การทวนสอบเชิงรูปนัยของการออกแบบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้โมเดลเช็คกิง

นายชานนท์ เดชสุภา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FORMAL VERIFICATION OF BPMN DESIGN USING MODEL CHECKING

Mr. Chanon Dechsupa

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Computer Engineering) in Computer Engineering

Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทวนสอบเชิงรูปนัยของการออกแบบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้โมเดลเช็คกิง
โดย	นายชานนท์ เดชสุภา
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บุญเสริม กิจศิริกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธาราทิพย์ สุวรรณศาสตร์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ หมื่นไชยศรี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เด่นดวง ประดับสุวรรณ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชานนท์ เดชสุภา : การทวนสอบเชิงรูปนัยของการออกแบบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้โมเดลเช็คกิง. (FORMAL VERIFICATION OF BPMN DESIGN USING MODEL CHECKING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์

การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลเช็คกิงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยให้มั่นใจว่าโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ออกแบบปราศจากปัญหาติดตายและปราศจากคุณสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ที่เป็นสาเหตุโมเดลไม่ตรงตามความต้องการหรือส่งผลให้ระบบหยุดทำงาน คุณสมบัติของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่จำเป็นต้องทวนสอบได้แก่ คุณสมบัติความปลอดภัยและคุณสมบัติความสมบูรณ์ ขั้นตอนการทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิงค่อนข้างซับซ้อนเพราะเกี่ยวข้องกับภาษารูปนัยที่ใช้อธิบายโมเดลเชิงนามธรรมและการใช้เครื่องมือทวนสอบ รวมถึงอาจต้องใช้เทคนิคเฉพาะเพื่อจัดการโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่ที่เป็นสาเหตุของปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะ การสร้างโมเดลนามธรรมโดยอัตโนมัติช่วยลดความผิดพลาดและเวลาที่ใช้ในการสร้างโมเดล สามารถจัดการโมเดลที่มีขนาดใหญ่และปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะได้ งานวิจัยนี้เสนอเทคนิคการทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัย คุณสมบัติความสมบูรณ์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง คัลเลอร์เพทริเน็ตหรือซีพีเอ็นถูกนำมาใช้อธิบายโมเดลนามธรรม เทคนิคการแบ่งโมเดลออกเป็นโมเดลย่อยและการจัดโครงสร้างโมเดลแบบมีลำดับชั้นถูกนำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะ กรอบงานได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นและมีตัวสร้างและค้นปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น ซึ่งกรอบงานเป็นตัวเลือกที่มีประโยชน์สำหรับนักออกแบบกระบวนการซอฟต์แวร์ที่ต้องการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5771463621 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD: FORMAL MODEL, BPMN, COLORED PETRI NET, FORMAL VERIFICATION, MODEL TRANSFORMATION

Chanon Dechsupa : FORMAL VERIFICATION OF BPMN DESIGN USING MODEL CHECKING. Advisor: Assoc. Prof. Wiwat Vatanawood, Ph.D.,Asst. Prof. Arthit Thongtak, Ph.D.

Formal verification using model checking is a process to ensure that the BPMN design model is free of deadlock and other undesirable properties that can cause a system crash. Safeness and soundness are the important properties that have to be verified of the BPMN design model. Formal verification is a complicated procedure involving the fomal language for model abstraction and the use of model checking tools, including the techniques for handling large-scale BPMN design model and state space explosion problem. An automated transformation can reduce the flaws, time consumption, and complexity of the large-scale BPMN design mode, as well as overcoming the state space explosion problem. This paper proposes the safeness and soundness verification techniques for BPMN design model using model checking. Colored Petri Net (CPN) is used to describe an abstract model. A BPMN partitioning technique and a hierarchical verification are used for avoiding state space explosion problem. To validate and analyze BPMN design model, the transformation technique and state space generator have been implemented as a BPMN verification framework which is a viable option for the software process designers and suitable for large-scale BPMN design model verification.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Computer Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature .....
		Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างยิ่งที่สละเวลาและให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำและแก้ไขปรับปรุงข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์นี้

ขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.บุญเสริม กิจศิริกุล ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.ธาราทิพย์ สุวรรณศาสตร์ รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ หมื่นไชยศรี กรรมการสอบ และขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เด่นดวง ประดับสุวรรณ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความกรุณามอบทุนสนับสนุนการศึกษาและทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผ่องพรรณ ประสารกก พี่สาวที่ให้กำลังใจและผลักดันให้การทำวิจัยสามารถดำเนินและลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณ อาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบความรู้ในการทำวิจัย และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในระหว่างที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สุดท้ายขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้ แนวคิด มุมมอง และความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาของการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชานนท์ เดชสุภา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.6 การจัดเรียงของวิทยานิพนธ์ 3

1.7 บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1. บีพีเอ็มเอ็น (BPMN) 5

2.1.2. คุณสมบัติของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดี 8

2.1.3. โมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นของอีคลิปส์ (Eclipse BPMN modeler) [27] 8

2.1.4. หลักการทวนสอบเชิงรูปนัยโดยวิธีโมเดลเช็คกิง 9

2.1.5. คัลเลอร์เพทริเน็ต (Colored Petri) 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2. ทบทวนวรรณกรรม 17
บทที่ 3 การสร้างโมเดลซีพีเอ็นจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 21
3.1. นิยามที่เกี่ยวข้องกับการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น 22
3.1.1. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นทั่วไป 22
3.1.2. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบลำดับชั้น 22
3.1.3. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน 23
3.1.4. นิยามพาร์ทในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 23
3.1.5. นิยามโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในรูปแบบที่ดี 24
3.1.6. นิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น 24
3.1.7. นิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น 25
3.1.8. นิยามกราฟการเข้าถึง 25
3.1.9. ทฤษฎีการทวนสอบแบบลำดับชั้น 25
3.1.10. คัลเลอร์เซ็ตที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็น 26
3.2. การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย 26
3.2.1. การแบ่งโมเดลขั้นต้นด้วยวิธีพิจารณาคู่เกตเวย์ 29
3.2.2. การแบ่งโมเดลด้วยวิธีพิจารณาน้ำหนัก 30
3.3. การแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น 34
บทที่ 4 การสร้างและค้นปริภูมิสถานะ 49
4.1. โครงสร้างข้อมูลของปริภูมิสถานะ 49
4.2. การปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็นก่อนสร้างปริภูมิสถานะ 52
4.2.1. การปรับแต่งคุณสมบัติของเพลส 52
4.2.2. การปรับแต่งอินสคริปชันของอาร์ก 53
4.2.3. การปรับแต่งเงื่อนไขของทรานซิชัน 55
4.3. การสร้างปริภูมิสถานะ 56

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1. การสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น 56
4.3.2. ปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น 59
4.3.3. ปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นแบบมีโครงสร้างแบบมีลำดับชั้น 60
4.4. การค้นปริภูมิสถานะ 64
4.4.1. องค์ประกอบของคำค้นปริภูมิสถานะ 64
4.4.2. การแวะผ่านกราฟการเข้าถึง (Reachability graph traversal) 66
4.5. หลักการเลือกสับเน็ตเพื่อสร้างปริภูมิสถานะและคำค้นปริภูมิสถานะ 67
4.5.1. การพิจารณาสับเน็ตและความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตกับคำค้นปริภูมิสถานะที่ใช้ 68
4.5.2. การพิจารณาสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนและคำค้นปริภูมิสถานะ 69
4.5.3. การทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นที่สร้างจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน 71
บทที่ 5 การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบและการพัฒนาระบบ 74
5.1. การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ 74
5.2. การออกแบบและการพัฒนาระบบ 76
5.2.1. ความต้องการเชิงฟังก์ชัน 76
5.2.2. การออกแบบระบบ 78
5.2.3. การพัฒนาระบบ 79
บทที่ 6 การทดสอบระบบทวนสอบโมเดลบีพีเมเอ็น 81
6.1. กรณีทดสอบที่ 1: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ 82
6.2. กรณีทดสอบที่ 2: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 92
6.3. กรณีทดสอบที่ 3: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก 100
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 108
7.1. สรุปผลการวิจัย 108
7.2. ข้อจำกัด 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.3. ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา 110
ภาคผนวก ก คำอธิบายยูสเคส 111
ภาคผนวก ข การ์ดแสดงความรับผิดชอบและผู้ทำงานร่วม 119
ภาคผนวก ค การใช้งานระบบ 127
ภาคผนวก ง นิยามการความสัมพันธ์เชิงรูปนัยของการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น . 140
ภาคผนวก จ การพิสูจน์กฎการแปลงอิลีเมนต์และการทวนสอบแบบลำดับชั้น 144
1. นิยามที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์ 144
2. ขั้นตอนการพิสูจน์และวิธีพิสูจน์ความถูกต้องของการแปลงโมเดลและการทวนสอบโมเดล ... 147
ภาคผนวก ฉ อภิธานศัพท์ 159
บรรณานุกรม 164
ประวัติผู้เขียน 171

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 อิลีเมนต์พื้นฐานของบีพีเอ็มเอ็น [1] 5

รูปที่ 2-2 ตัวอย่างโมเดลที่ออกแบบด้วยสัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็น 7

รูปที่ 2-3 ขั้นตอนการทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง 9

รูปที่ 2-4 ตัวอย่างแผนภาพคุณสมบัติที่อยู่ในปริภูมิสถานะ [30] 11

รูปที่ 2-5 ส่วนประกอบเพทริเน็ตและการยิงโทเค็นของทรานซิชัน [34] 15

รูปที่ 2-6 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็น [34] 15

รูปที่ 2-7 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น [34] 16

รูปที่ 3-1 ภาพรวมของการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง 21

รูปที่ 3-2 ชนิดของโหนดและแบบรูปของโฟลว์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 30

รูปที่ 3-3 ตัวอย่างโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้จากการพิจารณาเกตเวย์ 31

รูปที่ 3-4 ตัวอย่างพาร์ทิชันโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้จากการพิจารณาคู่เกตเวย์และพิจาณานำหนัก 34

รูปที่ 3-5 ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปรที่ได้จากการแปลงนิยามไอเท็ม 34

รูปที่ 3-6 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เริ่มต้น 36

รูปที่ 3-7 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุด 37

รูปที่ 3-8 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุดแบบมีการส่งสัญญาณ 37

รูปที่ 3-9 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ 38

รูปที่ 3-10 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์รับ 39

รูปที่ 3-11 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ส่ง 39

รูปที่ 3-12 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียท 40

รูปที่ 3-13 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียท 41

รูปที่ 3-14 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3-15 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ 42
รูปที่ 3-16 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ ... 43
รูปที่ 3-17 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ 43
รูปที่ 3-18 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อินคลูซีพที่ใช้แตกกระบวนการ..... 44
รูปที่ 3-19 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อินคลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ 44
รูปที่ 3-20 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงเกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้แตกกระบวนการ..... 45
รูปที่ 3-21 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้ประสานกระบวนการ 46
รูปที่ 3-22 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์โฟลว์ข้อความ 46
รูปที่ 3-23 ตัวอย่างการต่อโครงสร้างซีพีเอ็น..... 47
รูปที่ 3-24 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นในรูปที่ 3-4..... 48
รูปที่ 4-1 องค์ประกอบของกราฟการเข้าถึง..... 49
รูปที่ 4-2 โครงสร้างข้อมูลปริภูมิสถานะ 51
รูปที่ 4-3 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติให้กับเพลส..... 52
รูปที่ 4-4 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำเข้า..... 53
รูปที่ 4-5 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าทางตรง..... 54
รูปที่ 4-6 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าเชิงฟังก์ชัน 54
รูปที่ 4-7 ตัวอย่างอินสคริปชันที่เป็นเงื่อนไขของทรานซิชัน 55
รูปที่ 4-8 ตัวอย่างขั้นตอนการสร้างมาร์คกิงบัฟหลัง 58
รูปที่ 4-9 ตัวอย่างปริภูมิสถานะที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น..... 59
รูปที่ 4-10 ตัวอย่างปริภูมิสถานะที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้น..... 60
รูปที่ 4-11 เปรียบเทียบปริภูมิสถานะของซีพีเอ็นโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและมีลำดับชั้น 61
รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบมาร์คกิงตายระหว่างโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและมีลำดับชั้น..... 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-13 ตัวอย่างคำค้นและองค์ประกอบของคำค้นปริภูมิสถานะ 65
รูปที่ 4-14 แผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นแบบ 1 พารามิเตอร์ 66
รูปที่ 4-15 แผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นแบบ 2 พารามิเตอร์ 67
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตและคำค้นปริภูมิสถานะ 69
รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนและคำค้นปริภูมิสถานะ 70
รูปที่ 4-18 การทวนสอบโมเดลกรณีที่เลือกสับเน็ตที่อยู่ต่างพูล 72
รูปที่ 4-19 การทวนสอบโมเดลกรณีที่เลือกสับเน็ตที่อยู่ต่างพูล 73
รูปที่ 5-1 ภาพรวมของขั้นตอนการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น [18] 74
รูปที่ 5-2 สถาปัตยกรรมระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 75
รูปที่ 5-3 แผนภาพยูสเคสระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 78
รูปที่ 5-4 แผนภาพคลาสของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 79
รูปที่ 6-1 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ 85
รูปที่ 6-2 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ 87
รูปที่ 6-3 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ 88
รูปที่ 6-4 โมเดลซีพีเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ 89
รูปที่ 6-5 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 94
รูปที่ 6-6 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 95
รูปที่ 6-7 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบประเมินสินเชื่อจำนองที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ 96
รูปที่ 6-8 โมเดลซีพีเอ็นระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 97
รูปที่ 6-9 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบค้าปลีก 102
รูปที่ 6-10 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก 103
รูปที่ 6-11 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบค้าปลีกที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ 104

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6-12 โมเดลซีพีเอ็นของระบบค้าปลีก 105
รูปที่ ค-1 หน้าจอตั้งค่าโครงการ 127
รูปที่ ค-2 หน้าจอแสดงรายการโครงการ 128
รูปที่ ค-3 ผังหน้าจอหลักของโครงการ 128
รูปที่ ค-4 หน้าจอข้อมูลโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 129
รูปที่ ค-5 หน้าจอจัดการโมเดลซีพีเอ็น 129
รูปที่ ค-6 หน้าจอจัดการข้อมูลเพลส 130
รูปที่ ค-7 หน้าจอจัดการข้อมูลทรานซิชัน 131
รูปที่ ค-8 หน้าจอจัดการข้อมูลอาร์ก 131
รูปที่ ค-9 หน้าจอการกำหนดเพรดิเคทเพื่อทวนสอบค่ายืนยงระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ 132
รูปที่ ค-10 ตัวอย่างข้อความแสดงความไม่สมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็นที่ไม่พร้อมนำไปสร้างปริภูมิสถานะ 132
รูปที่ ค-11 หน้าจอการเลือกสับเน็ตและการกำหนดทรานซิชันทดแทนของโมเดลซีพีเอ็นเพื่อนำไปสร้างปริภูมิสถานะ 133
รูปที่ ค-12 หน้าจอสำหรับค้นปริภูมิสถานะ 134
รูปที่ ค-13 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น EF($\rho \longrightarrow$ EF(φ)) 137
รูปที่ ค-14 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น AG($\rho \longrightarrow$ EF(φ)) 137
รูปที่ ค-15 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น AG($\rho \wedge$ EF(φ)) 139

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตที่ได้จากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 26

ตารางที่ 3-2 รายการคุณสมบัติของอิลีเมนต์ที่สกัดจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 27

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นในรูปที่ 3-3 ด้วยการพิจารณาคู่เกตเวย์ 32

ตารางที่ 3-4 สรุปข้อมูลการแบ่งโมเดลหลังพิจารณาค่านำหนักรวมต่อพาร์ทิชัน 33

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลไบด์ดิงอิลีเมนต์ของสับเน็ต Sub-net:M1-2 62

ตารางที่ 4-2 รายการมาร์คกิงตายและลำดับการยิงโทเค็นของสับเน็ต Sub-net:M1-2..... 63

ตารางที่ 4-3 คำค้นที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะ 64

ตารางที่ 4-4 ตัวอย่างคำค้นที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะของปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-17 (b) 71

ตารางที่ 5-1 รายการความต้องการเชิงฟังก์ชันของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น..... 76

ตารางที่ 6-1 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานงานช่างซ่อมรถยนต์ 83

ตารางที่ 6-2 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ..... 84

ตารางที่ 6-3 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ในรูปที่ 6-4 90

ตารางที่ 6-4 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ 91

ตารางที่ 6-5 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 93

ตารางที่ 6-6 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนองที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ 94

ตารางที่ 6-7 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง 98

ตารางที่ 6-8 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบประเมินสินเชื่อจำนองด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ 99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6-9 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก 100
ตารางที่ 6-10 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีกที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ 101
ตารางที่ 6-11 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นระบบค้าปลีก 106
ตารางที่ 6-12 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบค้าปลีกด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ 107
ตารางที่ ก-1 คำอธิบายยูสเคสจัดการบัญชีชื่อโครงการ 111
ตารางที่ ก-2 คำอธิบายยูสเคสนำเข้าไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นและไฟล์เอ็กซ์เอสดี 112
ตารางที่ ก-3 คำอธิบายยูสเคสดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 113
ตารางที่ ก-4 คำอธิบายยูสเคสแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น 114
ตารางที่ ก-5 คำอธิบายยูสเคสดูโมเดลซีพีเอ็น 115
ตารางที่ ก-6 คำอธิบายยูสเคสปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น 116
ตารางที่ ก-7 คำอธิบายยูสเคสสร้างปริภูมิสถานะ 117
ตารางที่ ก-8 คำอธิบายยูสเคสค้นปริภูมิสถานะ 118
ตารางที่ ข-1 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโครงการ 119
ตารางที่ ข-2 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 120
ตารางที่ ข-3 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโหนดบีพีเอ็มเอ็น 120
ตารางที่ ข-4 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสเส้นบีพีเอ็มเอ็น 121
ตารางที่ ข-5 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสนิยามไอเท็ม 121
ตารางที่ ข-6 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสอินสริปชัน 122
ตารางที่ ข-7 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลย่อย 122
ตารางที่ ข-8 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลซีพีเอ็น 123
ตารางที่ ข-9 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสเพลสซีพีเอ็น 123
ตารางที่ ข-10 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสทรานซิชันของโมเดลซีพีเอ็น 124
ตารางที่ ข-11 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสอาร์กซีพีเอ็น 124
ตารางที่ ข-12 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปร 125
ตารางที่ ข-13 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลซีพีเอ็นเพื่อการสร้างปริภูมิสถานะ 125

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-14 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสปริภูมิสถานะ 126
ตารางที่ ค-1 รายการคำค้นปริภูมิสถานะและฟังก์ชันที่เรียกใช้ 134
ตารางที่ ค-2 ตารางค่าความจริงของ $\rho \longrightarrow EF(\varphi)$ 136
ตารางที่ ค-3 ตารางค่าความจริงของ $\rho \wedge EF(\varphi)$ 138
ตารางที่ จ-1 ข้อมูลสับเน็ตและเทรซของการเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7 13854

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

บีพีเอ็มเอ็น (Business Process Model and Notation : BPMN) [1] เป็นภาษาเชิงสัญลักษณ์ที่ได้รับความนิยมในการออกแบบซอฟต์แวร์และออกแบบโมเดลทางธุรกิจ เนื่องจากบีพีเอ็มเอ็นไม่มีอรรถศาสตร์ (Semantics) ที่เป็นมาตรฐานซึ่งอาจทำให้นักออกแบบใช้สัญลักษณ์ที่กำกวมหรือไม่เหมาะสม และส่งผลให้โมเดลซอฟต์แวร์ที่ออกแบบอาจมีส่วนที่ไม่เป็นไปตามความต้องการหรือมีพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์ (Undesirable properties) โดยเฉพาะโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่หรือโมเดลที่มีลักษณะทำงานแบบขนาน (Parallel) ที่มีพฤติกรรมการทำงานที่ซับซ้อน ดังนั้นนักออกแบบจึงจำเป็นต้องทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัย (Safe properties), คุณสมบัติความสมบูรณ์ (Sound properties) และตรวจหาการละเมิดค่ายืนยง (Invariant violation) ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ออกแบบก่อนนำโมเดลไปพัฒนา การทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง (Model checking) [2], [3] เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นได้ วิธีโมเดลเช็คกิงเป็นการใช้เครื่องมือค้นหาความผิดพลาดที่อยู่ในโมเดล แต่วิธีโมเดลเช็คกิงยังมีข้อจำกัด เช่น ความซับซ้อนของขั้นตอนการสร้างโมเดลนามธรรม (Abstract model), ปัญหาเกี่ยวกับโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่และปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะ (State space explosion) [4] เป็นต้น

