้เทคโนโลยีการเกษตรที่ได้จากการจำลองกระบวนการเทคโนโลยีการเกษตรที่ได้จากคอมพิวเตอร์และอาร์โน

6. การเปรียบเทียบวิธีการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมอาร์โนและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามคุณลักษณะของกระบวนการก่อสร้าง

การเปรียบเทียบวิธีการสร้างแบบจำลองในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบตามคุณลักษณะของกระบวนการก่อสร้าง (characteristics of construction processes) [9] ในด้านต่าง ๆ ตามแสดงในหัวข้อที่ 5.1-5.9

ตารางที่ 3 ข้อมูลในการทดสอบสมมติฐานของกระบวนการเทคอนกรีตพื้น

จำนวนรอบบรรทุก	n_C	n_A	$\bar{X}_C$	$\bar{X}_A$	S_C	S_A	z
1	30	30	16.1	16.1	0.1	0.2	1.4
2			29.2	29.2	1.0	0.8	0.2
3			35.1	34.6	1.8	1.1	1.1
4			35.3	35.2	1.6	1.2	0.4
5			35.6	35.0	1.4	1.4	1.7
6			35.7	35.3	1.7	1.3	1.1

เมื่อ	n_C	คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการรันผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
	n_A	คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการรันผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมอริโน่า
	$\bar{X}_C$	คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเทคอนกรีตที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
	$\bar{X}_A$	คือค่าเฉลี่ยของอัตราการเทคอนกรีตที่ได้จากโปรแกรมอริโน่า
	S_C	คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
	S_A	คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมอริโน่า

6.1 สถานะของการรอคอย

สถานะของการรอคอย (waiting) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อได้มีการกำหนดเงื่อนไขบางประการที่จะให้ทรัพยากรสามารถเข้าทำกิจกรรมนั้น ๆ ได้ หรือการรอคอยที่เกิดจากทรัพยากรอื่นไม่ว่างงาน ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะให้วัตถุที่อยู่ในสถานะรอคอยนั้นไปคอยอยู่ในเพลส ในขณะที่โปรแกรมอริโน่าสถานะของการรอคอยจะเกิดอยู่ในหน่วยโมดูลต่าง ๆ ที่มีการใช้ทรัพยากร เช่น Seize Module และ Process Module เป็นต้น หรือเกิดอยู่ในหน่วยโมดูลที่มีการตั้งเงื่อนไขในการผ่านออกจากโมดูล เช่น Hold Module

6.2 การดำเนินกิจกรรม

การดำเนินงานหรือการดำเนินกิจกรรม (operating) ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้เพียงแค่ทรานซิชันเพียงชิ้นเดียว แต่ในโปรแกรมอริโน่าการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ จะเลือกใช้หน่วยโมดูลที่หลากหลายตามหน้าที่และความเหมาะสม เช่น Process Module ใช้ในการทำกิจกรรมทั่ว ๆ ไปที่มีการใช้ทรัพยากรหรือไม่มีการใช้ทรัพยากร Delay Module สามารถใช้ในการทำกิจกรรมทั่ว ๆ ไปที่ไม่มีการใช้ทรัพยากรหรือหากมีการใช้ทรัพยากรอาจจะใช้ Seize Module และ Release Module เข้ามาช่วยก็สามารถทำได้ และ Route Module ใช้สำหรับกิจกรรมการเดินทางจากสถานหนึ่งไปยังอีกสถานหนึ่ง เป็นต้น

ในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ จะต้องมีการใส่ค่าของเวลาลงไปด้วย หากเป็นเวลาแบบคงที่ (deterministic durations) ก็สามารถระบุเวลาลงไปได้โดยตรงสำหรับทั้งสองโปรแกรม แต่หากเป็นเวลาที่ไมคงที่และสามารถแปรเปลี่ยนได้ (stochastic durations) โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะต้องมีการเปลี่ยนค่า Seed เพื่อให้การสุ่มแต่ละครั้งใช้เวลาในค่าที่เปลี่ยนไป ในขณะที่โปรแกรมอริโน่าค่าที่ต้องเปลี่ยนเพื่อที่จะให้การสุ่มเปลี่ยนไปคือค่าตัวเลขสุ่ม (random number) ซึ่งค่าตัวเลขสุ่ม จะต้องกำหนดในทุก ๆ หน่วยโมดูลที่มีการใส่ค่าของเวลาลงไป โดยแต่ละหน่วยโมดูลไม่จำเป็นต้องใส่ค่าตัวเลขสุ่มเป็นเลขเดียวกัน