การระเบิดของปริภูมิสถานะเป็นปัญหาหลักของการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง สาเหตุหลักของปัญหาคือโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ทวนสอบมีขนาดใหญ่ เมื่อแปลงโมเดลไปเป็นโมเดลนามธรรมและนำโมเดลนามธรรมไปสร้างปริภูมิสถานะ (State space) จะได้ปริภูมิสถานะที่มีขนาดใหญ่เกินความสามารถของเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะ (State space generator) ขนาดของปริภูมิสถานะขึ้นอยู่กับจำนวนกิจกรรม, ความขึ้นต่อกันของคอนโทรลโฟลว์ (Control flow dependencies) [5], ความขึ้นต่อกันของข้อมูล (Data dependencies) [6] และความหลากหลายของตัวแปร การทวนสอบแบบลำดับชั้น (Hierarchical verification) [7], [8] เป็นเทคนิคหนึ่งที่ช่วยลดขนาดของปริภูมิสถานะและหลีกเลี่ยงปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะ ในขั้นตอนการทวนสอบโมเดลนักออกแบบจำเป็นต้องแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลนามธรรมที่อธิบายด้วยภาษารูปนัย (Formal languages) ถ้าโมเดลมีขนาดใหญ่นักออกแบบอาจแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นออกเป็นโมเดลย่อย แล้วเลือกโมเดลย่อยเหล่านั้นไปทวนสอบด้วยวิธีทวนสอบทีละส่วน, หรือวิธีการทวนสอบแบบเพิ่มส่วน (Incremental verification) [9] หรือปรับแต่งโมเดลให้อยู่ในโครงสร้างแบบมีลำดับชั้นก่อนที่จะนำโมเดลไปสร้างปริภูมิสถานะ ขั้นตอนเหล่านี้ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยากสำหรับนักออกแบบที่ไม่คุ้นเคยกับภาษารูปนัยและเครื่องมือทวนสอบ จึงมีหลายงานวิจัย [10], [11], [12], [13], [14], [15] เสนอเทคนิคการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ช่วยให้ทวนสอบโมเดลได้สะดวกขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัย คุณสมบัติความสมบูรณ์ และตรวจหาการละเมิดค่ายืนยงของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลช็คกิง ซึ่งใช้เทคนิคการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นออกเป็นโมเดลย่อยและแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลนามธรรมที่อธิบายด้วยภาษาซีพีเอ็น (Colored Petri Net: CPN) หลังจากนั้นสร้างและทวนสอบคุณสมบัติด้วยการค้นปริภูมิสถานะ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่าการวิเคราะห์ปริภูมิสถานะ (State space analysis) [16, 17]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) หาวิธีทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัยและคุณสมบัติความสมบูรณ์ของการออกแบบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้โมเดลเช็คกิงที่รองรับโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่
2) พัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการทวนสอบเชิงรูปนัยการออกแบบบีพีเอ็มเอ็น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1) เสนอวิธีในการแบ่งกระบวนการของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย
2) เสนอวิธีการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลนามธรรมที่อธิบายด้วยซีพีเอ็น
3) เสนอวิธีการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลนามธรรมที่ได้จากข้อ 2
4) เสนอวิธีการทวนสอบด้วยวิธีการค้นหาคุณสมบัติจากปริภูมิสถานะที่ได้จากข้อ 3
5) การแบ่งโมเดลใช้พิจารณาจากประเภทของกระบวนการที่ประกอบด้วย กระบวนการแบบเป็นลำดับ กระบวนการแบบทางแยกหรือแบบขนาน
6) วิธีการแปลงอิลีเมนต์ในข้อ 2 จะพิสูจน์ความถูกต้องกฎการแปลงอิลีเมนต์ โดยการพิสูจน์แบ่งเป็น 2 ช่วงดังนี้
   (1) พิสูจน์แต่ละโครงสร้างซีพีเอ็นหลังจากแปลงอิลีเมนต์
   (2) พิสูจน์หลังจากรวมโมเดลย่อยเข้าด้วยกัน
7) การสร้างปริภูมิสถานะใช้วิธีลดปริภูมิสถานะ 2 วิธีดังนี้
   (1) การจัดโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น
   (2) การสร้างปริภูมิสถานะจากประพจน์ของคุณสมบัติยืนยง
8) การทวนสอบคุณสมบัติรองรับการคุณสมบัติความปลอดภัย คุณสมบัติความสมบูรณ์ และการทวนสอบค่ายืนยง
9) วิธีการที่เสนอถูกพัฒนาเป็นเครื่องมือสนับสนุนการทวนสอบโดยมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้
   (1) เครื่องมือสามารถแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลเชิงนามธรรมที่อธิบายด้วยซีพีเอ็นได้
   (2) เครื่องมือสามารถสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นได้
   (3) เครื่องมือสามารถค้นหาคุณสมบัติจากปริภูมิสถานะด้วยคุณสมบัติรองรับการคุณสมบัติความปลอดภัย คุณสมบัติความสมบูรณ์ และการทวนสอบค่ายืนยง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

(4) เครื่องมือสามารถแสดงข้อมูลตัวอย่าง (Counterexample) ในกรณีที่โมเดลซีพีเอ็นมีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามคุณสมบัติที่ทวนสอบได้

10) ข้อมูลนำเข้าของเครื่องมือมีดังนี้
   (1) ไฟล์โมเดลซอฟต์แวร์ที่ออกแบบด้วยสัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็น
   (2) ไฟล์เอ็กซ์เอสดีที่อธิบายคุณสมบัติตัวแปรที่ใช้ในโมเดล
   (3) คำค้นคุณสมบัติที่ต้องการทวนสอบ
11) ข้อมูลนำออกของเครื่องมือ คือ รายงานผลการค้นหาคุณสมบัติ
12) การทดสอบเครื่องมือใช้กรณีศึกษาอย่างน้อย 3 กรณีศึกษา โดยกรณีศึกษาที่ใช้มีลักษณะโมเดลที่ออกแบบด้วยบีพีเอ็มเอ็นดังนี้
   (1) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ไม่มีพูล (Pool)
   (2) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีการส่งข้อมูลระหว่างพูล

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1) ศึกษาคำอธิบายโมเดล (Meta-model) ของบีพีเอ็มเอ็น
2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทวนสอบเชิงรูปนัย
3) ศึกษาพื้นฐานการสร้างโมเดลซีพีเอ็น
4) ออกแบบขั้นตอนการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย
5) ออกแบบวิธีการแปลงอิลีเมนต์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโครงสร้างซีพีเอ็น
6) ออกแบบการต่อโครงสร้างซีพีเอ็น
7) ออกแบบการทวนสอบคุณสมบัติด้วยวิธีการทวนสอบแบบมีลำดับขั้น
8) พัฒนากรอบงานตามวิธีการที่ออกแบบ
9) ทำการทดสอบระบบด้วยกรณีศึกษา
10) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้วิธีทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัยและคุณสมบัติความสมบูรณ์ของการออกแบบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้โมเดลเช็คกิง
2) ได้เครื่องมือสนับสนุนการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยที่ใช้ภาษาซีพีเอ็นด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปริภูมิสถานะที่หลีกเลี่ยงการระเบิดของสถานะ

1.6 การจัดเรียงของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 7 บทดังนี้

บทที่ 1 อธิบายหลักการและเหตุผลของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขต และขั้นตอนวิธีการดำเนินการ

บทที่ 2 อธิบายเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับการออกแบบกระบวนการซอฟต์แวร์ด้วยบีพีเอ็มเอ็น วิธีสร้างโมเดลรูปนัยโดยใช้ซีพีเอ็น และหลักการทำโมเดลเซ็คกิง และส่วนสุดท้ายของบทได้บรรยายการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและบีเพล

บทที่ 3 อธิบายวิธีวิจัย การสร้างโมเดลซีพีเอ็นด้วยวิธีการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น เนื้อหาแบ่งออกเป็น 4 ส่วนประกอบด้วย 1) นิยามที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิลีเมนต์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและอิลีเมนต์ของโมเดลซีพีเอ็น 2) คัลเลอร์เซ็ตที่ใช้ในโมเดล 3) ขั้นตอนการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และ 4) การแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็นรวมถึงการจัดโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น

บทที่ 4 อธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น การปรับแต่โมเดลและการตั้งค่าโมเดลก่อนสร้างปริภูมิสถานะและการค้นปริภูมิ

บทที่ 5 อธิบายสถาปัตยกรรมการออกแบบระบบและโครงสร้างของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

บทที่ 6 อภิปรายการทดสอบโดยใช้โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ประกอบด้วย 3 กรณีทดสอบ

บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง ข้อจำกัดของเครื่องมือทวนสอบและข้อเสนอแนะอธิบายในส่วนท้ายของบท

1.7 บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

บทความวิจัยของงานวิจัยได้รับประเมินบทความโดยผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกและตีพิมพ์ในในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับและรายงานการประชุมวิชาการจำนวน 1 ฉบับดังนี้

[19] Dechsupa, C., Vatanawood, W. and Thongtak, A., “Transformation of a BPMN Design Model into Colored Petri Net Using the Partitioning Approach”, Journal of IEEE access, vol. 6, p. 38421–38436, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2853669, 2018

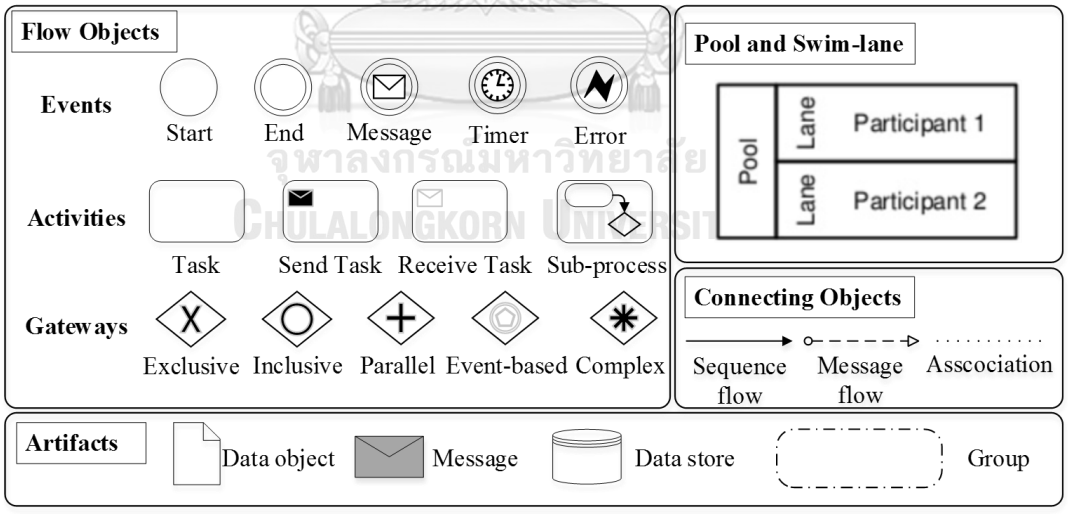
[20] Dechsupa, C., Vatanawood, W. and Thongtak, A., “Formal Verification of Web Service Orchestration Using Colored Petri Net”, IEEE Proceedings, The International Multi Conference of Engineering and Computer Scientists 2016, IMECS 2016, March 16-18, 2016, Hong Kong.

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1. บีพีเอ็มเอ็น (BPMN)

บีพีเอ็มเอ็นถูกคิดค้นโดยบีพีเอ็มไอ (Business Process Management Initiative: BPMI) ปัจจุบันได้รับการปรับปรุงและกำกับดูแลโดยโอเอ็มจี (Object Management Group: OMG) บีพีเอ็มเอ็นเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้อธิบายกระบวนการทางธุรกิจ (Business process) ใช้สร้างโมเดลเพื่อใช้ติดต่อสื่อสารกันระหว่างนักออกแบบระบบและนักพัฒนาระบบ ในปี ค.ศ. 2011 โอเอ็มจีได้ปรับปรุงเป็นเวอร์ชัน 2.0 บีพีเอ็มเอ็นรองรับกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบอิงแบบจำลองเป็นหลัก (Model driven architecture) [21] ที่เป็นการนำสัญลักษณ์มาตรฐานมาใช้อธิบายการบวนการทำงานของซอฟต์แวร์ ลักษณะการใช้สัญลักษณ์ของบีพีเอ็มเอ็นมีความคล้ายคลึงยูเอ็มแอล (Unified Modeling Language: UML) [22] ปัจจุบันเครื่องมือออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นได้ขยายขีดความสามารถให้รองรับการอธิบายการทำงานของซอต์แวร์ได้ละเอียดมากขึ้น บางเครื่องมือมีฟังก์ชันที่สามารถแปลงโมเดลที่ออกแบบด้วยบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นเค้าโครงซอฟต์แวร์ได้ อิลีเมนต์พื้นฐานของบีพีเอ็มเอ็นแสดงตามรูปที่ 2-1 สามารถแบ่งอิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็นออกเป็น 4 กลุ่มหลักตามรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.1.1.1 ถึง 2.1.1.4.



รูปที่ 2-1 อิลีเมนต์พื้นฐานของบีพีเอ็มเอ็น [1]

2.1.1.1. โฟลว์อ็อบเจกต์ (Flow Objects)

คือกลุ่มสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงกิจกรรม เหตุการณ์ และเงื่อนไขการเกิดขึ้นของกิจกรรม รายการสัญลักษณ์และบทบาทหน้าที่มีรายละเอียดดังนี้

1) อีเวนท์เริ่มต้น (Start event): เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงจุดเริ่มต้นของการดำเนินการของกระบวนการ จำนวนของอีเวนท์เริ่มต้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนภาพ ในแผนภาพกระบวนการ (Process diagram) จะมีอีเวนท์เริ่มต้น 1 อีเวนท์ ในขณะที่แผนภาพคอลลาโบเรชัน (Collaboration diagram) มีอีเวนท์เริ่มต้นของกระบวนการมากกว่าหนึ่งอีเวนท์
2) อีเวนท์สิ้นสุด (End event): เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงจุดสิ้นสุดของกระบวนการ
3) อีเวนท์อินเทอร์มีเดียท (Intermediate event): เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างโพรเซส
4) กิจกรรม (Activities): หรือเรียกว่าทาสก์ คือหน่วยของงานที่แสดงกิจกรรมการทำงานของระบบ ประเภทของทาสก์แบ่งออกเป็น 7 ประเภทคือ
   - ทาสก์ (Task)
   - ทาสก์เซอร์วิส (Service task)
   - ทาสก์ส่ง (Send task)
   - ทากส์รับ (Receive task)
   - ทาสก์ยูเซอร์ (User task)
   - ทาสก์แมนนวล (Manual task)
   - ทาสก์บิสิเนสรูล (Business rule task)
   - ทาสก์สคริป (Script task)
5) เกตเวย์ (Gateways): เกตเวย์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือเกตเวย์ที่ใช้แสดงการแตกกระบวนการที่เรียกว่าเกตเวย์แบบไดเวอร์เจนท์ (Divergent gateways) และเกตเวย์ที่ใช้แสดงการประสานกระบวนการที่เรียกว่าเกตเวย์แบบคอนเวอร์เจนท์ (Convergent gateways) และเกตเวย์ยังสามารถแบ่งแยกตามลักษณะการทำงาน 4 ประเภทคือ
   - เกตเวย์อินคลูซีฟ (Inclusive gateways) แสดงทางเลือกที่เกิดขึ้นได้มากกว่า 1 ทางเลือกขึ้นไป
   - เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟ (Exclusive gateways) แสดงทางเลือกที่เกิดขึ้นได้สูงสุด 1 ทางเลือกเท่านั้น
   - เกตเวย์พาราเรล (Parallel gateways) หรือเกตเวย์แบบขนาน ใช้แสดงการเกิดขึ้นของทางเลือกพร้อมๆ กัน
   - เกตเวย์อีเวนท์เบส (Event-based gateways) แสดงทางเลือกที่มีพฤติกรรมการทำงานคล้ายกับเกตเวย์แบบขนานแตกต่างที่การเกิดขึ้นของเกิดการณ์ต้องรอการกระตุ้นจากทาสก์ที่อยู่ต่างพูลเพื่อให้เริ่มการทำงาน

2.1.1.2. อ็อบเจกต์เชื่อมต่อ (Connecting Objects)

เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอ็อบเจกต์โฟลว์ อ็อบเจกต์เชื่อมต่อประกอบด้วย 3 ประเภทคือ

1) โฟลว์ลำดับ (Sequence flow) ใช้แสดงลำดับการเอ็กซ์ซิคิวของทาสก์
2) โฟลว์ข้อความ (Message flow) ใช้แสดงการส่งข้อความข้ามพูล
3) แอสโซชิเอชันดาตา (Data association) ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทาสก์กับอ็อบเจกต์ข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

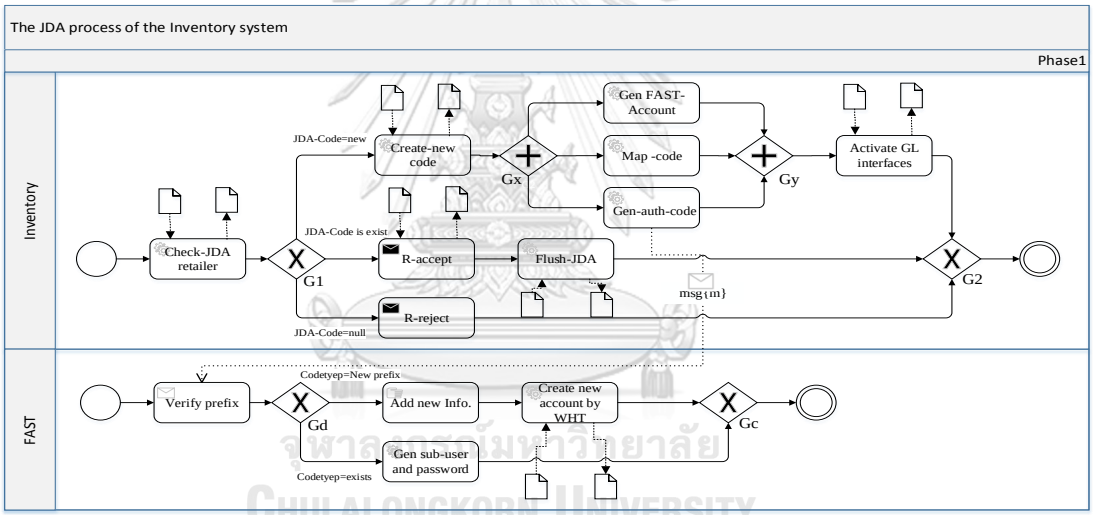
2.1.1.3. อาร์ทิแฟคท์ (Artifacts)

อาร์ทิแฟคท์เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แสดงอ็อบเจกต์นำเข้าหรืออ็อบเจกต์นำออกที่เป็นผลลัพธ์ของการเอ็กซ์ซิคิวทาสก์ เช่น อ็อบเจกต์ข้อมูลนำเข้า (Data Input objects), อ็อบเจกต์ข้อมูลนำออก (Data output objects) แหล่งเก็บข้อมูล (Data store)

2.1.1.4. พูล (Pools)

พูลนำมาใช้ในกรณีที่ในโมเดลมีการแบ่งกระบวนการตามผู้เข้าร่วม (Participants) การสื่อสารระหว่างผู้เข้าร่วมจะใช้โฟลว์ข้อความแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เข้าร่วม

ปัจจุบันมีหลายเครื่องมือที่สนับสนุนการออกแบบกระบวนการซอฟต์แวร์ด้วยสัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็น เช่น เครื่องมือ Visio หรือ Eclipse BPMN modeler เครื่องมือเหล่านี้สามารถใช้ออกแบบพฤติกรรมของซอฟต์แวร์ให้อยู่ในรูปแบบแผนภาพคอลลาโบเรชันหรือแผนภาพกระบวนการได้ ตัวอย่างโมเดลที่ออกแบบด้วยสัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็นแสดงดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างโมเดลที่ออกแบบด้วยสัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็น

รูปที่ 2-2 อธิบายกระบวนการสร้างบัญชีผู้ใช้งานให้กับผู้ค้าที่ต้องการนำสินค้าเข้ามาจำหน่ายในห้างสรรพสินค้า โมเดลแสดงการทำงานของ 2 ผู้เข้าร่วมได้แก่ Inventory คือแผนกตรวจรับสินค้า และ FAST คือแผนกจัดการข้อมูลทางบัญชีการเงิน จุดเริ่มต้นของกระบวนการเริ่มที่แผนกตรวจรับสินค้าจะตรวจสอบรหัสเจดีเอ (JDA) [23] ที่เป็นรหัสเฉพาะของเครื่องบันทึกข้อมูลสินค้าจากผู้ขายสินค้าแต่ละราย ผู้ขายสินค้าจำเป็นต้องมีรหัสเจดีเอและมีบัญชีเข้าใช้งานระบบคลังสินค้า การทำงานเริ่มจากตรวจสอบรหัสเจดีเอเป็นขั้นตอนแรก หากผู้ขายสินค้าเป็นผู้ขายรายใหม่ที่ยังไม่มีรหัสเจดีเอ ระบบจะสร้างรหัสเจดีเอขึ้นมาใหม่ และระบบเรียกใช้เซอร์วิสจากแผนกการเงินและการบัญชีเพื่อสร้างบัญชีเข้าใช้งานระบบคลังสินค้าที่เชื่อมโยงกับระบบงานของแผนกการเงิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.2. คุณสมบัติของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดี

นิยามของคุณสมบัติของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดี [24], [25], [26] มีไว้เพื่อตรวจสอบว่าโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ออกแบบมีคุณภาพเพียงพอที่จะนำไปพัฒนาต่อหรือไม่ คุณสมบัติโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดีแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักคือ

1) ความปลอดภัย: คุณสมบัติความปลอดภัยในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการทำงานที่มีผู้ร่วมกระบวนการตั้งแต่ 2 ฝ่ายขึ้นไป โดยกระบวนการหนึ่งอินสแตนซ์จะมีผู้เข้าร่วมกระบวนการใช้อินสแตนซ์นั้นเพียงคนเดียวเท่านั้น สาเหตุที่ทำให้โมเดลบีพีเอ็มเอ็นไม่มีสมบัติความปลอดภัยเนื่องจากการออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไม่ข้อจำกัดในการใช้สัญลักษณเกตเวย์แบบขนานและเกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟเกตเวย์ซึ่งทำให้ทาสก์ในโมเดลเกิดการรอการทำงานที่ทำให้เกิดปัญหาติดตายตามมา
2) ความสมบูรณ์: ในกลุ่มคุณสมบัติความสมบูรณ์แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะตามพฤติกรรมการทำงานดังนี้
    (1) ทุกกระบวนการทำงาน เมื่อมีการทำงานเกิดขึ้นแล้วในที่สุดกระบวนการนั้นต้องสามารถจบการทำงานได้
    (2) หลังจากกระบวนการจบการทำงานแล้วจะไม่มีทาสก์ใดยังทำงานอยู่
    (3) ในโมเดลไม่ควรมีทาสก์ที่ไม่ถูกเอ็กซ์ซิคิว
3) ความสมบูรณ์แบบไม่เข้มงวด (Weak Soundness): คือคุณสมบัติความสมบูรณ์ที่อนุโลมพฤติกรรมการทำงานตามข้อ (2) โดยไม่จำเป็นที่ทุกกระบวนต้องจบกระบวนการทำงานได้ เพราะในบางกระบวนการที่มีการใช้เกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟหรือการใช้สัญลักษณ์การยกเลิกทรานแซกชันอาจทำให้ระบบมีสถานะอย่างไม่จำกัด การใช้สัญลักษณ์ดังกล่าวอาจทำให้ไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติความสมบูรณ์ได้

2.1.3. โมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นของอีคลิปส์ (Eclipse BPMN modeler) [27]

โมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นที่พัฒนาโดยอีคริปส์เป็นเครื่องมือที่รองรับการออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นตามมาตรฐานบีพีเอ็มเอ็น 2.0 ข้อมูลของโมเดลถูกเก็บในรูปแบบเอ็กซ์เอ็มแอล และเครื่องมือยังสามารถนำออกโมเดลทั้งในรูปแบบของกราฟิกได้ การตั้งค่าและการกำหนดคุณสมบัติให้กับแต่ละอ็อบเจกต์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นสามารถทำได้ดังนี้

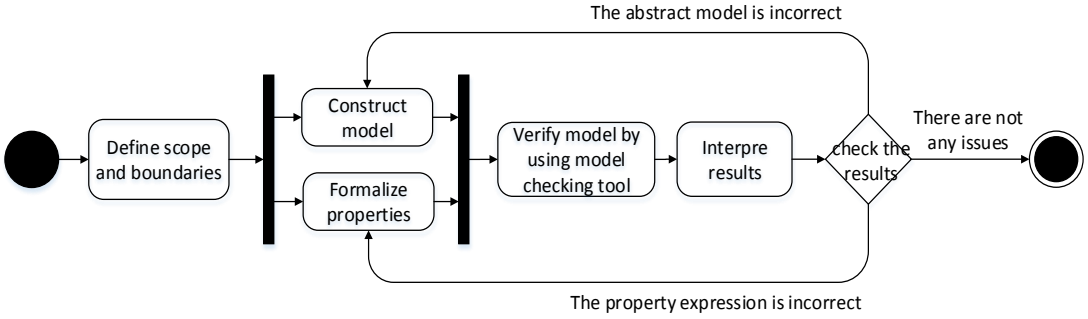
1) การกำหนดตัวแปรและคุณสมบัติให้กับโมเดล ประกอบด้วย
    - นิยามไอเท็ม (Item Definition) ใช้ในการกำหนดตัวแปรและชนิดตัวแปร
    - ข้อความ (Message) ใช้กำหนดคุณสมบัติให้กับข้อความโดยตัวแปรในข้อความมาจากนิยามไอเท็ม
    - คอลลาโบเรชัน Collaboration เป็นการกำหนดคุณสมบัติเกี่ยวกับพูลและผู้ข้าร่วม
2) การกำหนดคุณสมบัติให้กับทาสก์หรืออีเวนท์
    - ชื่อทาสก์ หรือชื่ออีเวนท์
    - ประเภทของทาสก์ เช่น ทาสก์เซอร์วิส ทาสก์ส่ง ทาสก์รับ เป็นต้น
    - โอเปอร์เรชันของทาสก์ที่อธิบายด้วยภาษาโปรแกรม เช่น ภาษาจาวา

- ลักษณะของลูป (Loop characteristics) ที่ประกอบด้วย 3 ลักษณะคือ ไม่มีลูป ลูปมาตรฐาน และแบบหลายอินสแตนซ์
- พารามิเตอร์ของทาสก์ ที่ประกอบด้วย
  (1) เซ็ตนำเข้า (Input set) เป็นเซ็ตของข้อมูลที่ทาสก์จะใช้ในการเอ็กซ์ซิคิว โดยที่เซ็ตข้อมูลอาจมาจากอ็อบเจกต์นำเข้าหรือตัวแปรที่ประกาศไว้ในไฟล์เอ็กซ์เอสดี
  (2) แม็ปปิงข้อมูลนำเข้า (Input data mapping)
  (3) เซ็ตนำออก (Output set)
  (4) แม็ปปิงข้อมูลนำออก (Output data mapping)

3) การกำหนดคุณสมบัติให้กับเกตเวย์และโฟลว์ลำดับ
   - ชื่อเกตเวย์
   - ประเภทเกตเวย์ที่ประกอบด้วย อินคลูซีฟ เอ็กซ์คลูซีฟ พาราเรล คอมเพล็กซ์ และอีเวนท์เบส
   - ทิศทางเกตเวย์ (Gateway direction) ที่ประกอบด้วย แบบไดเวอร์เจนท์หรือแบบคอนเวอร์เจนท์
   - รายการโฟลว์ลำดับและเงื่อนไข (Guard conditions) ที่อยู่บนโฟลว์ลำดับ
4) การกำหนดคุณสมบัติให้กับโฟลว์ข้อความ
   เป็นการกำหนดข้อความให้กับโฟลว์ข้อความ โดยที่ข้อความที่ใช้กับโฟลว์ข้อความมาจากข้อความที่ประกาศไว้ที่นิยามไอเท็ม

2.1.4. หลักการทวนสอบเชิงรูปนัยโดยวิธีโมเดลเช็คกิง

การทวนสอบเชิงรูปนัยโดยวิธีโมเดลเช็คกิงเป็นหนึ่งในวิธีของการตรวจสอบการทำงานของซอฟต์แวร์ที่อาศัยเครื่องมือตรวจสอบโมเดล (Model checking tools) [28], [29] เพื่อช่วยค้นหาความผิดพลาดของโมเดลหรือความผิดพลาดของซอฟต์แวร์ โดยส่วนมากจะใช้ทวนสอบโมเดลที่พฤติกรรมการทำงานแบบพร้องกันหรือระบบขนาน ขั้นตอนการทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิงมีขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 2-3 รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนอธิบายในหัวข้อ 1) ถึง 5)



รูปที่ 2-3 ขั้นตอนการทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง

1) กำหนดขอบเขตและคุณสมบัติที่ต้องการทวนสอบ

การทวนสอบแต่ละครั้งต้องกำหนดวัตถุประสงค์, ขอบเขต และคุณสมบัติที่ต้องการทวนสอบให้ชัดเจน เพราะสิ่งเหล่านี้มีผลต่อการเลือกเครื่องมือที่จะใช้ทวนสอบโมเดล โดยเครื่องมือที่เลือกใช้ต้องรองรับการทวนสอบคุณสมบัติที่ต้องการทวนสอบที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการทวนสอบคุณสมบัติของโมเดลซอฟต์แวร์ที่ออกแบบด้วยบีพีเอ็มเอ็น 2 กลุ่มคุณสมบัติคือ

(1) คุณสมบัติความปลอดภัย (Safe properties) [30]: นิยามของคุณสมบัติความปลอดภัยคือ “สิ่งร้ายๆ ต้องไม่เกิดขึ้น” ซึ่งหมายความว่าถ้าโมเดลขาดคุณสมบัติความปลอดภัยจะส่งผลต่อการทำงานหลักของระบบ เช่น ระบบไม่สามารถจบการทำงานได้ หรือระบบจบการทำงานแบบมีความผิดพลาด เช่นซอฟต์แวร์หยุดทำงาน หรือการทำงานของระบบไม่เป็นตามความต้องการ

(2) คุณสมบัติไลน์เนส (Liveness properties) [30]: นิยามของคุณสมบัติไลฟ์เนสคือ “สิ่งดีๆ จะเกิดขึ้นในที่สุด” หมายถึง ทุกส่วนของโมเดลที่ออกแบบจะต้องสามารถถูกเอ็กซ์ซิคิวได้ แต่ละทาสก์ในโมเดลต้องถูกทำงานอย่างน้อยหนึ่งครั้ง ถ้าในโมเดลมีทาสก์ที่ไม่ถูกทำงานจะเรียกทาสก์นั้นว่า (Unreachable Task) จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติไลน์เนสสัมพันธ์กับคุณสมบัติความสมบูรณ์ในหัวข้อ 2.1.2 วงเล็บ 2

2) การสร้างโมเดล (Model Construction)

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างโมเดลนามธรรม (Abstract model) เป็นการจำลองโมเดลจากข้อกำหนดความต้องการด้วยภาษารูปนัย ภาษาที่ใช้จำลองโมเดล เช่น Promela, Reo, Preti net หรือ CPN เป็นต้น หากสร้างโมเดลจากข้อกำหนดความต้องการที่อยู่ในรูปแบบภาษาธรรมชาติ (Natural languages) ผู้ที่สร้างโมเดลต้องมีความเชี่ยวชาญในภาษารูปนัยนั้นๆ แต่ถ้าสร้างโดยวิธีการแปลงมาจากโมเดลอื่นที่มีอยู่แล้วอาจใช้เครื่องมือและออกแบบกฎการแปลงอิลิเมนต์เพื่อแปลงโมเดลที่ออกแบบไว้ไปเป็นโมเดลตามโครงสร้างภาษารูปนัย หลังจากนั้นนำโมเดลนามธรรมที่ได้ไปทวนสอบด้วยเครื่องมือทวนสอบโมเดล

3) การเขียนคุณสมบัติรูปนัย(Formalizing Properties)

การทวนสอบด้วยวิธีโมเดลเช็คกิงแบบวิเคราะห์ปริภูมิสถานะจำเป็นต้องเขียนคุณสมบัติที่ต้องการทวนสอบให้อยู่ในรูปแบบตรรกศาสตร์เวลาเพื่อค้นหาพฤติกรรมของโมเดลจากปริภูมิสถานะ คำค้นที่สร้างขึ้นอาจเป็นคำค้นหาคุณสมบัติที่พึงประสงค์ (Desirable Properties) หรืออาจเป็นนิเสธของคุณสมบัติที่พึงประสงค์ก็ได้ คำค้นต้องเขียนให้อยู่ในรูปแบบของตรรกศาสตร์เวลา (Temporal Logic) [30] เช่น ตรรกศาสตร์เวลาแบบเชิงเส้น (Linear Temporal Logic : LTL) หรือตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนา (Computation Tree Logic : CTL) โดยทั่วไปเครื่องมือทวนสอบจะแปลงคำค้นที่ยู่ในรูปแบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ของตรรกศาสตร์เวลาให้เป็นออโตมาตาและเปรียบเทียบออโตมาตากับปริภูมิสถานะ ในบางเครื่องมือมีคำสั่งเชิงฟังก์ชันเพื่อช่วยให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น องค์ประกอบของการเขียนคำค้นคุณสมบัติด้วยตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนามีดังนี้

ตัวบ่งปริมาณ (Quantifier)

E : There exists an execution หมายถึง บางส่วนของช่วงเวลาที่ดำเนินการ

A : For all executions หมายถึง ตลอดช่วงเวลาที่ดำเนินการ

ตัวบ่งเวลา (Time) ใช้บ่งบอกจุดการเกิดของเหตุการณ์หรือสถานะ

N : Next หมายถึง เหตุการณ์นั้นจะเกิดขึ้นในเวลาถัดไปหนึ่งหน่วยเวลา

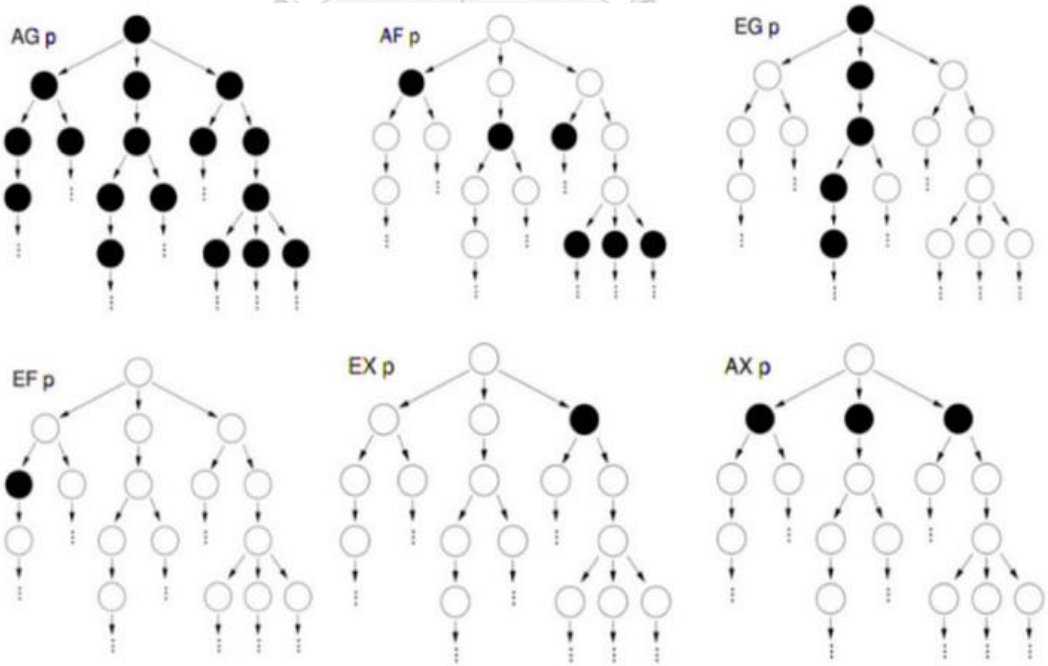
F : Finally หมายถึง ท้ายที่สุดแล้วต้องมีเหตุการณ์นั้นเกิดขึ้น

G : Globally หมายถึง เหตุการณ์นั้นต้องเกิดขึ้นและเป็นจริงเสมอ

U : Until หมายถึง การเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งต้องต่อเนื่อง

R : Release หมายถึง การเปลี่ยนสถานะโดยที่อีกสถานะยังคงเกิดขึ้นอยู่

รูปที่ 2-4 แสดงแผนภาพตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนาที่อยู่บนปริภูมิสถานะ โดยที่วงกลมสีดำแทนค่าสถานะที่ ณ ขณะนั้นประพจน์ p มีค่าเป็นจริงและวงกลมโปร่งแสงแสดงถึงสถานะที่ประพจน์ p มีค่าเป็นเท็จ ตัวอย่างคำสั่ง EF p หมายถึง เป็นไปได้ที่จะมีสถานะ p เกิดขึ้น เมื่อระบบค้นปริภูมิสถานะถึงแม้จะพบเพียงสถานะเดียวก็สามารถได้ว่าปริภูมิสถานะนั้นไปไปตามคำค้น EF p



รูปที่ 2-4 ตัวอย่างแผนภาพคุณสมบัติที่อยู่ในปริภูมิสถานะ [30]

การเขียนคุณสมบัติด้วยตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนานั้นสามารถแบ่งแบบรูปของคุณสมบัติ (Property patterns) [31] ออกเป็น 4 แบบรูปดังนี้

(1) แบบรูปเชิงสมภพหรือเชิงยกเว้น (Occurrence /Exclusion pattern)

แบบรูปนี้แสดงถึงการเกิดขึ้นของสถานะ หรือแสดงถึงนิเสธของสถานะ ใช้ในการติดตาม (Observe) การเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นของสถานะหนึ่งๆ เมื่อ $\emptyset$ คือประพจน์หรือสถานะที่ต้องการติดตาม เมื่อเขียนอยู่ในรูปแบบของตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนาจะมีแบบรูปดังนี้

$EF(\emptyset)$: หมายถึง เป็นไปได้ที่สถานะ $\emptyset$ จะเกิดขึ้นในที่สุด

$\neg EF(\emptyset)$: หมายถึง เป็นไปไม่ได้ที่สถานะ $\emptyset$ จะเกิดขึ้น

(2) แบบรูปเชิงผลลัพธ์ (Consequence pattern)

แบบรูปเชิงผลลัพธ์เป็นแบบรูปที่ใช้อธิบายการเกิดขึ้นของสถานะ 2 สถานะที่มีความสัมพันธ์กัน ใช้สำหรับอธิบายว่าถ้าสถานะแรกเกิดขึ้น หลังจากนั้น “เป็นไปได้ที่จะเกิด” หรือ “จำเป็นต้องเกิด”สถานะที่สองตามมา ถ้าระบุการเกิดขึ้นของสถานะที่สองเป็นแบบ “จำเป็นต้องเกิด” เรียกการอธิบายคุณสมบัติในลักษณะนี้ว่าความสัมพันธ์เชิงเหตุ (Causal relation) เมื่อเขียนอยู่ในรูปแบบของตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนาจะมีแบบรูปดังนี้

$EX(\emptyset)$: หมายถึงจากสถานะปัจจุบัน เป็นไปได้ที่จะเกิดสถานะ $\emptyset$ เป็นสถานะถัดไป

$AX(\emptyset)$: หมายถึงจากสถานะปัจจุบัน จำเป็นต้องเกิดสถานะ $\emptyset$ เป็นสถานะถัดไปเสมอ

$AG(\emptyset \Rightarrow \mathrm{EF}(\psi))$: หมายถึงถ้าสถานะแรก $\emptyset$ เกิดขึ้นแล้วเป็นไปได้ที่จะเกิดสถานะ ψ ตามมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(3) แบบรูปเชิงลำดับ (Sequential pattern)

แบบรูปเชิงลำดับใช้อธิบายคุณสมบัติความสัมพันธ์เชิงลำดับ (Ordering relation) ของเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ มีแบบรูปใกล้เคียงกับแบบรูปเชิงสัมพันธ์ แตกต่างที่การเกิดขึ้นของเหตุการณ์ที่สองไม่ปรากฏสัญลักษณ์เชิงสัมพันธ์ เมื่อเขียนอยู่ในรูปแบบของตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนาจะมีรูปแบบตามตัวอย่างดังนี้

$EF(\emptyset \wedge \mathrm{EF}(\psi))$ หมายถึง เมื่อสถานะแรก $\emptyset$ มาถึงและเป็นไปได้ที่จะเกิดสถานะ ψ ด้วยในบางครั้ง

$E(\emptyset\ U\ \psi)$ หมายถึง เมื่อสถานะแรก $\emptyset$ มาถึงและจะเกิดเหตุสถานะ ψ ด้วยเสมอ

$E(\emptyset\ R\ \psi)$ หมายถึง การเกิดขึ้นของสถานะที่สอง ψ เกิดขึ้นระหว่างที่สถานะแรก $\emptyset$ ยังคงเกิดขึ้นอยู่

(4) แบบรูปยืนยง (Invariant pattern)

แบบรูปยืนยงใช้อธิบายคุณสมบัติที่ระบบต้องคงสถานะนั้นเสมอ เป็นแบบรูปที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติความปลอดภัย ซึ่งแบบรูปยืนยงจะตรงกันข้ามกับแบบรูปเชิงสมภพหรือเชิงยกเว้น เมื่อเขียนคุณสมบัติให้อยู่ในรูปแบบของตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนาจะมีรูปแบบดังนี้

$EG(\emptyset)$: หมายถึง เมื่อสถานะ $\emptyset$ สามารถเป็นจริงได้และเป็นจริงตลอดไป

$AG(\emptyset)$: หมายถึง เมื่อสถานะ $\emptyset$ ต้องเป็นจริงเสมอ

4) ทวนสอบโมเดลด้วยเครื่องมือ

เครื่องมือทวนสอบโมเดลจะสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลนามธรรมและผู้ใช้งานค้นหาพฤติกรรมในปริภูมิสถานะนั้นๆ เครื่องมือจะแจ้งผลตามคำค้นที่ผู้ใช้งานระบุว่าโมเดลนั้นมีพฤติกรรมตรงตามคำค้นหรือไม่ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือ

(1) โหมดการจำลอง: เครื่องมือจะจำลองการทำงานของโมเดลให้เห็นขั้นตอนการเปลี่ยนสถานะของแต่ละสถานะ ที่แสดงให้เห็นค่าตัวแปรของแต่ละตัวแปร ณ ขณะนั้น โดยเครื่องมือจะสร้างและเก็บข้อมูลการเปลี่ยนสถานะภายใต้เงื่อนไขบางประการเช่น จำลองสถานะเพียงหนึ่งพันสถานะเท่านั้น ข้อมูลลำดับการเปลี่ยนสถานะนั้นที่เรียกว่าเทรซของการเอ็กซ์ซิคิว (Execution traces) [32] มีไว้เพื่อให้ผู้ใช้งานตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะของแต่ละสถานะได้

(2) โหมดการทวนสอบ: เครื่องมือจะสร้างลำดับการเปลี่ยนสถานะที่เรียกว่าปริภูมิสถานะโดยคำนวณสถานะจากทุกกรณีที่เป็นไปได้ การทวนสอบเป็นการค้นหาสถานะในปริภูมิสถานะตามคำค้นที่ผู้ใช้งานระบุ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเขียนคำค้นให้อยู่ในรูปแบบตรรกศาสตร์เวลาเพื่อค้นหาเทรซของการเอ็กซ์ซิคิวที่มีลำดับการเปลี่ยนสถานะตรงตามคำค้น แล้วเครื่องมือจะค้นหาสถานะในปริภูมิสถานะตามคำค้นพร้อมทั้งรายงานผลการค้นหาว่าโมเดลนั้นมีคุณสมบัติตามคำค้นนั้นหรือไม่ อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการทวนสอบโมเดลอาจเกิดปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะถ้าโมเดลนั้นมีขนาดใหญ่ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะอาจใช้วิธีแบ่งโมเดลออกเป็นส่วนย่อยๆ หรือลดรายละเอียดบางอย่างโมเดลลงเพื่อให้จำนวนสถานะอยู่ในระดับที่เครื่องมือรองรับได้ หรือใช้เทคนิคการปรับแต่งโมเดลนามธรรมให้เหมาะสมก่อนนำโมเดลไปสร้างปริภูมิสถานะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) การแปรผลการทวนสอบ (Results Interpretation)

เครื่องมือจะแสดงผลการทวนสอบหลังจากค้นหาคุณสมบัติตามคำค้นที่ระบุ ผู้ใช้งานต้องแปลผลการทวนสอบเพิ่มเติมว่าผลการทวนสอบที่เครื่องมือรายงานนั้นถูกต้องหรือไม่ ผลการทวนสอบแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ

(1) โมเดลที่ทวนสอบไม่มีคุณสมบัติตามคำค้น ผู้ใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาผลการทวนสอบลักษณะนี้อีกครั้ง เพราะสาเหตุที่ทำให้โมเดลไม่มีคุณสมบัติตรงตามคำค้นอาจเกิดจากโมเดลนามธรรมไม่ถูกต้อง หรืออาจเขียนคำค้นไม่ถูกต้อง

(2) โมเดลที่ทวนสอบมีคุณสมบัติตามคำค้น

2.1.5. คัลเลอร์เพทริเน็ต (Colored Petri)

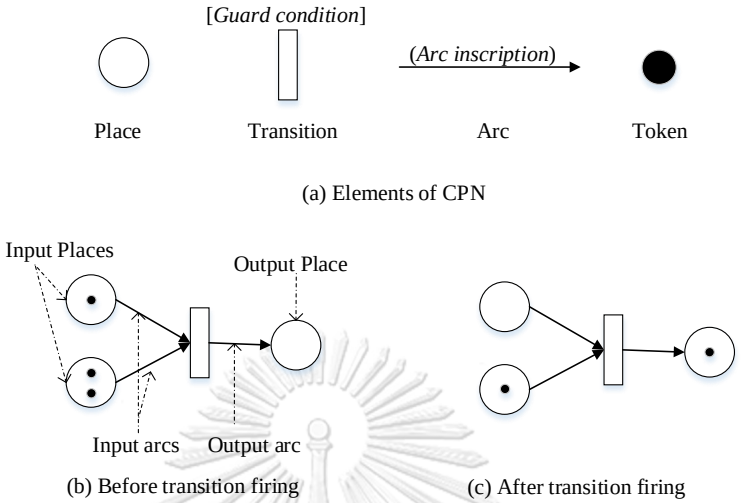
เพทริเน็ตเป็นที่รู้จักกันในชื่อเพลสทรานซิชันเน็ต (Place/Transition net) หรือพีทีเน็ต (PT net) [33] เป็นภาษาที่ใช้ในการออกแบบระบบกระจาย (Distributed system) ระบบการทำงานแบบพ้องกัน (Concurrent system) หรือระบบขนาน (Parallel system) เพทริเน็ตถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1960 โดย คาร์ล อาดัม เพทริ (Carl Adam Petri) ส่วนประกอบและคุณลักษณะของเพทริเนตมีดังนี้

1) ส่วนประกอบของคัลเลอร์เพทริเนต

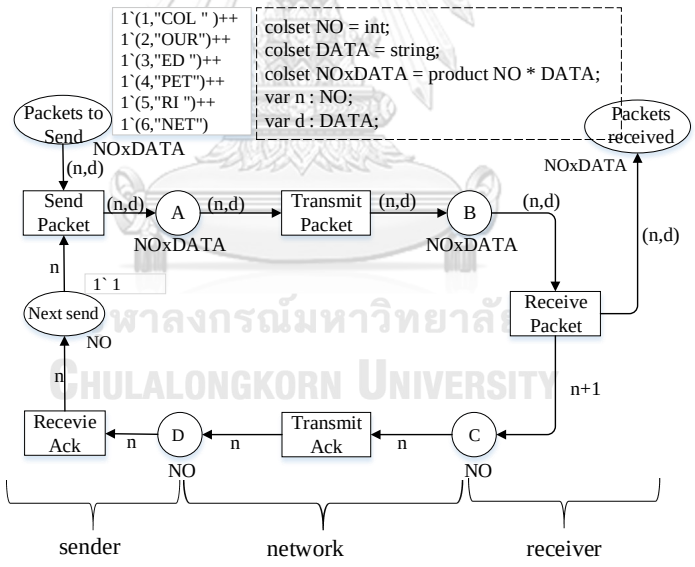
เพทริประกอบด้วยเพลส (Place) ทรานซิชัน (Transition) อาร์ก (Arc) และโทเค็น (Token) เพลสถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลม ทรานซิชันถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมและโทเค็นถูกแสดงด้วยสัญลักษณ์จุด โดยที่เพลสและทรานซิชันเชื่อมถึงกันด้วยอาร์ก เพลสแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เพลสนำเข้า (Input places) และเพลสนำออก (Output places) โดยเพลสนำเข้าจะมีอาร์กเชื่อมไปยังทรานซิชัน ส่วนเพลสนำออกจะมีอาร์กเชื่อมจากทรานซิชันไปยังเพลสนำออก เพลสสามารถบรรจุโทเค็นได้มากกว่า 1 โทเค็น และทรานซิชันจะถูกเปิด (Enable) เมื่อมีจำนวนโทเค็นในเพลสนำเข้าครบตามเงื่อนไขกำหนด การกระจายของโทเค็นถูกดำเนินการโดยทรานซิชันที่เรียกว่าการยิงโทเค็นของทรานซิชัน (Transition firing) ซึ่งการยิงโทเค็นของทรานซิชันแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะ (State change) ของระบบ รูปที่ 2-5(a) แสดงส่วนประกอบของเพทริเน็ต รูปที่ 2-5 (b) แสดงเหตุการณ์ก่อนการยิงโทเค็นของทรานซิชัน และรูปที่ 2-5(c) แสดงเหตุการณ์หลังการยิงโทเค็นของทรานซิชัน

คัลเลอร์เพทริเน็ตเป็นเพทริเน็ตระดับสูงบางครั้งเรียกว่าซีพีเน็ต (CP-Nets) หรือซีพีเอ็น (CPN) ซึ่งซีพีเอ็นถูกขยายขีดความสามารถมาจากเพทริเน็ตแบบดั้งเดิมให้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น โดยเพิ่มคุณสมบัติที่เรียกว่าคัลเลอร์เซ็ต (Colored set) เพื่อใช้เป็นตัวจัดการการกำหนดค่าข้อมูลและชนิดข้อมูลให้กับโทเค็น กำหนดอ็อบเจกต์ข้อมูล ข้อมูลที่เกี่ยวกับเวลา, ชนิดของเพลสและเงื่อนไขข้อบังคับให้กับทรานซิชันได้ การกำหนดข้อมูลและเงื่อนไขเหล่านี้อาศัยภาษาโปรแกรม (Programing language) ช่วยอธิบายเงื่อนไขการทำงานบนทรานซิชัน

หรืออาร์กที่เรียกว่าอินสคริปชัน (Inscription) เช่น CPN tools ใช้ภาษาซีพีเอ็นเอ็มแอล (CPN ML) ในการอธิบายอินสคริปชัน ตัวอย่างโมเดลที่ออกแบบด้วยซีพีเอ็นแสดงตามรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-5 ส่วนประกอบเพทริเน็ตและการยิงโทเค็นของทรานซิชัน [34]

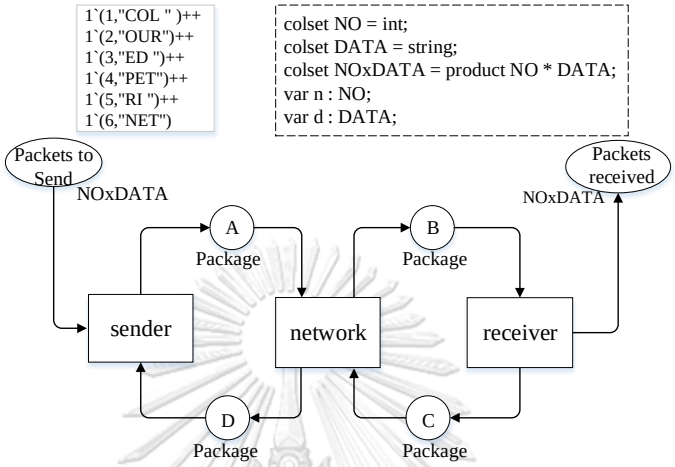


รูปที่ 2-6 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็น [34]

2) โมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้น

ในกรณีที่โมเดลซีพีเอ็นมีขนาดใหญ่หรือโมเดลมีความซับซ้อน การอธิบายโมเดลให้อยู่ในโครงสร้างแบบลำดับชั้นจะช่วยลดความซับซ้อนและขนาดของปริภูมิสถานะของระบบได้เนื่องจากรายละเอียดของโมเดลบางส่วนจะถูกซ่อนไว้ โดยส่วนที่ซ่อนไว้อาจจะกำหนดให้มีพฤติกรรมการทำงานแบบกล่องดำ (Black box) ตัวอย่างของการจัดโครงสร้างโมเดลให้อยู่ในโครงสร้างแบบลำดับ

ชั้นแสดงดังรูปที่ 2-7 ซึ่งเป็นโมเดลซีพีเอ็นที่ลดรูปมาจากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 2-6, จากรูปแสดงให้เห็นการส่งข้อมูลจากผู้รับไปยังผู้ส่งโดยอาศัยเครือข่ายเป็นสื่อกลาง ในโมเดลอธิบายเพียงชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลนำออกโดยที่ไม่ได้แสดงรายละเอียดกระบวนการการทำงานภายในของผู้ส่งและผู้รับข้อมูล



รูปที่ 2-7 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น [34]

รูปที่ 2-7 แสดงโครงสร้างของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 2-6 ในระดับบนสุด จะเห็นได้ว่าโมเดลถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย Sender, Network และ Receiver เมื่อนำทั้ง 3 ส่วนมาจัดโครงสร้างแบบลำดับชั้นแต่ละส่วนจะถูกลดรูปให้เทียบเท่ากับ 1 ทรานซิชัน ซึ่งเรียกทรานซิชันที่ซ่อนรายละเอียดว่า “ทรานซิชันทดแทน” (Substitute transitions) และเรียกรายละเอียดของโมเดลซีพีเอ็นที่ซ่อนไว้ภายในทรานซิชันว่าสับเน็ต (Sub-net) เนื่องจากโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้นสามารถซ่อนรายละเอียดที่ไม่สนใจได้, จึงทำให้ขนาดของปริภูมิสถานะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลที่ไม่ได้จัดโครงสร้างแบบลำดับชั้น การจัดโมเดลแบบลำดับชั้นยังรองรับวิธีทวนสอบแบบบนลงล่าง (Top down) และล่างขึ้นบน (Bottom up) อีกด้วย

3) ปริภูมิสถานะ

ปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นถูกสร้างจากตัวสร้างปริภูมิสถานะ (State space generator) ในบางครั้งเรียกปริภูมิสถานะว่ากราฟที่เข้าถึง (Reachable graph) แต่ละสถานะที่อยู่ในปริภูมิสถานะเกิดจากการยิงโทเค็นของทรานซิชัน รายละเอียดของสถานะ (State information) ประกอบด้วยค่าโทเค็นคัลเลอร์ที่ทรานซิชันรับจากเพลสนำเข้า, ชื่อของทรานซิชัน และค่าคัลเลอร์เซ็ตที่ได้จากการยิงโทเค็น ข้อมูลเหล่านี้เรียกว่าไบล์ดิงอิลีเมนต์ (Binding elements) ข้อมูลสถานะของหนึ่งสถานะอาจเกิดจากการยิงโทเค็นของหนึ่งทรานซิชันที่เรียกว่าซิงเกิลอิลีเมนต์ (Single binding element) หรืออาจเกิดจากการยิงโทเค็นพร้อมๆ กันของทรานซิชันมากกว่า 1 ทรานซิชันที่เรียกว่ามัลติไบล์ดิงอิลีเมนต์ (Multi binding elements) ซึ่งมัลติไบล์ดิงอิลีเมนต์คือเหตุการณ์การทำงานแบบขนานของระบบที่เกี่ยวข้องกับการทวนสอบที่อิงเวลา

อีกส่วนที่เกี่ยวข้องกับปริภูมิสถานะคือการค้นปริภูมิสถานะ โดยการค้นปริภูมิสถานะจะใช้ภาษาเฉพาะในการค้นว่าโมเดลที่กำลังทวนสอบมีพฤติกรรมถูกต้องตรงตามต้องการหรือไม่ ภาษาที่ใช้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างและทวนสอบ โดยทั่วไปคำค้นปริภูมิสถานะจะเกี่ยวข้องกับตรรกศาสตร์เชิงเวลาและโครงสร้างข้อมูลของปริภูมิสถานะ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือทวนสอบในช่วงหลังได้ถูกพัฒนาให้ใช้งานได้สะดวกง่ายขึ้น โดยผู้ใช้สามารถสร้างคำค้นจากคำสั่งเชิงฟังก์ชันที่เครื่องมือมีให้แทนการสร้างคำค้นด้วยสัญลักษณ์ตรรกศาสตร์เชิงเวลาที่ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจโครงสร้างและการเขียนตรรกศาสตร์

2.2. ทบทวนวรรณกรรม

ในระยะ 10 ปีที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่เสนอเทคนิคการสร้างและทวนสอบโมเดลที่อยู่ในรูปแบบแผนภาพกระบวนการ ซึ่งแบ่งการทวนสอบเป็น 2 ลักษณะคือ การทวนสอบเชิงโครงสร้างและการทวนสอบเชิงพฤติกรรม ในแต่ละงานวิจัยมีความแตกต่างกันในวิธีการสร้างโมเดลนามธรรม ภาษารูปนัย, เครื่องมือที่นำมาใช้ การทบทวนวรรณกรรมเน้นงานวิจัยที่สร้างโมเดลนามธรรมจากโมเดลบีพีเอ็มหรือบีเพลเท่านั้น และเน้นงานวิจัยที่ใช้เพทริเนตหรือซีพีเอ็นเป็นหลัก

มีหลายงานวิจัยที่ทำการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นโดยเสนอวิธีการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและเสนอเทคนิคการทวนสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ปริภูมิสถานะ แต่ละงานวิจัยใช้เทคนิคการสร้างโมเดลนามธรรมที่แตกต่างกัน งานวิจัยของอุยหยางและคณะ [35] และงานของอับบราฮิมและคณะ [36] ได้เสนอวิธีแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นที่รองรับมาตรฐานบีพีเอ็มเอ็น 2.0 โดยใช้ภาษารูปนัยซีพีเอ็น ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องมือสกัดอิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็นและแปลงไปเป็นโมเดลซีพีเอ็น หลังจากได้โมเดลซีพีเอ็นแล้วผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือซีพีเอ็นในการทวนสอบปัญหาการติดตายและหาจุดที่ไม่พึงประสงค์ที่อยู่ในโมเดลซีพีเอ็น กฎการแปลงโมเดลที่ผู้วิจัยได้เสนอได้เน้นการทวนสอบคอนโทรลโฟลว์ของโมเดลแต่ผู้วิจัยไม่ได้เน้นด้านดาตาโฟลว์และไม่ได้จัดการโมเดลที่มีความซับซ้อน ถึงแม้ว่างานของอับบราฮิมได้พิจาณาข้อมูลที่อยู่บนคอนโทรลโฟลว์แต่กฎการแปลงไม่ได้จัดการข้อมูลจริงของทาสก์ รามาร์เด็นและคณะ [37] เสนอการทวนสอบที่เน้นพฤติกรรมการทำงานที่เกี่ยวกับลูป, กระบวนการย่อยและทรานแซกชัน ผู้วิจัยเสนอเทคนิคการใช้เพลสของซีพีเอ็นแสดงคุณสมบัติของทาสก์ของบีพีเอ็มเอ็น แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้อธิบายรายละเอียดในการจัดการคัลเลอร์เซ็ต และผู้วิจัยไม่ได้พัฒนาเครื่องมือช่วยในการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

การใช้เพทริเน็ตแบบดั้งเดิมเป็นหนึ่งในวิธีที่ใกล้เคียงกับการใช้ซีพีเอ็น ดิชซ์แมนท์และคณะ [14] เสนอการใช้เพทริเน็ตในการแสดงโมเดลนามธรรม โดยผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องมือแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นให้เป็นโมเดลเพทริเน็ตที่เก็บอยู่ในภาษาเฉพาะของเพทริเน็ตที่เรียกว่า ภาษาเพทริเน็ตมาร์คอัพ (Petri net markup language) งานวิจัยนี้จัดการการทวนสอบโมเดลพื้นฐานของบีพีเอ็มเอ็นและได้จัดการความซับซ้อนของโมเดลย่อยบีพีเอ็มเอ็น มัลติอินสแตนซ์ และความขึ้นต่อกันของทาสก์ แต่งานวิจัยไม่ได้เน้นการทวนสอบมุมมองของดาตาโฟลว์ เค็นโดว์ลนาและคณะ [10] ใช้ภาษา

รูปนัยที่มีชื่อว่า อีแคทเน็ต (ECATNets) และได้นิยามเมตาโมเดลในการแปลงอิลีเมนต์ของบีพีเอ็นเอ็นเป็นเพทริเน็ต, อีกทั้งได้พัฒนาเครื่องมือช่วยในการแปลงโมเดลด้วย การแปลงโมเดลครอบคลุมดาตาโฟลว์ คอนโทรลโฟลว์ มัลติอินสแตนซ์ และการจัดการข้อผิดพลาดของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ในขั้นตอนการทวนสอบผู้วิจัยใช้เครื่องมือมัวร์เดอร์ (Maude model checker) ในการทวนสอบคุณสมบัติซาว์ดเนส (soundness properties) ถึงแม้ว่างานวิจัยได้พิจารณาความขึ้นต่อกันของทาสก์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแต่ผู้วิจัยไม่ได้จัดการข้อมูลจริงที่ผ่านทาสก์ ราช์ดิชและคณะ [38] เสนออัลกอริทึมในการตรวจสอบคุณสมบัติการเข้าถึง (Reachability properties) โดยใช้ไทม์เพทริเน็ต (Time petri net: TPN) แต่ผู้วิจัยไม่ได้จัดการมุมมองของดาตาโฟลว์ ในทำนองเดียวกัน แสตรกซ์เบิร์กและคณะ [39] และงานวิจัยของ ออร์จจิโรและคณะ [40] ได้เสนอการตรวจจับข้อผิดพลาดในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้เพทริเนตแบบรูปแอนติ (Anti patterns) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจหาข้อผิดพลาด และผู้วิจัยได้เสนอกฎการแปลงโมเดลและเทคนิคในการทวนสอบโดยวีการวิเคราะห์ปริภูมิสถานะโดยใช้เครื่องมือโลลา (LoLA) สองงานวิจัยนี้เน้นการตรวจสอบปัญหาเกียวกับดาตาโฟลว์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น แต่การแสดงโมเดลของงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาข้อมูลจริงที่ไหลผ่านโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

มีอีกกลุ่มงานวิจัยที่ใช้วิธีการและเครื่องมือที่ใกล้เคียงกับการใช้เพทริเน็ตเพื่อทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น เช่นการใช้ออร์โตมาตา (Automata) [41], ไพแคลคูลัส (Pi calculus) [42] และโพรเซสอัลจิบรา (process algebra) [43] เกอร์ดาเมนต์และคณะ [41] เสนอวิธีการตรวจสอบการเข้ากันได้ (Interperability checking) สำหรับโมเดลบีพีเอ็มเอ็น การแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลรูปนัยใช้ภาษายูพีพีเอเอแอล (UPPAAL language) ที่เป็นภาษาไทม์ออร์โตมาตาชนิดหนึ่ง และผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือยูพีพีเอเอแอล (UPPAAL model checker) ทวนสอบคุณสมบัติของโมเดล งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ขนาดของปริภูมิสถานะที่ใหญ่มากจนไม่สามารถจัดการได้ เทคนิคการตรวจสอบต้องทำหลายขั้นตอน รวมทั้งการเขียนคุณสมบัติในขั้นตอนการทวนสอบไม่เหมาะสม โบล์เซ็ตทัวร์ [42] เสนอโมเดลตัวกลางที่ใช้ในการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลรูปนัยที่อธิบายด้วยภาษาไพแคลคูลัส แต่งานวิจัยนี้ไม่ได้แสดงรายละเอียดการแปลงโมเดลโดยแสดงเพียงตัวอย่างง่ายๆ เท่านั้น มัลลิการ์และคณะ [43] เสนอการใช้เทคนิคการตรวจสอบความสมมูล (Equivalance checking) โดยแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลรูปนัยที่อธิบายด้วยโพรเซสอัลจิบราและใช้เฟรมเวิร์คเวอร์เชอร์ (VerChor framework) [44] ทวนสอบพฤติกรรมของโมเดล

โมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีสามารถนำไปสร้างเป็นโครงร่าง (Skeleton) ของกระบวนการบีเพลได้ งานวิจัย [45] จึงได้เสนอวิธีการวิเคราะห์โมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีโดยอาศัยแผนภาพยูเอ็มแอล เพื่อตรวจสอบตรวจสอบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างผู้วิจัยใช้เทคนิคการแปลงโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีไปเป็นแผนภาพคอมโพเนนท์ (Component diagram) และเพื่อทวนสอบคุณสมบัติเชิงพฤติกรรมผู้วิจัยใช้เทคนิคการแปลงโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีไปเป็นแผนภาพลำดับ (Sequence diagram) แล้วแปลงเป็นแผนภาพเครื่องจักรสถานะ (State machine diagram) และแปลงเป็นภาษา SVM ตามลำดับ งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการแปลงอิลีเมนต์หลายขั้นตอน แต่ผู้วิจัยไม่ได้อธิบาย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายละเอียดในแต่ละขั้นตอน งานวิจัย [46] เสนอวิธีการทวนสอบโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีที่ออกแบบด้วยภาษาดับเบิลยูเอสซีดีแอล โดยแปลงโมเดลไปเป็นแอพพลิเคชันที่พัฒนาด้วยภาษาจาวา ซึ่งแอพพลิเคชันสามารถดำเนินการได้ ผู้วิจัยตรวจสอบพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์จากผลของการดำเนินการแอพพลิเคชัน แต่ผู้วิจัยไม่ได้อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการทวนสอบและเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบพฤติกรรม อย่างไรก็ตาม ภาษาดับเบิลยูเอสซีดีแอลไม่สามารถอธิบายบางพฤติกรรมของเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีได้ งานวิจัย [47] จึงได้เปรียบเทียบ 3 ภาษาที่ใช้ในการออกแบบโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟี ได้แก่ ภาษา Let's Dance, WS-CDL และ WSCI ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่า ภาษา Let's Dance เป็นภาษาที่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของเว็บเซอร์วิสแบบคอรีโอกราฟีได้ครอบคลุมกว่าอีกสองภาษาที่กล่าวมา

ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับโมเดลบีพีเอ็มเอ็นคือโมเดลที่อธิบายด้วยภาษาบีเพล สัญลักษณ์ที่ใช้มีความใกล้เคียงกัน และมีหลายงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการทวนสอบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโมเดลที่ออกแบบด้วยบีพีเอ็มเอ็นและโมเดลที่ออกแบบด้วยบีเพล การออกแบบบีพเพลมีหลายภาษาที่สามารถใช้ออกแบบโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีได้ อาทิ ภาษา Let's Dance, ดับเบิลยูเอสซีดีแอล ดับเบิลยูเอสซีไอ หรือบีพีเอ็มเอ็น แต่เทคนิคการทวนสอบโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีจะคล้ายกันคือการแปลงอิลีเมนต์ของภาษาที่ใช้ออกแบบไปเป็นโมเดลที่อธิบายด้วยภาษาเฉพาะ (Specific Languages) งานวิจัย [48] แปลงโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีที่ออกแบบด้วยภาษาดับเบิลยูเอสซีดีแอลไปเป็นโมเดลเอฟเอสพี (Finite State Process: FSP) งานวิจัย [49], [50], [51], [52] แปลงเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีเป็นเพทริเน็ตและแปลงไปเป็นอีเวนท์บี (Event B) งานวิจัย [53] แปลงไปเป็นทาร์มออโตมาตา และ งานวิจัย [54] แปลงเป็นโปรเมลา (Promela) หลังจากนั้นใช้เครื่องมือทวนสอบที่รองรับภาษาโมเดลนั้นๆ มาทวนสอบโมเดลด้วย SPIN โดยงานวิจัยเน้นทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัย งานวิจัย [55] แปลงโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีไปเป็นคัลเลอร์เพทริเน็ตคล้ายกับงานวิจัย [15] แต่แตกต่างกันในส่วนของโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีที่ทวนสอบซึ่งเป็นโมเดลที่ออกแบบด้วยภาษาดับเบิลยูเอสซีไอ สำหรับโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีที่ออกแบบด้วยภาษาบีพีเอ็มเอ็น มีงานวิจัย เสนอการแปลงโมเดลที่ออกแบบด้วยภาษาบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลภาษาโปรเมลา และงานวิจัย [56] แปลงโมเดลไปเป็นโมเดลเพทริเน็ต แล้วนำโมเดลที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเครื่องมือทวนสอบโมเดล จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทวนสอบโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีพบว่า วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยคือ เพื่อตรวจสอบหาข้อผิดพลาดของโมเดลที่จะเกิดขึ้นกับคอนโทรลโฟลว์ และโพรโทคอลที่ก่อให้เกิดปัญหาติดตาย

สำหรับการทวนสอบโมเดลเว็บเซอร์วิสออเคสเตรชัน งานวิจัยส่วนใหญ่เสนอการทวนสอบโมเดลที่อยู่ในรูปแบบกระบวนการบีเพล งานวิจัย [57] เสนอวิธีการทวนสอบโมเดลโดยเน้นในส่วนของคอนโทรลโฟลว์ที่อยู่ในกระบวนการบีเพล เพื่อตรวจสอบหากิจกรรมที่ไม่ถูกดำเนินการ (Unreachable activities) หาส่วนก่อให้เกิดข้อความที่ขัดแย้งกัน (Conflicting messages) ตรวจสอบความต้องกัน และตรวจหาส่วนที่ก่อให้เกิดปัญหาติดตาย โดยวิธีการทวนสอบใช้เทคนิคการ

แปลงอิลีเมนต์ของบีเพลไปเป็นโมเดลเพทริเน็ต และใช้เครื่องมือดับเบิลยูออฟบีเพล (WofBPEL) ทวนสอบพฤติกรรมของโมเดลเพทริเน็ตที่ได้ งานวิจัย [58] ได้เสนอวิธีในการทวนสอบความต้องกันของโมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟีที่ออกแบบด้วยบีเพล งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการแปลงอิลีเมนต์ของบีเพลไปเป็นโครงสร้างเพทริเน็ตโดยใช้ทฤษฎีของงานวิจัยที่ [57] การทวนสอบอาศัยข้อมูลบันทึกเหตุการณ์ข้อความ (Message log) ของปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเว็บเซอร์วิส จากนั้นแปลงบันทึกเหตุการณ์ข้อความให้อยู่ในรูปแบบเอ็มเอ็กซ์เอ็มแอล (MXML log format) และนำไฟล์ที่ได้ไปใช้กับเครื่องมือ ProM เพื่อทวนสอบความต้องกัน ทั้งนี้งานวิจัยได้เสนอวิธีการวัดค่าความพอดี (Fitness value) และค่าความเหมาะสม (Appropriateness) ถ้าหากพบว่าการทำงานจริงของกระบวนการบีเพลไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้โมเดลเว็บเซอร์วิสคอรีโอกราฟี ระบบจะแสดงร่องรอยของการดำเนินการ (Execution traces) และแสดงชื่อโหนด (Node) ของบีเพลที่มีปัญหา

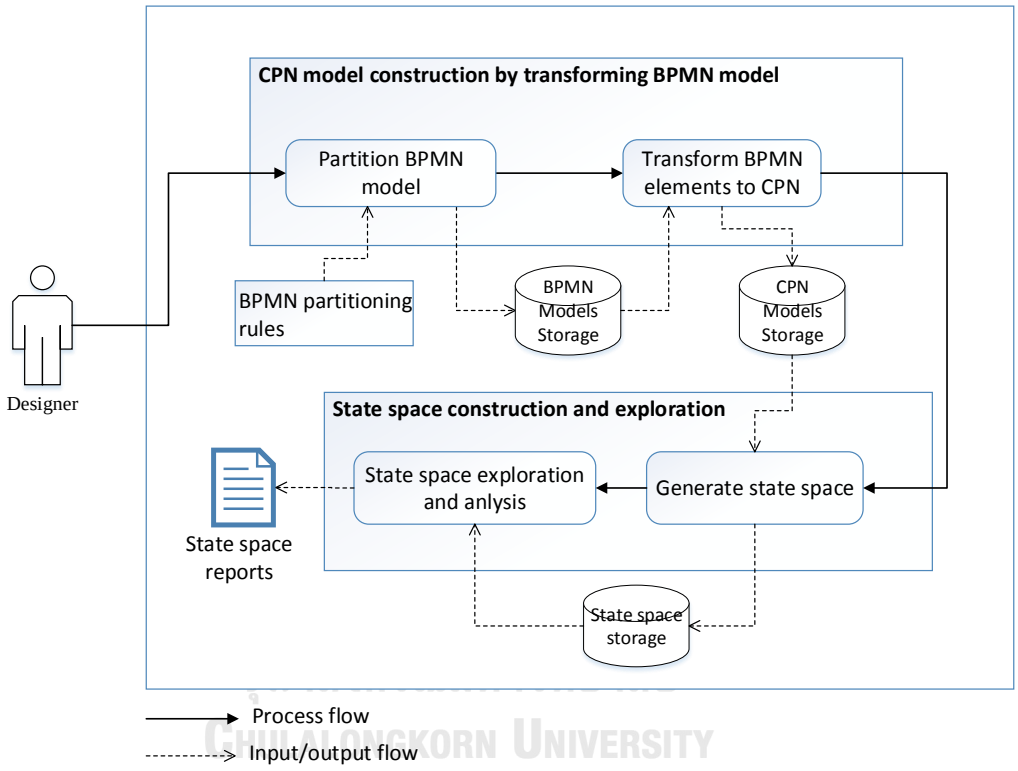
งานวิจัย [59] ผู้วิจัยจึงได้เสนอการแปลงอิลีเมนต์ของกระบวนการบีเพลไปเป็นโมเดลซีพีเอ็น ซึ่งเป็นภาษาที่รองรับการอธิบายเงื่อนไขข้อบังคับของเว็บเซอร์วิสได้ละเอียดกว่าเพทริเน็ตแบบเดิม งานวิจัย [60] ได้เสนอวิธีในการทวนสอบกระบวนการบีเพล ได้นิยามกฎการแปลงอิลีเมนต์ของกระบวนการบีเพลไปเป็นโครงสร้างซีพีเอ็น เพื่อตรวจสอบหาข้อผิดพลาดที่ก่อให้เกิดการติดตายและกิจกรรมของบีเพลที่ไม่ถูกดำเนินการ ในกรณีที่กระบวนการบีเพลมีปฏิสัมพันธ์กับเว็บเซอร์วิสภายนอกทำให้ไม่ทราบพฤติกรรมของเว็บเซอร์วิสนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการสร้างสตับเซอร์วิส (Service stub) ที่จำลองพฤติกรรมการทำงานของเว็บเซอร์วิส ในการสร้างสตับเซอร์วิส ผู้วิจัยใช้ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกที่ระบุไว้ในไฟล์วิสเดิล และใช้เทคนิคการแบ่งชั้นสมมูล (Equivalence class partitioning technique) เพื่อแบ่งช่วงข้อมูลแล้วนำช่วงข้อมูลนั้นไปจำลองพฤติกรรมของเว็บเซอร์วิส ผู้วิจัยได้อธิบายการใช้ภาษาเอ็มแอลในการกำหนดเงื่อนไขข้อบังคับของเว็บเซอร์วิสโดยเงื่อนไขข้อบังคับถูกพัฒนาอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันและฟังก์ชันถูกนำไปใช้ในส่วนของอาร์กนำเข้าของโมเดลซีพีเอ็น นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่ใช้ภาษาอื่นทวนสอบกระบวนการบีเพลอีก เช่น งานวิจัย [61], [62], [63] เสนอการแปลงไปเป็นโมเดลออโตมาตาแบบจำกัด (Finite automata) และแปลงต่อไปเป็นโมเดลภาษาโปรเมลา และใช้เครื่องมือ SPIN เพื่อทวนสอบหาพฤติกรรมที่ก่อให้เกิดการติดตาย

จากการศึกษางานวิจัยพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เสนอแนวคิดในสร้างโมเดลนามธรรมของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและเว็บเซอร์วิสออเคสเตรชันที่ไม่ได้สนใจพฤติกรรมการทำงานของโมเดลที่เกี่ยวของกับการไหลของข้อมูลในโมเดล งานวิจัยส่วนมากเสนอวิธีการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลนามธรรมแต่ไม่ได้จัดการปัญหาในขั้นตอนการทวนสอบโมเดลหลังจากที่ได้โมเดลนามธรรมแล้ว เช่น ปัญหาที่มีโมเดลขนาดใหญ่ที่ส่งผลให้เกิดการะบเบิดของปริภูมิสถานะ และบางงานวิจัยมีขั้นตอนการทวนสอบที่ยุ่งยากและซับซ้อนที่ไม่สะดวกต่อการใช้งาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
การสร้างโมเดลซีพีเอ็นจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

แนวคิดของงานวิจัยนี้เริ่มจากขั้นตอนการสร้างโมเดลซีพีเอ็นด้วยการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และหลังจากนั้นเป็นขั้นตอนการสร้างปริภูมิสถานะและค้นปริภูมิสถานะ ภาพรวมของงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3-1 โดยรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างโมเดลซีพีเอ็นจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นอธิบายในบทที่ 3 และรายละเอียดของการสร้างและค้นปริภูมิสถานะอธิบายในบทที่ 4



รูปที่ 3-1 ภาพรวมของการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีโมเดลเช็คกิง

บทที่ 3 อธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนการสร้างโมเดลซีพีเอ็นด้วยวิธีการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น วัตถุประสงค์ของการสร้างโมเดลซีพีเอ็นคือเพื่อนำโมเดลซีพีเอ็นที่ได้ไปสร้างปริภูมิสถานะและทวนสอบสอบคุณสมบัติ นิยามที่เกี่ยวข้องกับการแปลงโมเดลที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสองโมเดลอธิบายในหัวข้อ 3.1 และรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนและองค์ประกอบของโมเดลซีพีเอ็นอธิบายในหัวข้อ 3.2 ถึง 3.4 ตามลำดับ

3.1. นิยามที่เกี่ยวข้องกับการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น

นิยามที่เกี่ยวข้องกับการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็นที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิลีเมนต์ของทั้งสองโมเดลมีดังนี้

3.1.1. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นทั่วไป

โพรเซสบีพีเอ็มเอ็นทั่วไป (Ordinary BPMN process) ประกอบด้วยทูเปิล O= (N, A, fAT, ES, EE, EI, fET, ID, DI, DO, DA, GW, fGT, fGD, F, fGL) เมื่อ

N เซ็ตจำกัดของโหนด

A เซ็ตของทาสก์ โดยที่ A ⊆ N สำหรับ $a_i \in$ A โดยที่ a_i = (TName, TOper) เมื่อ

a_i.TName ชื่อของทาสก์ที่อธิบายด้วยข้อความ

a_i.TOper โอเปอร์เรชันของทาสก์ที่อธิบายลอจิกด้วยภาษาจาวา

fAT ฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ประเภทของทาสก์ fAT: A ⟶ {task, service, send, receive, user, manual, business rule, script}

ES เซ็ตของอีเวนท์เริ่มต้น, ES ⊆N

EE เซ็ตของอีเวนท์สิ้นสุด, EE ⊆N.

EI เซ็ตของอินเทอร์มิเดียทอีเวนท์, EI ⊆ N.

fET ฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ประเภทของอินเทอร์มิเดียทอีเวนท์, fET: EI ⟶ {catch, throw}

ID เซ็ตของนิยามไอเท็ม (Item definitions)

DI เซ็ตของข้อมูลนำเข้าของทาสก์

DO เซ็ตของข้อมูลนำออกของทาสก์

DA เซ็ตของแอสโซซิเอชันดาตา (Data associations), DA ⊆ (DI x A ∪ A x DO)

GW เซ็ตของเกตเวย์, GW ⊆ N.

fGT ฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ประเภทของเกตเวย์, fGT: GW ⟶{exclusive, inclusive, parallel, event-based}.

fGD ฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ประเภทของไดเร็คชันของเกตเวย์ (Gateway diection), fGD: GW ⟶ {divergent, convergent}.

F เซ็ตของโฟลว์ลำดับ, F ⊆ N x N

fGL เป็นฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้เงื่อนไขของเกตเวย์, fGL: (GW x N) ⟶ เงื่อนไขของเกตเวย์

3.1.2. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบลำดับชั้น

โพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบลำดับชั้น (Hierarchical BPMN process) ประกอบด้วย $\mathcal{H}$= ($\mathcal{SO}$, fNS), เมื่อ

$\mathcal{SO}$ คือเซ็ตของโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นทั่วไป

fNS คือฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ว่าโพรเซสนั้นเป็นโพรเซสย่อยของทาสก์ใด, fNs: $A \longrightarrow \mathcal{SO}$

หรือสรุปได้ว่า โพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบลำดับชั้น $\mathcal{H}$ เป็นโพรเซสของบีพีเอ็มเอ็นชนิดพิเศษของ $\mathcal{O}$ โดยที่ $a_i \in A$ ดังนั้น fNS(a_i)= o_i เมื่อ $o_i \in \mathcal{SO}$

3.1.3. นิยามโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน

โพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน (Collaboration BPMN process) $\mathcal{C}$= ($\mathcal{Q}$, PL, fPM, MG, fVI, MF, fMF) เมื่อ

$\mathcal{Q}$ คือเซ็ตของโพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบลำดับชั้น

PL คือเซ็ตของพูล

fPM เป็นฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้โพรเซสนั้นอยู่ภายใต้พูลใด, fPM: $\mathcal{Q} \longrightarrow$ PL.

MG คือเซ็ตของข้อความ

fVI เป็นฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ตัวแปรที่อยู่ภายในข้อความ ข้อมูลนำเข้า หรือข้อมูลนำออก

fVI: {MG, DI, DO}$\longrightarrow 2^{ID}$

MF คือเซ็ตของโฟลว์ข้อความ, MF $\subseteq$ (a_i, a_j) สำหรับ a_i, a_j $\in$ (A $\cup$ EI) and (q_i, q_j $\in \mathcal{Q}$) โดยที่ (fPM(q_i)$\neq$fPM(q_j)) $\wedge$ (fAT(a_i) $\in$ {*send*} $\vee$ fET(a_i) $\in$ {*throw*}) $\wedge$ (fAT(a_j) $\in$ {*receive*} $\vee$ fET(a_j) $\in$ {catch})

fMF คือฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ข้อความที่แนบอยู่กับโฟลว์ข้อความ, fMF: MF $\longrightarrow$ MG

3.1.4. นิยามพาร์ทในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

พาร์ทในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น (Path in a BPMN design model), เมื่อให้โมเดลบีพีเอ็มเอ็น BPMN= ($\mathcal{Q}$, PL, fPM, MG, fVI, MF, fMF) โพรเซสบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน พาร์ทการเอ็กซ์ซิคิวจากโหนด n(1) ถึง n(i) ถูกแสดงด้วย n(1)... n(i) จึงเทียบเท่ากับลำดับของอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็น n(1), n(2), ถึงอิลีเมนต์ n(i) โดยที่ n(x) $\in$ N ดังนั้น 0< x < i, (n(x), n(x+1)) $\in$ F

การบ่งชี้โหนดแม่ (Ancestor nodes) หรือโหนดลูก (Succor nodes) ใช้ฟังก์ชันเป็นตัวบ่งชี้ anc(n), suc(n) ตามลำดับโดยที่ฟังก์ชันให้ผลลัพธ์ N $\longrightarrow$ 2^N โดยโหนดที่ใช้ส่งเข้าฟังก์ชันนี้ต้องเป็นสมาชิกของ N เท่านั้น

anc(n) = {m $\in$ N | (m, n) $\in$ F} และ suc(n) = {o $\in$ N | (n, o) $\in$ F}. $\exists$n $\in$ A $\cup$ EI.