6.3 ลำดับความสำคัญของแต่ละกิจกรรม

การใส่ลำดับความสำคัญ ของกิจกรรม (priority of work task) จะเกิดขึ้นเมื่อมีกิจกรรมมากกว่าหนึ่งกิจกรรมที่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ แต่มีทรัพยากรอยู่สำหรับการทำเพียงกิจกรรมเดียว และต้องการให้กิจกรรมที่สำคัญกว่าได้สิทธิ์ในการใช้ทรัพยากรนั้นก่อน ซึ่งในโปรแกรมคอมปอสลำดับความสำคัญจะถูกกำหนดลงไปในทรานซิชันของกิจกรรมต่าง ๆ ในขณะที่โปรแกรมอริ่น่าลำดับความสำคัญจะถูกกำหนดลงไปหน่วยโมดูลที่มีการเรียกใช้ทรัพยากรนั้น ๆ

6.4 การสุ่ม

การสุ่ม (randomness) เกิดจากการที่มีทางเลือกแต่ไม่มีกฎเกณฑ์ที่กำหนด เช่น มีเหตุการณ์บางเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นก็ได้ เป็นต้น เหตุการณ์เหล่านั้นจะถูกจำลองสถานการณ์ด้วยการใส่ค่าความน่าจะเป็นลงไป ในโปรแกรมคอมปอสโอกาสที่จะเกิดขึ้นของเหตุการณ์ต่าง ๆ จะถูกใส่ลงไปในทรานซิชัน ในขณะที่โปรแกรมอริ่น่าจะใช้ Decide Module ในการที่ต้องมีการตัดสินใจที่จะเลือก โดยจะต้องกำหนดค่าของความน่าจะเป็นลงไป ใน Decide Module นั้น

6.5 กิจกรรมที่เกิดขึ้นตามลำดับ

กระบวนการก่อสร้างประกอบด้วยกิจกรรมย่อยต่าง ๆ ที่ดำเนินงานสัมพันธ์กันหรือดำเนินงานเป็นลำดับขั้นตอน (sequence) การดำเนินกิจกรรมเป็นลำดับขั้นในโปรแกรมคอมปอสทำได้โดยการแทนกิจกรรมแรกด้วยทรานซิชันอันหนึ่ง จากนั้นเชื่อมต่อทรานซิชันอันนั้นกับทรานซิชันอีกอันหนึ่ง (ผ่านเพลส) ซึ่งแทนกิจกรรมในลำดับถัดไป ในขณะที่โปรแกรมอริ่น่าจะใช้วิธีเชื่อมหน่วยโมดูลที่ใช้ในการทำกิจกรรมที่ต่อกันเข้าด้วยกัน

6.6 กิจกรรมที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน

กิจกรรมบางกิจกรรมสามารถแยกกันและดำเนินกิจกรรมพร้อมกันได้ (concurrency) ในโปรแกรมคอมปอสหากกิจกรรมถัดไปจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันมากกว่า 1 กิจกรรม จะใช้อาร์คมากกว่า 1 อันเชื่อมออกจากทรานซิชันของกิจกรรมที่เกิดขึ้นก่อน ส่วนในโปรแกรมอริ่น่าจะใช้ Separate Module ในการแยกกันหรือเพิ่มเส้นทางเพื่อไปทำกิจกรรมถัดไปที่มากกว่า 1 กิจกรรม

6.7 การเปลี่ยนแปลงสถานะของทรัพยากร

การเปลี่ยนแปลงสถานะของทรัพยากร (resource transformation) จะเกิดขึ้นเมื่อเมื่อทรัพยากรนั้น ๆ ผ่านกิจกรรมหนึ่งไปในโปรแกรมคอมปอสจากสถานะในเพลสหนึ่งเมื่อผ่านกิจกรรมของทรานซิชัน และส่งต่อไปยังอีกเพลสหนึ่ง สถานะของวัตถุในเพลสนั้นจะเปลี่ยนไป เนื่องมาจากการทำกิจกรรม (firing) ของทรานซิชัน ในขณะที่โปรแกรมอริ่น่าจะกำหนดสถานะให้กับวัตถุจะใช้ Assign Module ในการระบุชื่อประเภทต่าง ๆ ให้กับวัตถุ