การบ่งชี้ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของทาสก์จะเรียกใช้ด้วยฟังก์ชัน inset(n)= {s $\in$ (DI $\cup$ ID $\cup$ MG)} เพื่อแสดงรายการข้อมูลนำเข้าของทาสก์ และเรียกใช้ฟังก์ชัน outset(n)={s $\in$ (DO $\cup$ ID $\cup$ MG)} เพื่อแสดงรายการข้อมูลนำออกของทาสก์ ผลลัพธ์ของฟังก์ชันขึ้นอยู่กับชนิดของโหนดที่ n ดังนี้

1) ในกรณีที่ n ไม่ใช่เกตเวย์การเรียกใช้ฟังก์ชัน inset(n)={s $\in$ (DI $\cup$ ID $\cup$ MG)|$\exists$(s, n) $\in$ DA $\vee$ (s =fMF(x, n) | fAT(x) $\in$ {send, receive} $\vee$ fET(x) $\in$ {throw, catch} $\wedge$ (x, n)

∈ MF)} และ outset(n)={s ∈ (DO ∪ ID ∪ MG) | ∃(n, s) ∈ DA ∨ (s =fMF(x, n) | fAT(x) ∈ {send, receive}∨ fET(x) ∈ {throw, catch} ∧ (x, n) ∈ MF)}

2) ในกรณีที่ n เป็นเกตเวย์ inset(n)={s ∈ outset(anc(n)) |(s, anc(n)) ∈ DA ∧ anc(n) ∉ GW} และ outset(n)={s ∈ outset (anc(n)) |(s, anc(n)) ∈ DA ∧ anc(n) ∉ GW}

สำหรับการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อยจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันในการบ่งชี้คู่ของเกตเวย์ โดยใช้ฟังชัน pair(n)= {ℊ ∈ GW | fGT(n) = fGT(ℊ) ∧ fGD(n) ≠ fGD(ℊ)}

3.1.5. นิยามโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในรูปแบบที่ดี

โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในรูปแบบที่ดี (well-formed BPMN model) คือ ให้ BG = (V, E, L, lb) คือ โมเดลบีพีเอ็มเอ็น โดยที่ V= A ∪ G ∪ E_{start}, E_{end}
BP เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในรูปแบบที่ดีก็ต่อเมื่อ

1) อีเวนท์เริ่มต้นต้องไม่มีเส้นเข้าและเส้นออกได้มากสุด 1 เส้น
2) อีเวนท์สิ้นสุดต้องไม่มีเส้นออกและเส้นเข้าได้มากสุด 1 เส้น
3) ทาสก์และอีเวนท์มีเส้นเข้าและเส้นออกได้อย่างละ 1 เส้น
4) เกตเวย์แบบไดเวอร์เจนท์มีเส้นเข้าเกตเวย์ได้ 1 เส้นและออกจากเกตเวย์มากกว่า 1 เส้น
5) เกตเวย์แบบคอนเวอร์เจนท์มีเส้นเข้าเกตเวย์มากกว่า 1 เส้นและออกจากเกตเวย์ 1 เส้น
6) อีเวนท์เริ่มต้นจำเป็นต้องมีพาร์ทไปยังอีเวนท์สิ้นสุด
7) ทาสก์มีเส้นเข้าและเส้นออกอย่างละ 1 เส้น

3.1.6. นิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น

โมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น (Non-hierarchical CPN Model)โมเดลซีพีเอ็น ประกอบด้วย 9 ทูเปิล CPN = (P, T, A, Σ, V, C, G, E, I) เมื่อ

P เซ็ตของเพลส
T เซ็ตของทรานซิชัน
A เซ็ตของอาร์กที่ประกอบด้วยอาร์กนำเข้าและอาร์กนำออก (A ⊆ (P x T) ∪ (T x P))
Σ เซ็ตของคัลเลอร์เซ็ต
V เซ็ตของตัวแปรโดยที่ชนิดของตัวแปรอ้างถึงคัลเลอร์เซ็ต (Type[v] ∈ Σ)
C ชนิดของเพลสโดยแต่ละเพลสมีฟังก์ชันสำหรับกำหนดคัลเลอร์เซ็ตของเพลส (P → Σ)
G การ์ดที่ถูกกำหนดให้แต่ละทรานซิชันที่ผลลัพธ์ของการประเมินการ์ดมีค่าเป็นบูลีน (T → EXP)

E อินสคริปชันของอาร์ก คือฟังก์ชันที่กำหนดอินสคริปชันให้กับอาร์ก A ⟶ EXP โดยที่ประเภทของตัวแปรที่อยู่บนอินสคริปชันของอาร์กจะต้องสัมพันธ์กับชนิดของเพลสที่อาร์กนั้นๆ เชื่อมถึง (Type[E(a)] = C(p)MS)

I มาร์คกิงเริ่มต้น (Initial marking) P ⟶ EXPR0 เป็นฟังก์ชันที่กำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นให้กับแต่ละเพลส โดยที่มาร์คกิงเริ่มต้นต้องมีชนิดตัวแปรสัมพันธ์กับคัลเลอร์เซ็ตของเพลสนั้นๆ (Type[I(p)] = C(p)MS) ถึงคุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับมาร์คกิงอื่นๆ ที่นอกเหนือจากมาร์คกิงเริ่มต้นด้วย

3.1.7. นิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น

โมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น (Hierarchical CPN Model) ให้ CPNM = (CPN, Tsub, Pport, PT, fTsub) เมื่อ

CPN คือเซ็ตของโมเดลของซีพีเอ็นหรือสับเน็ต (โมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น)

Tsub ⊆ T คือเซ็ตของทรานซิชันทดแทน

Pport ⊆ P คือเซ็ตของเพลสพอร์ท (Port places)

PT: คือฟังก์ชันบ่งชี้ชนิดของพอร์ท (Port type) ให้กับแต่ละเพลส, Pport ⟶ {IN, OUT, I/O}

fTsub คือฟังก์ชันที่ใช้บ่งชี้ว่าทรานซิชันนั้นเป็นทรานซิชันของสับเน็ตใด, fNs: t⟶CPN

3.1.8. นิยามกราฟการเข้าถึง

กราฟการเข้าถึง (Reachability graph) [64], [65] ให้ DRG = (MN, EG, fFI) เมื่อ

MN คือเซ็ตของโหนดที่แสดงถึงสถานะ 1 สถานะของระบบ

EG คือเซ็ตของเส้นเชื่อมระหว่างโหนด MN โดยที่ (MN ∩ EG) =∅

fFI คือฟังก์ชันที่ใช้ในการระบุข้อมูลการยิงโทเค็นของทรานซิชัน fFI : (MN, EG) ⟶ Binding element

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1.9. ทฤษฎีการทวนสอบแบบลำดับชั้น

การทวนสอบแบบลำดับชั้น (Hierarchical verification theorem) ให้โมเดลซีพีเอ็นประกอบด้วยสับเน็ต M:= {*s*1, ..., *sm*-1, *sm*(1) , ..., *sm*(*i*) , *sm*+1, ..., *sn*} โมเดล M สอดคล้องกับโมเดล Mx ก็ต่อเมื่อ {*sm*(1),..., *sm*(*i*)} สอดคล้องกับสับเน็ต *sm* และสับเน็ต {*s*1,..., *sm*-1, *sm*, *sm*+1, ..., *sn*} สอดคล้องกับ Mx

เนื่องจากในโมเดลซีพีเอ็น 1 โมเดลอาจประกอบด้วยสับเน็ตย่อยภายในได้หลายสับเน็ต เช่น โมเดล M1 ประกอบด้วยสับเน็ต S1, S2 และ S3 ซึ่งแต่ละสับเน็ตอาจจะประกอบด้วยสับเน็ตย่อยได้อีกเช่น s1-1, s1-2 และ s1-3 เป็นสับเน็ตย่อยของ S1 ในการทวนสอบแบบลำดับชั้นพฤติกรรมของสับเน็ตย่อย s1-1, s1-2 และ s1-3 ต้องสอดคล้องกับโมเดลย่อย S1 และเมื่อรวมสับเน็ต S1, S2 และ

S3 เข้าด้วยกัน พฤติกรรมของโมเดล M1 ต้องสอดคล้องกับพฤติกรรมของโมเดลที่ทวนสอบแบบไม่มีลำดับชั้น

3.1.10. คัลเลอร์เซ็ตที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็น

คัลเลอร์เซ็ตได้จากชนิดของตัวแปรที่สกัดได้จากนิยามไอเท็มที่ประกาศไว้ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และในไฟล์เอ็กซ์เอสดี ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตที่ได้จากโมเดลบีพีเอ็มแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตที่ได้จากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

กลุ่มชนิดตัวแปร	**ตัวอย่างชนิดตัวแปร**	**ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตที่ได้**
ตัวแปรอย่างง่าย	int, double, char, string, boolean	INT, DOU, CHA, STR, BOO
ตัวแปรเชิงซ้อน	StudenInfo(name:string, age: int)	STR, INT, STUDENINFO(STR, INT)

ตัวแปรที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็นประกอบด้วยตัวแปร 2 ประเภทคือ

1) ตัวแปรโลคอล (Local variables)
   เป็นตัวแปรที่ใช้ส่งผ่านข้อมูลระหว่างเพลสและทรานซิชัน ตัวแปรโลคอลได้จากนิยามไอเท็มที่กำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าหรือข้อมูลนำออกให้กับแต่ละทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ในกรณีที่เป็นตัวแปรเชิงซ้อนแต่ละตัวแปรที่อยู่ภายใต้ตัวแปรเชิงซ้อนจะถูกสกัด แจกแจง และถูกสร้างสร้างเป็นตัวแปรอย่างง่ายในโมเดลซีพีเอ็นด้วย
2) ตัวแปรโกลบอล (Global variables)
   เป็นตัวแปรที่ใช้เก็บค่าข้อมูลกลางของโมเดลซีพีเอ็น โดยตัวแปรโกลบอลสามารถนำไปสร้างเงื่อนไขให้กับทรานซิชัน และตัวแปรโกลบอลสามารถถูกเขียนหรือถูกอ่านโดยนำไปใช้ในการกำหนดเงื่อนไขบนทรานซิชัน หรือใช้ในการกำหนดอินสคริปชันของอาร์กนำออกของทรานซิชันได้ ตัวแปรโกลบอลไม่สามารถสร้างได้โดยอัตโนมัติเนื่องจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไม่สามารถกำหนดตัวแปรโกลบอลให้กับโมเดลได้ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องสร้างตัวแปรโกลบอลมาใช้เองเพื่อช่วยให้โมเดลซีพีเอ็นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3.2. การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย

การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้โมเดลมีขนาดเหมาะสมและเพื่อช่วยลดความซับซ้อนของโมเดลและลดขนาดของปริภูมิสถานะ โมเดลย่อยที่ได้ยังสนันสนุนการจัดโครงสร้างโมเดลแบบลำดับชั้น ข้อมูลนำเข้าของกระบวนการแบ่งโมเดลคือไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ออกแบบด้วยเครื่องมือโมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นของอีคลิปส์ ไฟล์ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วย

1) ไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่เก็บข้อมูลหลักของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

2) ไฟล์เอ็กซ์เอสดีที่เก็บข้อมูลเกี่ยวตัวแปรที่ใช้ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่เรียกว่านิยามไอเท็ม

ทุกอิลีเมนต์ที่อยู่ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่จะถูกสกัด (Extract) และเก็บคุณสมบัติของแต่ละอิลีเมนต์ไว้เพื่อใช้ในขั้นตอนการแบ่งโมเดลและขั้นตอนการแปลงโมเดล รายการคุณสมบัติที่จัดเก็บแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 รายการคุณสมบัติของอิลีเมนต์ที่สกัดจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

ชื่อ	**คำอธิบาย**
ElementID	รหัสของอิลีเมนต์
ElementName	ชื่อของอิลีเมนต์
NoteType	ประเภทของอิลีเมนต์ เช่น ทาสก์ เกตเวย์
NoteSubType	ประเภทย่อยของอิลีเมนต์ เช่น Exclusive, Service Task
InputObjects	ออฟเจ็กต์นำเข้า
OutObjects	ออฟเจ็กต์นำออก
OperationExpression	โอเปอร์เรชันที่ถูกระบุไว้ในอิลีเมนต์นั้น
PredecessorsID	รหัสของอิลีเมนต์ก่อนหน้า
SuccessorsID	รหัสของอิลีเมนต์ถัดไป

คุณสมบัติและความสัมพันธ์ระหว่างอิลีเมนต์ถูกเก็บไว้ในโครงสร้างข้อมูลของกราฟแบบมีทิศทาง(Directed graph) โดยที่ 1 อิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็นเท่ากับ 1 โหนดของกราฟ การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นออกเป็นโมเดลย่อยที่เรียกว่าพาร์ทิชันของบีพีเอ็มเอ็น (BPMN partitions)

การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อยของงานวิจัยนี้ใช้ 2 วิธีร่วมกันคือ การแบ่งโมเดลขั้นต้นด้วยการพิจารณาคู่ของเกตเวย์และการพิจารณาค่าน้ำหนัก การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยวิธีการพิจารณาคู่ของเกตเวย์จะได้พาร์ทิชันที่มีแบบรูปของโฟลว์ (Flow patterns) ในลักษณะที่เป็นบล็อก (Block) ที่ทำให้เมื่อแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นแล้วได้โมเดลซีพีเอ็นมีจำนวนพอร์ทเพลสนำเข้าและพอร์ทเพลสนำออกที่น้อยกว่าการแบ่งโมเดลด้วยวิธีอื่น อีกทั้งจะไม่เกิดปัญหาโมเดลซีพีเอ็นขาดหายหรือมีส่วนหนึ่งส่วนใดของโมเดลที่ไม่เชื่อมต่อถึงกัน อย่างไรก็ตาม การแบ่งโมเดลด้วยวิธีการพิจารณาคู่ของเกตเวย์อาจได้พาร์ทิชันที่มีขนาดเล็กเกินหรือใหญ่เกินไป จึงได้มีการประยุกต์ใช้การพิจารณาค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้ประสานพาร์ทิชันที่มีขนาดเล็กเข้าด้วยกัน หรือทำการแบ่งย่อยพาร์ทิชันที่มีขนาดใหญ่อีกครั้ง อัลกอริทึมที่ใช้แบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นพาร์ทิชันแสดงในอัลกอริทึมที่ 3.1 รายละเอียดของแต่ละวิธีอธิบายในหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2. ตามลำดับ

อัลกอริทึมที่ 3.1 การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นพาร์ทิชัน

Algorithm 3.1: Partitioning BPNM model into BPMN partitions

```
01 Require: BPMN design model is an ordinary, hierarchical or collaboration diagram.
02 Ensure: well-defined BPMN design model.
03  if BPMN design model is without pool then set PL: =1 End If
04     If PL > 0 then
05                    For sw1 ∈ PL
06                      SG:= lb(n) → Es
07                     Do SG ≠ ∅
08                          n: = choose the node from SG by FIFO ordering
09                     If n is gateway then
10                     If n does not a pairwise of previous node then
11                        set par_id = increase partition number
12                        lb_n = {n, par_id}
13                   Else
14                    lb_n = {n, par_id}
15                    set par_id = increase partition number
16                End if
17                Else if n is a function node then lb_n = {n, par_id}
18                Else n is a sub process
19                  set par_id = create new partition number
20                  Partitioning(n)
21                End if
22                SG: = SG ∪ {choose node(s) from SG where source node =n}
23                    if SG: = SG | {n}
24                HBP: = HBP ∪ lb_n
25              End do
26          Next
27        End if
28        While HBP: par_id /*Check the size of sub-models */
29        BEGIN
30                    Sub_modelSize =CalculateSizeBasedWeight(par_id)
31                    If Sub_modelSize > SizeConfig then
32                      Repartition the sub-model by recursive function
33                      HBP: = (HBP | par_id) ∪ re-partition(par_id)
34                    Else
35                       Merge the sub-partitions with neighborhood partitions if their total weight
36                       does not exceed SizeConfig.
37                        HBP: = (HBP | par_id) ∪ mergePartition(par_id, neighborhood(par_id))
38                    End If
39        End while
40        Return HBP
```

คำอธิบายอัลกอริทึม 3.1 มีดังนี้

บรรทัดที่

01 ตรวจสอบชนิดโมเดล โดยโมเดลที่จะใช้กับอัลกอลิทึมนี้ต้องเป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบทั่วไปหรือโมเดลแบบคอลาโบเรชันเท่านั้น

02 ตรวจสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นนำเข้า ต้องเป็นโมเดลที่มีคุณสมบัติตามนิยามรูปแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดีตามนิยาม 3.1.5

03 ถ้าโมเดลบีพีเอ็มเอ็นมีประเภทโมเดลเป็นแบบทั่วไปจะกำหนดให้จำนวนพูลเท่ากับ 1

05 วนลูปตามจำนวนของพูลของโมเดล

06 ประกาศแสตก SG เพื่อเก็บโหนดที่เป็นอิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็น อิลีเมนต์จะถูกจัดเก็บเป็นลำดับเพื่อที่จะใช้ลำดับนั้นๆ ไปพิจารณาการจับคู่เกตเวย์ โดยโหนดแรกที่นำเข้าแสตกคือโหนดอีเวนท์เริ่มต้น

07 วนลูปเพื่ออ่านโหนดที่อยู่ในสแตกจนกระทั่งไม่มีโหนดในสแตก

08 ประกาศตัวแปร n เพื่อเก็บข้อมูลโหนดที่เลือกจากสแตก SG

09 ตรวจสอบโหนดที่เลือกว่าเป็นโหนดเกตเวย์หรือไม่

10-12 ถ้าโหนดที่เลือกเป็นเกตเวย์แต่ไม่สามารถจับคู่กับโหนดเกตเวย์ที่อยู่ก่อนหน้า ให้เพิ่มค่าเลขอ้างอิงพาร์ทิชัน (par_id: ใช้สำหรับระบุหมายเลขให้กับแต่ละพาร์ทิชัน) และกำหนดให้โหนดนั้นๆ มีป้ายกำกับแบบคู่อันดับ (n, par_id)

13-16 ถ้าโหนดที่เลือกเป็นเกตเวย์และสามารถจับคู่กับเกตเวย์ก่อนหน้าได้ จะไม่มีการสร้างพาร์ทิชันย่อยใหม่ จะให้โหนดนั้นจัดอยู่ในพาร์ทิชันก่อนหน้า และเพิ่มเลขอ้างอิงพาร์ทิชันเพื่อที่จะนำไปใช้กับพาร์ทิชันถัดไป

17 ถ้าโหนดที่พิจารณาเป็นโหนดฟังก์ชันให้ติดป้ายด้วยเลขอ้างอิงพาร์ทิชัน

18 ถ้าโหนดที่กำลังพิจารณาเป็นกระบวนการย่อยจะเรียกอัลกอริทึมซ้ำอีกครั้ง

22 อ่านโหนดถัดไปที่มีโหนดแม่เป็นโหนดที่กำลังพิจารณาเข้าสแตก

23 ลบโหนดที่กำลังพิจารณาแล้วออกจากสแตก

24 ตัวแปร HBP เป็นตัวแปรที่เก็บข้อมูลการแบ่งพาร์ทิชันของแต่ละอิลีเมนต์ โหนดที่ถูกติดป้ายกำกับด้วยเลขอ้างอิงพาร์ทิชันแล้วจะถูกเก็บเข้าตัวแปร HBP

30-32 คำนวณค่าน้ำหนักของพาร์ทิชันที่แบ่งในขั้นแรกว่ามีขนาดเกินใหญ่เกินค่านำหนักรวมต่อพาร์ทิชันที่กำหนดไว้หรือไม่ หากค่าน้ำหนักรวมเกินค่าที่กำหนด พาร์ทิชันนั้นจะถูกแบ่งย่อยอีกครั้ง

34-37 กรณีค่าน้ำหนักของพาร์ทิชันเล็กกว่าค่าที่กำหนด พาร์ทิชันนั้นจะถูกพิจารณาว่าสามารถรวมกับพาร์ทิชันที่อยู่ติดกันได้หรือไม่

3.2.1. การแบ่งโมเดลขั้นต้นด้วยวิธีพิจารณาคู่เกตเวย์

จากนิยาม 3.4 พาร์ทในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น, แต่ละโหนดที่อยู่ในพาร์ทจะถูกพิจารณาจากประเภทของโหนดโดยประเภทของโหนดในกราฟแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

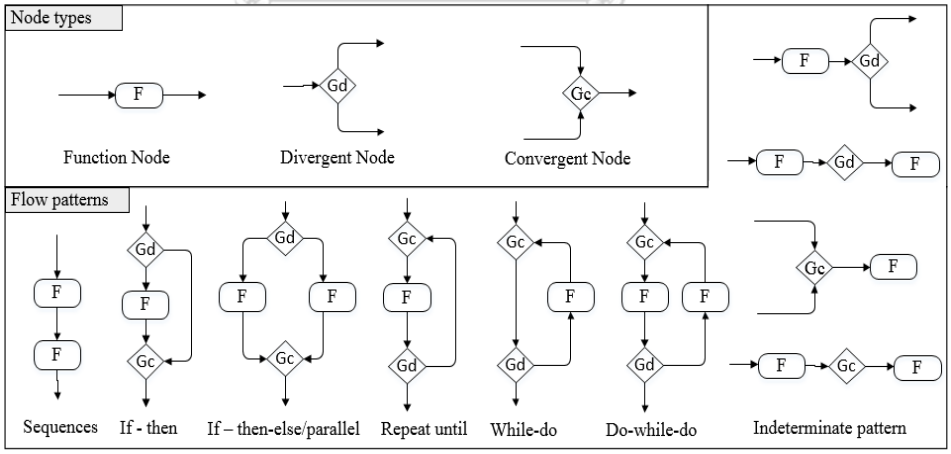
1) โหนดฟังก์ชัน (Function node) คือ โหนดที่แสดงกิจกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการเช่น ทาสก์ อีเวนท์ หรือกระบวนย่อย (Sub process)
2) โหนดแยก (Divergent node) คือ โหนดที่เป็นเกตเวย์ที่แสดงการแตกกระบวนการ
3) โหนดประสาน (Convergent node) คือ โหนดที่เป็นเกตเวย์ที่แสดงการประสารกระบวนการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การแบ่งโมเดลด้วยวิธีการพิจารณาคู่เกตเวย์เป็นการประยุกต์ใช้หลักการแบ่งกระบวนการ (Process decomposition) [66] แต่ละโหนดในกราฟถูกอ่านและถูกวิเคราะห์ตามประเภทของโหนด โดยอิงตามแบบรูปของโฟลว์ คู่ของโหนดที่เป็นโหนดแยกและโหนดประสานจะถูกค้นหาและจับคู่เพื่อให้ได้พาร์ทิชันที่เป็นบล็อกและโหนดที่อยู่ระหว่างคู่ของเกตเวย์จะถือว่าอยู่ในพาร์ทิชันเดียวกัน เงื่อนไขในการจับคู่ของโหนดเกตเวย์มีดังนี้

1) ต้องเป็นคู่ของโหนดแยกคู่กับโหนดประสาน หรือโหนดประสานคู่กับโหนดแยก
2) ชนิดของโหนดต้องเป็นชนิดเดียวกัน เช่น ถ้าโหนดที่กำลังพิจารณาเป็นเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟคู่ของโหนดต้องเป็นเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟด้วยเช่นกัน
3) คู่ของโหนดต้องเป็นโหนดที่ไม่เคยถูกจับคู่กับโหนดเกตเวย์อื่นมาก่อน
4) ถ้าโหนดที่กำลังพิจาณาสามารถจับคู่กับโหนดที่อยู่ก่อนหน้าได้, โหนดที่กำลังพิจารณาถือว่าอยู่ในพาร์ทิชันเดียวกันกับโหนดที่อยู่ก่อนหน้า ในทางกลับกัน, ถ้าโหนดที่กำลังพิจารณาไม่สามารถจับคู่ได้ โหนดนั้นจะอยู่ในพาร์ทิชันถัดไป

พาร์ทิชันที่ได้จากการแบ่งด้วยวิธีพิจารณาเกตเวย์แบ่งออกเป็น 7 แบบรูป คือ 1) sequence 2) if-then 3) if-then-else or Parallel 4) repeat-until 5) while-do 6) do-while-do และ 7) Indeterminate ประเภทของโหนดและแบบรูปของโฟลว์ที่ได้จากการแบ่งโมเดลแสดงตามรูปที่ 3-2 อย่างไรก็ตาม การแบ่งโมเดลโดยวิธีพิจารณาคู่ของเกตเวย์อาจทำให้ได้พาร์ทิชันที่ขนาดใหญ่หรือเล็กเกินไป อาจจำเป็นต้องมีการพิจาณาขนาดของพาร์ทิชันที่ได้อีกครั้งด้วยการพิจาณาน้ำหนักของพาร์ทิชันตามหัวข้อ 3.2.2



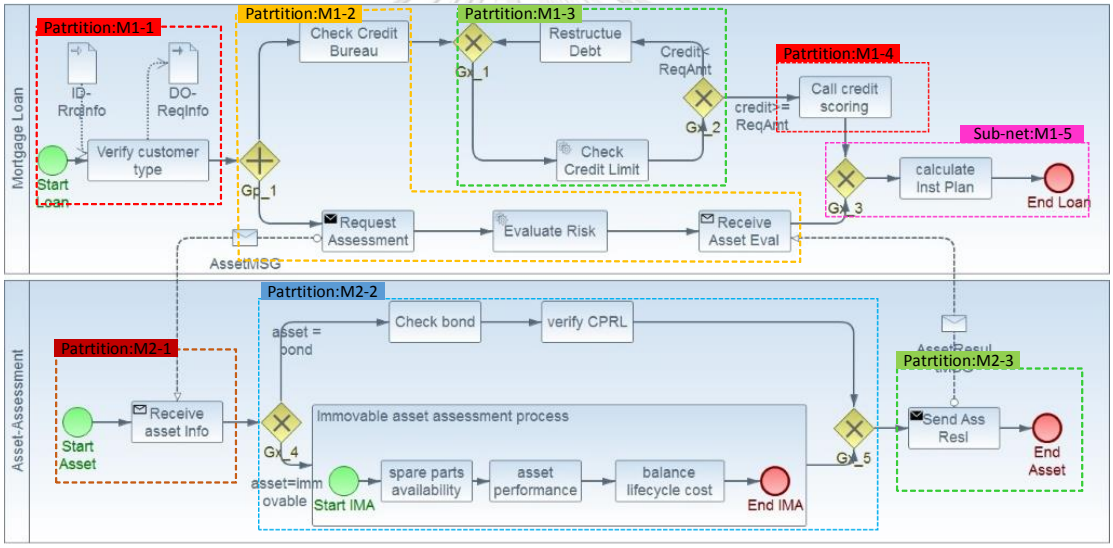
รูปที่ 3-2 ชนิดของโหนดและแบบรูปของโฟลว์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

3.2.2. การแบ่งโมเดลด้วยวิธีพิจารณาน้ำหนัก

การแบ่งโมเดลด้วยการวิธีพิจารณาค่าน้ำหนักถูกนำมาใช้เพื่อแบ่งหรือประสานพาร์ทิชันที่ได้จากวิธีการพิจารณาคู่เกตเวย์, มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ขนาดของพาร์ทิชันใกล้เคียงกับความต้องการ การตั้งค่าน้ำหนักที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาน้ำหนักประกอบด้วย 2 ค่าคือ

1) ค่าน้ำหนักต่ออิลีเมนต์ : เป็นค่านำหนักที่กำหนดให้กับแต่ละประเภทอิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็น เช่น ถ้าเป็นโหนดฟังก์ชันที่มีประเภทย่อยเป็นทาสก์เซอร์วิสให้ค่านำหนักเท่ากับ 3, ถ้าเป็นโหนดแยกที่มีประเภทย่อยเป็นเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟให้มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 5 เป็นต้น
2) ค่าน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชัน : เป็นค่าน้ำหนักสูงสุดต่อพาร์ทิชันที่นำไปใช้ในการพิจาณาว่าพาร์ทิชันที่ได้ควรมีการแบ่งย่อยอีกครั้งหรือควรประสานกับพาร์ทิชันที่อยู่ติดกันหรือไม่ ถ้าพาร์ทิชันที่ได้มีผลรวมของน้ำหนักอิลีเมนต์เกินค่าน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชัน พาร์ทิชันนั้นถูกแบ่งย่อยอีกครั้ง แต่ถ้าพาร์ทิชันมีน้ำหนักน้อยกว่าค่าที่กำหนด พาร์ทิชันนั้นจะถูกรวมกับพาร์ทิชันที่อยู่ติดกันถ้าผลรวมของน้ำหนักของทั้งสองพาร์ทิชันไม่เกินค่าที่กำหนด

รูปที่ 3-3 แสดงตัวอย่างโมเดลที่ได้จากการแบ่งด้วยอัลกอริทึม 3.1. จะเห็นได้ว่าในขั้นแรกโมเดลถูกแบ่งด้วยพูลจากรหัสของพาร์ทิชันจะขึ้นต้นด้วย M1 หรือ M2 ซึ่ง M1 คือพูลของ Mortgage loan และ M2 คือพูลของ Asset Assessment หลังจากนั้นโหนดที่อยู่ในแต่ละพูลจะถูกแบ่งด้วยการพิจารณาคู่เกตเวย์และพาร์ทิชันที่เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งแสดงตามเส้นประ



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้จากการพิจารณาเกตเวย์

จากรูปที่ 3-3 สามารถอธิบายตัวอย่างการแบ่งพาร์ทิชันดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 พิจาณาพาร์ทิชัน M1-1 เมื่อพิจารณาโหนด Start Loan, Verify customer type ทั้งสองโหนดเป็นโหนดฟังก์ชัน และเมื่อพิจารณามาถึงโหนด Gp_1 ซึ่งเป็นโหนดแยกและเมื่อพิจารณาย้อนกลับไปในพาร์ทที่ผ่านมาจะพบว่าโหนด Gp_1 ไม่สามารถจับคู่กับโหนด Start Loan หรือ Verify customer ได้ ดังนั้นโหนด Start Loan และ Verify customer type จึงอยู่ในพาร์ทิชันเดียวกัน แล้วโหนด Gp_1 จะอยู่ในพาร์ทิชัน M1-2

ตัวอย่างที่ 2 พิจารณาพาร์ทิชัน M1-3 จะเห็นได้ว่า Gx_1 เป็นโหนดประสาน ในขณะที่โหนด Gx_2 เป็นโหนดแยก และประเภทย่อยของโหนดทั้งคู่เป็น Exclusive gateway ทำให้ทั้งสองโหนดสามารถจับคู่กันได้ดังนั้นโหนดที่อยู่ระหว่าง Gx_1 และ Gx_2 จึงถือว่าอยู่ในพาร์ทิชันเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 3 พิจารณาพาร์ทิชัน M1-2, หลังจากที่โหนด Gp_1 ถูกพิจารณา โหนดฟังก์ชันถูกพิจาณามาเรื่อยๆ จนถึงโหนด Gx_3 ซึ่งเป็นโหนดประสาน ถึงแม้ว่าประเภทของโหนดจะเข้าเงื่อนไข “โหนดแยกคู่กับโหนดประสาน” แต่ชนิดของโหนด Gp_1 เป็น Parallel gateway ในขณะที่ Gx_3 เป็น Exclusive gateway ดังนั้นทั้งสองโหนดนี้จึงไม่ใช่คู่กัน โหนด Gx_3 จึงอยู่ในพาร์ทิชัน M1-4

ตารางที่ 3-3 สมมติให้ค่าน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 15 การกำหนดค่าดังกล่าวส่งผลให้พาร์ทิชัน M2-2 ค่านำหนักเกิน เพราะพาร์ทิชัน M2-2 มี 7 โหนด ทำให้มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 21 (7 * 3) ดังนั้นพาร์ทิชัน M2-2 จึงจำเป็นต้องถูกแบ่งอีกครั้ง โดยการแบ่งจะมีตัวนับน้ำหนัก (Weight counter) เป็นตัวกำหนดการแบ่งพาร์ทิชัน

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลการแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นในรูปที่ 3-3 ด้วยการพิจารณาคู่เกตเวย์

รหัสพาร์ทิชัน	**ชื่ออิลีเมนต์**	**แบบรูป**	**ค่าน้ำหนักรวม**
M1-1	Start Loan, Verify member type	Sequence	6
M1-2	Gp_1, Check Credit bureau, Request Assessment, Evaluate risk, Receive Asset Eval	Indeterminate	15
M1-3	Ex_1, Check credit Limit, Gx_2, Restructure debt	Do-while-do	12
M1-4	Call credit scoring,	Sequence	3
M1-5	Gx_3, Calculate Inst Plan, End Loan	Indeterminate	9
M2-1	Start Asset, Receive asset Info	Sequence	6
M2-2	Gx_4, Check bond, verify CPRL, Start IMA, spare part availability, asset performance, balance lifecycle cost, End IMA, Gx_5	If-then-else	27
M2-3	Send Asst resl, End Asset	Sequence	6

นำหนักรวมของแต่ละพาร์ทิชันคำนวณจากค่าน้ำหนักต่ออิลีเมนต์เท่ากับ 3; ตัวอย่างพาร์ทิชัน M1-1 มี 2 โหนด ดังนั้นค่าน้ำหนักรวมจึงเท่ากับ 6 (2*3)

ในขณะที่พาร์ทิชัน M1-4 และ M1-5 มีน้ำหนักรวมของแต่ละพาร์ทิชันเท่ากับ 6 และเป็นพาร์ทิชันที่อยู่ติดกัน เมื่อรวมทั้งสองพาร์ทิชันเข้าด้วยกันค่าน้ำหนักรวมของพาร์ทิชันใหม่คือ 12 ซึ่งยังไม่เกิน 15 ดังนั้นสามารถนำทั้งสองพาร์ทิชันรวมเป็นพาร์ทิชันเดียวกันได้ จากข้อมูลการแบ่งพาร์ทิชัน

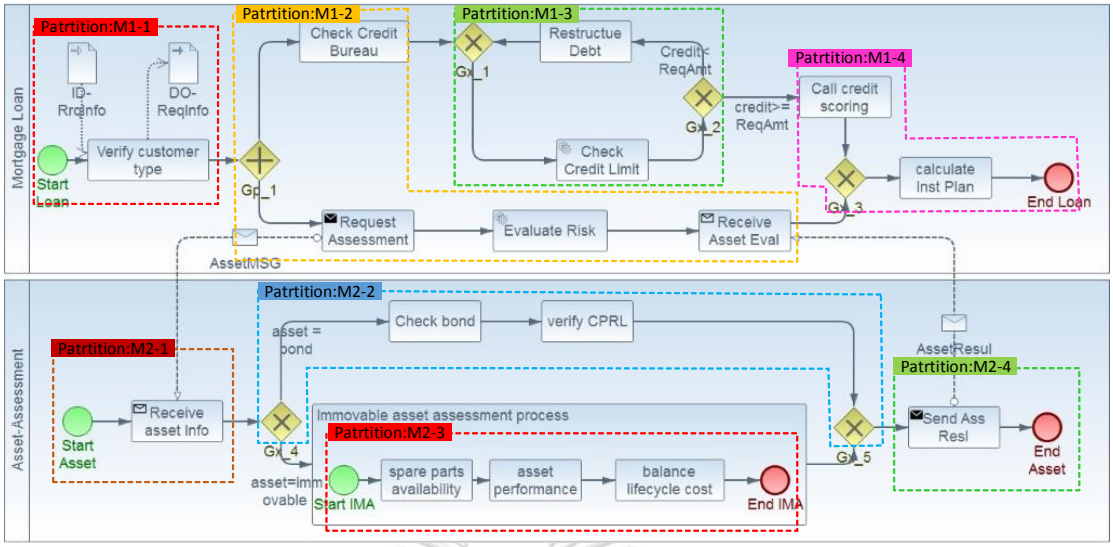
ในตารางที่ 3-3 เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักรวมและทำการแบ่งหรือรวมพาร์ทิชันอีกครั้งจะได้พาร์ทิชันใหม่ตามข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3-4 ข้อมูลในตารางแสดงพาร์ทิชัน M1-4* ได้จากการรวมพาร์ทิชัน M1-4 และ M1-5 จากข้อมูลในตารางที่ 3-3 ในขณะที่พาร์ทิชัน M2-2** และ M2-3** ได้จากการแบ่งพาร์ทิชัน M2-2 จากข้อมูลใน ผลจากการพิจารณาค่าน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันแสดงในตารางที่ 3-4 ผลลัพธ์ของการแบ่งพาร์ทิชันอีกครั้งด้วยวิธีพิจารณาค่านำหนักรวมต่อพาร์ทิชันแสดงในรูปที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 สรุปข้อมูลการแบ่งโมเดลหลังพิจารณาค่านำหนักรวมต่อพาร์ทิชัน

รหัสพาร์ทิชัน	**ชื่ออิลีเมนต์**	**แบบรูป**	**ค่าน้ำหนักรวม**
M1-1	Start Loan, Verify member type	Sequence	6
M1-2	Gp_1, Check Credit bureau, Request Assessment, Evaluate risk, Receive Asset Eval	Indeterminate	15
M1-3	Ex_1, Check credit Limit, Gx_2, Restructure debt	Do-while-do	12
M1-4*	Gx_3, Call credit scoring, Calculate Inst Plan, End Loan	Indeterminate	12
M2-1	Start Asset, Receive asset Info	Sequence	6
M2-2**	Gx_4, Check bond, verify CPRL, Gx_5	Indeterminate	12
M2-3**	Start IMA, spare part availability, asset performance, balance lifecycle cost, End IMA	Sequence	15
M2-4	Send Asst resl, End Asset	Sequence	6

ข้อมูลที่ปรากฏในตารางได้จากการกำหนดค่าน้ำหนักต่ออิลีเมนต์เท่ากับ 3 และค่าน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันที่กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3-4 ตัวอย่างพาร์ทิชันโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้จากการพิจารณาคู่เกตเวย์และพิจาณานำหนัก

3.3. การแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น

คุณสมบัติของแต่ละอิลีเมนต์ที่ได้สกัดตามตารางที่ 3.1. จะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการแปลงอิลีเมนต์ กฎการแปลงอิลีเมนต์ประกอบด้วย 21 ข้อดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1 : กฎการแปลงนิยามไอเท็ม

นิยามไอเท็มที่สกัดได้จากไฟล์เอ็กซ์เอสดีจะนำไปประกาศเป็นตัวแปรและชนิดของตัวแปรหรือคัลเลอร์เซ็ตเพื่อที่จะนำไปสร้างอินสคริปชันของโมเดลซีพีเอ็น รูปที่ 3-5 แสดงตัวอย่างการแปลงนิยามไอเท็ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

```
01  <complexType name="InputData">
02     <sequence>
03        <element name="Name" type="string"/>
04        <element name="Salary" type="int"/>
08        </sequence>
09  </complexType>
10  <complexType name="OutputData">
11     <sequence>
12        <element name="Name" type="string"/>
13        <element name="Job_grade" type="string"/>
14        </sequence>
15  </complexType>
```

(a) BPMN item definition

```
colset STR = string;
colset INT = int;
colset InputData = product STR  * INT;
colset OutputData = product STR  * STR;
local_var Name, Job_grade : STR;
local_var Salary : INT;
```

(b) CPN color sets and variables

รูปที่ 3-5 ตัวอย่างคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปรที่ได้จากการแปลงนิยามไอเท็ม

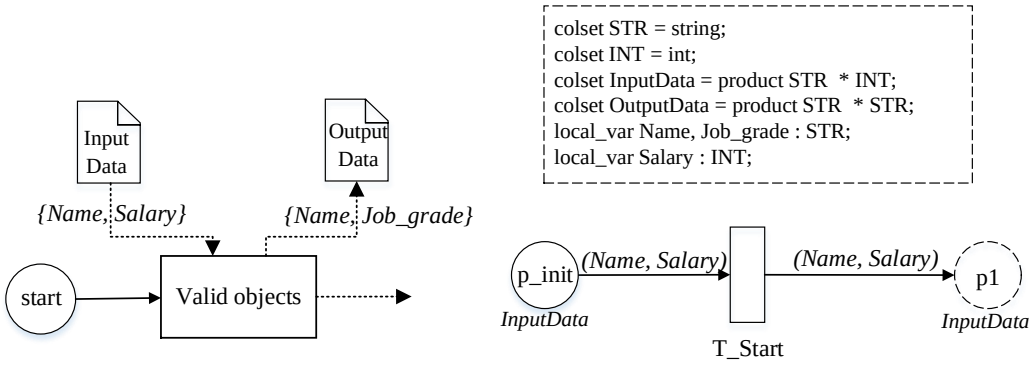
จากรูปที่ 3-5 (a) ข้อมูล InputData ที่เป็นชุดข้อมูลที่ประกอบด้วยตัวแปร Name และ Salary เมื่อแปลงนิยามไอเท็มไปเป็นคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปรจะได้ข้อมูลดังรูปที่ 3-5 (b) ในโมเดลซีพีเอ็นจะมีการประกาศคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปร 4 แบบคือ

1) คัลเลอร์เซ็ตอย่างง่าย: คำประกาศขึ้นต้นด้วย colset ตามด้วยชื่อชนิดตัวแปร และชนิดตัวแปร ตัวอย่างเช่น “colset STR = String” เมื่อนำไปใช้ในโมเดลซีพีเอ็น ถ้าต้องการประกาศตัวแปรใหม่ที่มีชนิดตัวแปรเป็น String ผู้ใช้งานสามารถอ้างอิงชนิดตัวแปรด้วย STR แทนการประกาศชนิดตัวแปร String
2) คัลเลอร์เซ็ตเชิงซ้อน: คำประกาศเหมือนกับการประกาศคัลเลอร์เซ็ตอย่างง่าย แตกต่างที่ชนิดตัวแปรที่นำมาสร้างจะประกอบด้วยชนิดตัวแปรตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น “colset InputData = Product STR * INT” หมายถึง ชนิดตัวแปร inputData เป็นชนิดตัวแปรเชิงซ้อนที่เกิดจากชนิดตัวแปรที่เป็น String และ Int ตามลำดับ
3) ตัวแปรโลคอล: ตัวแปรที่ประกาศไว้ในไฟล์เอ็กซ์เอสดีทั้งหมดจะถูกนำมาประกาศเป็นตัวแปรโลคอลเพื่อใช้ในโมเดลซีพีเอ็น โดยตัวแปรที่ประกาศจะต้องมีชื่อตัวแปรที่ไม่ซ้ำกัน ในกรณีที่มีการประกาศชื่อตัวแปรซ้ำกันในไฟล์เอ็กซ์เอสดี ตัวแปรนั้นจะถูกสร้างเพียงตัวเดียว ตัวอย่างการประกาศตัวแปรโลคอล “local_var Name, Job_grade : STR” หมายถึงตัวแปร Name และ Job_grade เป็นตัวแปรโลคอลที่มีชนิดตัวแปรเป็น String
4) ตัวแปรโกลบอล: ผู้ใช้งานจะสร้างตัวแปรโกลบอลมาใช้เป็นกรณีพิเศษ เช่นการเก็บค่าข้อมูลที่ได้จากการทำโอเปอร์เรชันของตัวแปลโลคอล หรือใช้ในการกำหนดค่ากลางที่ใช้ร่วมกัน ตัวอย่างการประกาศตัวแปรโกลบอล “global_var cost_center : INT” หมายถึงตัวแปรชื่อ cost_center เป็นตัวแปรโกลบอลที่มีชนิดตัวแปรเป็น int

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กฎข้อที่ 2 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เริ่มต้น

การแปลงอิลีเมนต์เริ่มต้นจะได้โครงสร้างซีพีเอ็นประกอบด้วย 1 เพลสนำเข้า, 1 ทรานซิชัน และ 1 เพลสนำออก โดยที่ P_Init คือเพลสที่ทำหน้าที่บรรจุโทเค็นเริ่มต้นของกระบวนการ ในขณะที่ T_Start คือทรานซิชันที่แสดงเหตุการณ์การเริ่มต้นของกระบวนการ และเพลส P1 คือเพลสที่ทำหน้าที่บรรจุโทเค็นที่แสดงว่าการเริ่มของกระบวนการได้เกิดขึ้นแล้ว ชนิดตัวแปรของเพลส P_init ได้จากชุดข้อมูลนำเข้าของอิลีเมนต์ที่อยู่ถัดไป รูปที่ 3-6 แสดงกฎการแปลงอิลีเมนต์เริ่มต้น



(a) BPMN Start event

(b) CPN Start event

รูปที่ 3-6 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เริ่มต้น

จากรูปที่ 3-6(a) อิลีเมนต์ที่อยู่ถัดจากอิลีเมนต์เริ่มต้น คือ Valid objects ซึ่งหมายถึงตำแหน่งนั้นอาจเป็นอิลีเมนต์ทาสก์ประเภทใดก็ได้ ข้อมูลนำเข้าของอิลีเมนต์ถัดไปคือชุดข้อมูล InputData ซึ่งรายละเอียดข้อมูลประกอบด้วยตัวแปร Name ที่มีชนิดตัวแปรเป็น String และตัวแปร Salary ที่มีชนิดตัวแปรเป็น Int เมื่อคัลเลอร์เซ็ต InputData และตัวแปร Name และ Salary ถูกสร้างเรียบร้อยแล้ว คัลเลอร์เซ็ตจะถูกนำไปกำหนดเป็นคัลเลอร์เซ็ตให้กับเพลส P_init และตัวแปร Name และ Salary จะถูกนำไปใช้ในการส่งค่าข้อมูลบนอาร์กนำเข้าและอาร์กนำออกของทรานซิชันตามที่แสดงในรูปที่ 3-6 (b)