6.8 ความล่าช้า

ความล่าช้าในกระบวนการก่อสร้าง (delay) จะเกิดขึ้นเมื่อมีกิจกรรมอันไม่พึงประสงค์เกิดขึ้น และเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะใช้เวลา กล่าวได้ว่าเกิดเวลาล่าช้าขึ้น ซึ่งจะทำให้เวลารวมของกระบวนการเพิ่มขึ้นไปด้วย ในโปรแกรมคอมปอสจะใช้ทรานซิชันในการดำเนินกิจกรรมที่ก่อให้เกิดความล่าช้าขึ้น ส่วนในโปรแกรมอริ่น่าจะเลือกใช้หน่วยโมดูลต่าง ๆ ตาม เช่น Process Module และ Delay Module แล้วแต่กรณี

6.9 การเลือกเส้นทางของทรัพยากร

การตัดสินใจเลือกเส้นทางของทรัพยากร (resource flow branching) จะเกิดขึ้นเมื่อทรัพยากรนั้นมีตัวเลือกในการทำกิจกรรมให้เลือก โดยอาจเลือกไปทำกิจกรรมนั้น ๆ หากตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ หรือเลือกทำกิจกรรมตามค่าความน่าจะเป็น (probability) และค่าลำดับความสำคัญ (priority) ที่กำหนดไว้ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เมื่อต้องเลือกไปทำกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งจะใช้อาร์คออกจากเพลสก่อนหน้ามากกว่า 1 เส้น เพื่อต่อไปยังทรานซิชันของกิจกรรมตัวเลือกต่าง ๆ ที่มีการกำหนดค่าความน่าจะเป็น ค่าลำดับความ หรือเงื่อนไขเอาไว้ ส่วนในโปรแกรมอริ่น่าจะใช้ Decide Module เมื่อต้องมีการตัดสินใจเกิดขึ้น โดยระบุเงื่อนไขของการเลือกดำเนินกิจกรรมลงไป

7. บทสรุป

โปรแกรมอริ่น่าสามารถจำลองกระบวนการก่อสร้างได้ตามคุณลักษณะของกระบวนการก่อสร้างในด้านต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากันหรือไม่แตกต่างกันในทางสถิติกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมอริ่น่าเมื่อจำลองสถานการณ์เดียวกัน แบบจำลองคอมพิวเตอร์หรือแบบจำลองเพตริเน็ตส์มีความเหมาะสมในการใช้งานกรณีจำลองกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากตัวแบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับ CPM (Critical Path Method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้วิธีเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่าง ๆ และ CPM ยังเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวางแผนงานที่นิยมใช้ในงานก่อสร้าง จึงทำให้แบบจำลองคอมพิวเตอร์เข้าใจได้ง่ายเมื่อใช้ในงานก่อสร้าง ในขณะที่โปรแกรมอริ่น่าเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการสร้างแบบจำลองได้หลากหลายและผู้ใช้สามารถระบุรายละเอียดต่าง ๆ ของแต่ละกิจกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jirawat Damrianant and Siwakorn Puangpool. Guidelines and difficulties on applications of construction process simulation: a case study on Thadan dam. In: *10th National Convention on Civil Engineering*, Pattaya, Thailand, 2-4 May 2005.
- [2] Jirawat Damrianant. Construction-process analysis and design concepts. *Thai Journal of Science and Technology*, 2012, 1(2). pp.69-78.
- [3] Jirawat Damrianant. Optimization of Supply Trains in Tunnel Boring Operation Using Tunnel Boring Machines. In: *The Sixth International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering*, Zurich, Switzerland, 2018.
- [4] Jirawat Damrianant. COSMOS: a discrete-event methodology for construction processes. *International Journal of Internet and Enterprise Management*, 2003.
- [5] K.M. Shawki, K. Kilani and M.A. Gomaa. Analysis of earth-moving system using discrete-event simulation. *Alexandria Engineering Journal*, 2015. pp.533-540.
- [6] Jamal Rostami et al. Advance rate simulation for hard rock TBMs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 28(3). pp.837-852.
- [7] Amin Nikakhtar et al. Comparison of two simulation software systems for modeling a construction process. In: *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Modeling & Simulation*, 2011.
- [8] Damrianant, J. and Wakefield, R. R. Examination and modification of Petri net-based methodology for construction-process modelling. *Journal of Project and Construction Management*, 1998, 4(2). pp.55-75.
- [9] Damrianant, J. and Chiravanich T. Characteristics of construction processes to considering for development of practical construction-process modelling methodologies. In: *Proceedings of the Fifth National Convention on Civil Engineering*, Engineering Institute of Thailand (EIT), Pattaya, Thailand, 1999.