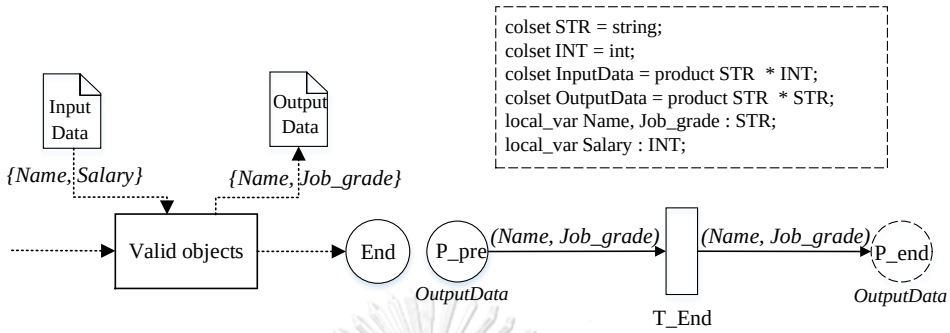
กฎข้อที่ 3 : กฎการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การแปลงอิลีเมนต์ของอีเวนท์สิ้นสุดจะได้โครงสร้างซีพีเอ็นประกอบด้วย 2 เพลสและ 1 ทรานซิชัน โดยที่ P_Pre คือเพลสที่บรรจุโทเค็นที่เป็นผลลัพธ์ของทาสก์ก่อนหน้าก่อนที่จะเข้าสู่สถานะสิ้นสุด, T_end คือทรานซิชันที่แสดงถึงเหตุการณ์สิ้นสุด และ P_End คือเพลสที่บรรจุโทเค็นที่แสดงว่ากระบวนการนั้นได้สิ้นสุดลงแล้ว กรณีที่เป็นการสิ้นสุดแบบมีการส่งข้อความไปกระตุ้นอิลีเมนต์อื่นที่อยู่ต่างพูล เซ็ตของเอาท์พุทเพลสจะมีสมาชิกสองตัวคือ P_End และ P_sig ข้อความที่ส่งระหว่างพูลจะถูกแสดงโดยใช้อาร์กนำออกเชื่อมจากทรานซิชัน T_end ไปยังเพลส P_sig รูปที่ 3-7 แสดงกฎการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุดแบบไม่มีการส่งข้อความ รูปที่ 3-8 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุดแบบที่มีการส่งข้อความไปยังอิลีเมนต์ที่อยู่ต่างพูล

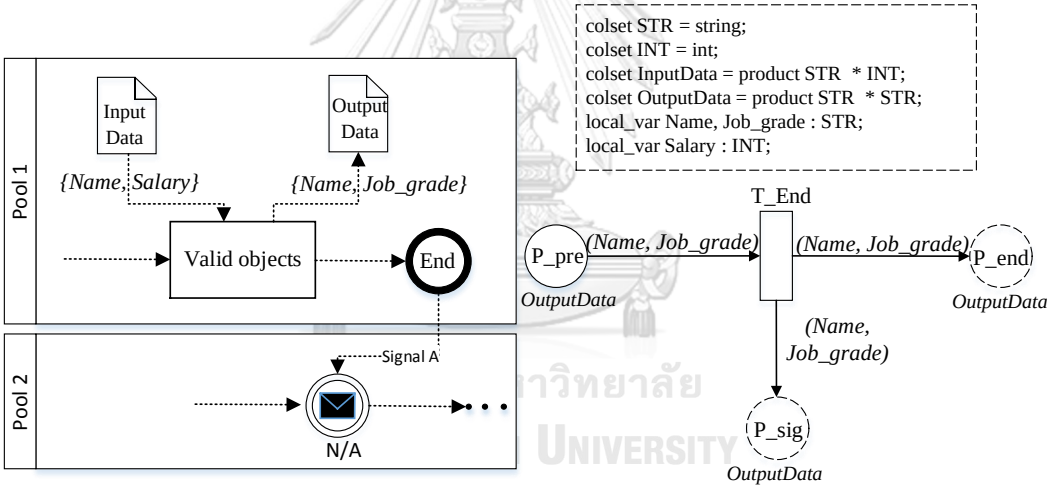
คัลเลอร์เซ็ตของเพลสจะเป็นคัลเลอร์เซ็ตที่สร้างจากชุดข้อมูลนำออกของอิลีเมนต์ที่อยู่ก่อนอิลีเมนต์สิ้นสุด จากรูปที่ 3-8 ข้อมูลนำออกของอิลีเมนต์ก่อนหน้าอิลีเมนต์สิ้นสุดคือชุดข้อมูล Outputdata ที่ประกอบด้วยตัวแปร Name และ Job_grade ที่มีชนิดตัวแปรเป็น String ทั้งคู่ ดังนั้น

คัลเลอร์เซ็ต Outputdata จึงถูกสร้างขึ้นและนำไปกำหนดเป็นคัลเลอร์เซ็ตของเพลส P_pre, P_End, P_sig และข้อมูลที่จะถูกส่งระหว่างเพลสและทรานซิชันจะส่งผ่านตัวแปร Name และ Job_grade ที่อยู่บนอาร์ก



(a) BPMN end event (b) CPN end event

รูปที่ 3-7 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุด



(a) BPMN end event with trigger (b) CPN end event with trigger

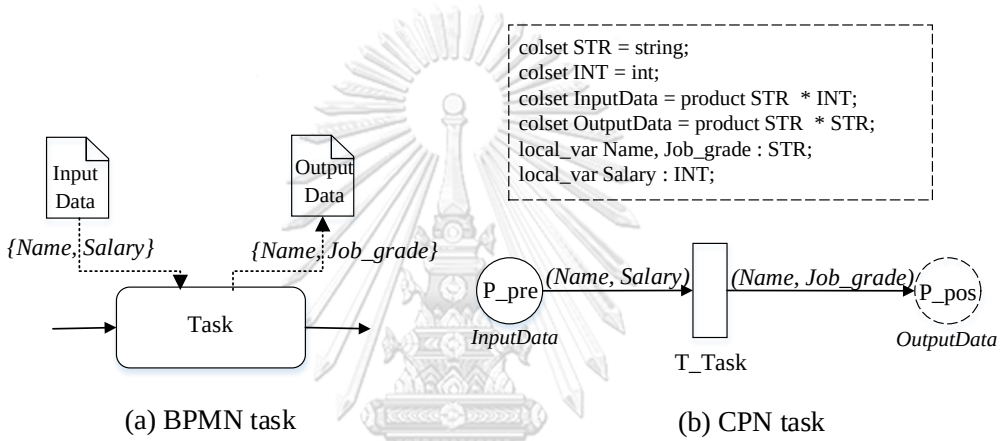
รูปที่ 3-8 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์สิ้นสุดแบบมีการส่งสัญญาณ

กฎข้อที่ 4 : กฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ทุกประเภท (ยกเว้นทาสก์ส่งและทาสก์รับ)

โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ของทาสก์จะประกอบด้วย 2 เพลสและ 1 ทรานซิชัน โดยที่ P_Pre คือเพลสที่ทำหน้าที่บรรจุโทเค็นที่แสดงสถานะก่อนเอ็กซ์ซิคิวทาสก์ ทรานซิชัน T_Task แสดงถึงเหตุการณ์การทำงานของทาสก์ และเพลส P_Pos แสดงสถานะว่าทาสก์

นั้นได้ถูกเอ็กซ์ซิคิวเสร็จสมบูรณ์แล้ว ตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์แสดงในรูปที่ 3-9

กำหนดคัลเลอร์เซ็ตให้กับแต่ละเพลสจะใช้คัลเลอร์เซตสร้างจากชุดข้อมูลนำเข้าและชุดข้อมูลนำออก รูปที่ 3-9 (b) คัลเลอร์เซ็ต Type_di ถูกสร้างมาจากจากชุดข้อมูลนำเข้า InputData ที่ประกอบด้วยตัวแปร Name และ Salary ที่มีชนิดของตัวแปรเป็น String และ Int ตามลำดับและนำคัลเลอร์เซ็ตที่ได้ไปกำหนดให้กับเพลส P_pre ในขณะที่เพลส P_pos จะถูกกำหนดด้วยคัลเลอร์เซ็ต OutputData ที่สร้างจากเซ็ตข้อมูลนำออกที่ประกอบด้วยตัวแปร Name และ Job_grade ที่มีชนิดตัวแปรเป็น String ทั้งสองตัวแปร

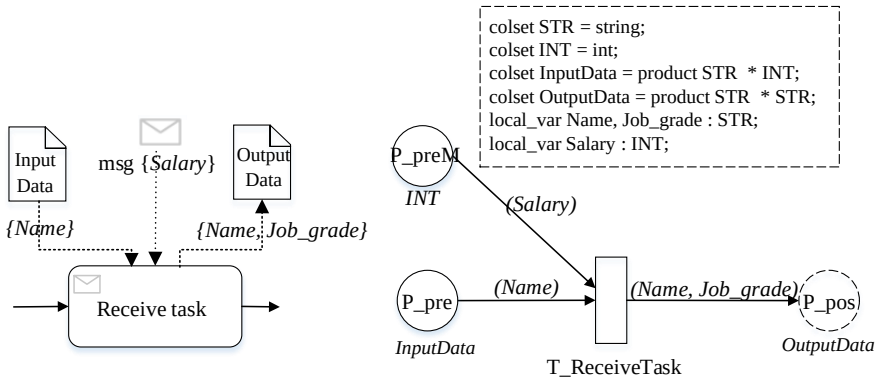


รูปที่ 3-9 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กฎข้อที่ 5 : กฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์รับ

ถ้าอิลีเมนต์มีประเภทเป็นทาสก์รับ โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จะประกอบด้วย 3 เพลสและ 1 ทรานซิชัน โดยที่ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนการดำเนินการทาสก์, P_PreM คือเพลสที่แสดงสถานะว่าได้รับข้อความที่ถูกส่งมาจากพูลอื่นแล้ว ในขณะที่ T_ReceiveTask คือทรานซิชันที่แสดงถึงเหตุการณ์การทำงานของทาสก์รับ และ P_Pos คือเพลสที่ทำหน้าที่บรรจุโทเค็นที่แสดงสถานะว่าทาสก์รับนั้นได้รับข้อความเสร็จสมบูรณ์แล้ว รูปที่ 3-10 แสดงโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์รับ

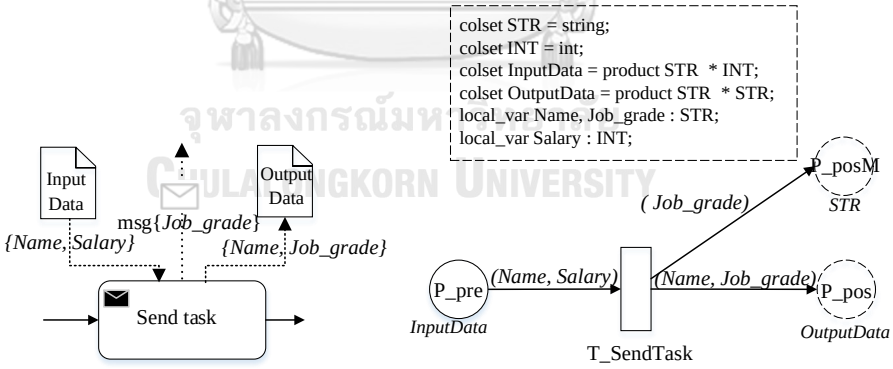


(a) BPMN receive task (b) CPN receive task

รูปที่ 3-10 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์รับ

กฎข้อที่ 6 : กฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ส่ง

โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ส่งประกอบด้วย 3 เพลสและ 1 ทรานซิชัน เมื่อ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนการดำเนินการทาสก์ส่ง, T_SendTask คือทรานซิชันที่แสดงถึงเหตุการณ์การทำงานของทาสก์ส่ง และ P_Pos คือเพลสที่ทำหน้าที่บรรจุโทเค็นที่แสดงสถานะว่าทาสก์ส่งนั้นได้ส่งข้อความเสร็จสมบูรณ์แล้วและพร้อมที่จะทำกิจกรรมถัดไป, P_PosM คือเพลสที่แสดงสถานะว่าข้อความได้ถูกส่งไปยังทาสก์ที่อยู่ต่างพูลแล้ว รูปที่ 3-11 แสดงโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ส่ง



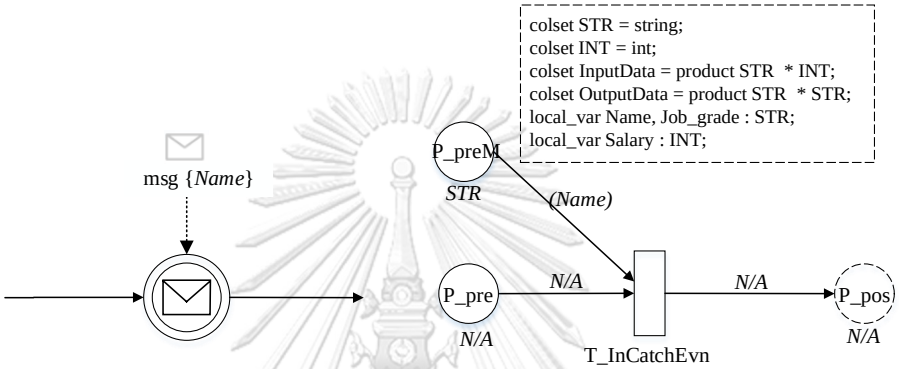
(a) BPMN send task (b) CPN send task

รูปที่ 3-11 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ทาสก์ส่ง

กฎข้อที่ 7 : กฎการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียท

เมื่อแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียทจะได้โครงสร้างซีพีเอ็นประกอบด้วย 3 เพลส และ 1 ทรานซิชัน เมื่อ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนการเกิดขึ้นของเหตุการณ์, เพลส P_preM คือเพลสที่แสดงสถานะข้อความที่ส่งมาจากทาสก์ที่อยู่ต่างพูลได้มาถึงแล้ว, T_InCatchEvn คือทราน

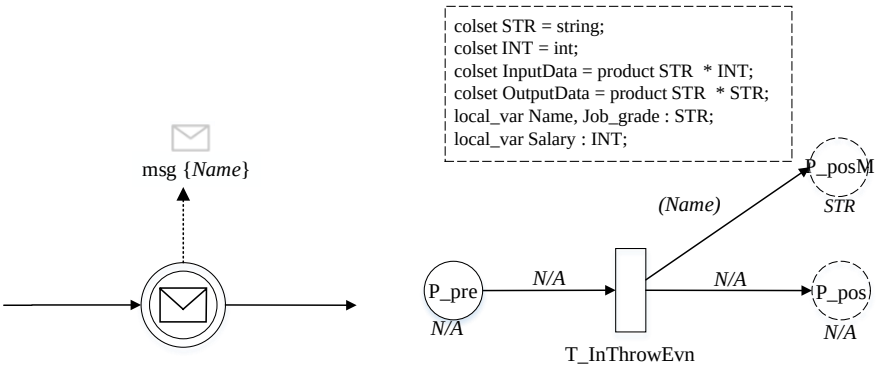
ชิชันที่แสดงถึงเหตุการณ์การรับข้อความ และ P_Pos คือเพลสที่ทำหน้าที่แสดงถึงสถานะว่าเหตุการณ์การรับข้อความได้ดำเนินการสำเร็จแล้ว เนื่องจากอีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียท มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถกำหนดข้อมูลนำเข้าหรือข้อมูลนำออกให้กับอิลิเมนต์ได้ ดังนั้นคัลเลอร์เซ็ตของเพลสและอาร์กอินสคริปชันจึงไม่สามารถสร้างได้โดยอัตโนมัติ (ในรูปที่ 3-12 N/A คือ อินสคริปชันหรือคัลเลอร์เซ็ตที่ไม่สามารถถูกสร้างโดยอัตโนมัติ ก่อนที่จะนำโมเดลซีพีเอ็นไปสร้างปริภูมิสถานะผู้ใช้งานต้องปรับแต่งโมเดลอีกครั้ง โดยการปรับแต่งอธิบายในบทที่ 4) รูปที่ 3-12 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียท



รูปที่ 3-12 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์แคชอินเทอร์มิเดียท

กฎข้อที่ 8 : กฎการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียท

เมื่อแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียทจะได้โครงสร้างซีพีเอ็นที่ประกอบด้วย 3 เพลส และ 1 ทรานซิชัน เมื่อ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนการเกิดขึ้นของเหตุการณ์, T_InThrowEvn คือทรานชิชันที่แสดงถึงเหตุการณ์การส่งข้อความ และ P_Pos คือเพลสที่ทำหน้าที่แสดงถึงสถานะว่าเหตุการณ์การส่งข้อความได้ดำเนินการสำเร็จแล้ว เพลส P_posM คือเพลสที่แสดงสถานะข้อความที่ส่งออกไปยังทาสก์ที่อยู่ต่างพูลได้ถูกส่งออกไปแล้ว เนื่องจากอีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียทมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถกำหนดข้อมูลนำเข้าหรือข้อมูลนำออกให้กับอิลิเมนต์ได้ ดังนั้นคัลเลอร์เซ็ตของเพลสและอาร์กอินสคริปชันจึงไม่สามารถสร้างได้โดยอัตโนมัติ ผู้ใช้งานต้องจำเป็นต้องเพิ่มข้อมูลในส่วนนี้เอง รูปที่ 3-13 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียท

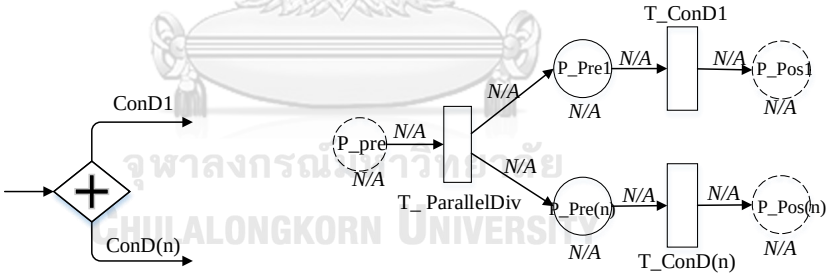


(a) BPMN intermediate throw event (b) CPN intermediate throw event

รูปที่ 3-13 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์อีเวนท์โทรว์อินเทอร์มิเดียท

กฎข้อที่ 9 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ

โดยทั่วไปเกตเวย์แบบขนานจะไม่มีการระบุเงื่อนไขบนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ แต่เครื่องมือออกแบบโมเดลไม่ได้จำกัดการระบุเงื่อนไขดังกล่าว ดังนั้นบนเกตเวย์แบบขนานอาจมีการกำหนดเงื่อนไขบนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ ถ้าอิลีเมนต์เป็นประเภทเป็นเกตเวย์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จะประกอบด้วย จำนวนเพลสขั้นต่ำ 5 เพลสและ 3 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์) รูปที่ 3-14 แสดงตัวอย่างเกตเวย์แบบขนานที่มีเส้นออกจากเกตเวย์ 2 เส้น



(a) BPMN divergent parallel gateway (b) CPN divergent parallel gateway

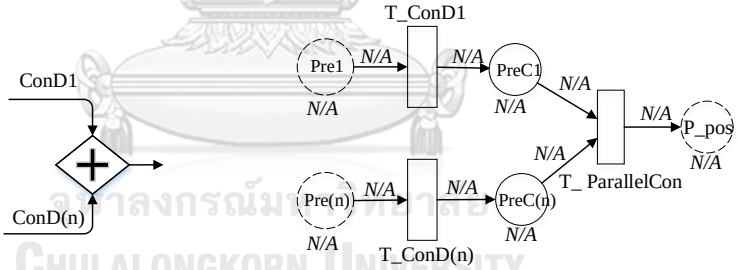
รูปที่ 3-14 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ

โดยที่ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนผ่านเกตเวย์, T_ParallelDiv คือทรานซิชันแสดงเกตเวย์แบบขนานที่แยกกระบวนการ และ P_Pre1 ถึง P_Pre(n) คือเพลสที่แสดงว่าการทำงานได้ผ่านเกตเวย์และพร้อมที่จะประเมินเงื่อนไขที่อยู่บนเส้น เมื่อ n คือจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ ทรานซิชัน T_ConD1 ถึง T_ConD(n) แทนขั้นตอนการประเมินเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ และเพลส P_Pos1 ถึง P_Pos(n) คือเพลสที่แสดงสถานะว่าเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นได้ถูกประเมินเรียบร้อยแล้ว

เนื่องจากเกตเวย์ทุกประเภทเป็นอิลีเมนต์ที่ใช้แยกกระบวนการหรือประสานกระบวนการเท่านั้น จะไม่สามารถข้อมูลนำเข้าหรือข้อมูลนำออกให้กับเกตเวย์ได้ ดังนั้นคัลเลอร์เซ็ตของเพลสและอาร์กอินสคริปชันที่เกิดจากการแปลงเกตเวย์จะไม่สามารถสร้างโดยอัตโนมัติ ผู้ใช้งานต้องจำเป็นต้องทำการเพิ่มข้อมูลในส่วนนี้เอง รูปที่ 3-14 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์

กฎข้อที่ 10 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ

เกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ คือเกตเวย์มีจำนวนเส้นเข้ามากกว่า 1 เส้นและมีเส้นออกเพียง 1 เส้น โครงสร้างซีพีเอ็นจะประกอบด้วยจำนวนเพลสขั้นต่ำ 5 เพลสและ 3 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่เข้าเกตเวย์) โดย Pre1 ถึง Pre(n) คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนที่จะดำเนินการประสานการทำงาน, T_ConD1 ถึง T_ConD(n) คือทรานซิชันที่แทนการประเมินเงื่อนไขก่อนที่จะทำการประสานการทำงาน, PreC1 ถึง PreC(n) คือเพลสที่แสดงสถานะว่าได้ประเมินเงื่อนไขและพร้อมที่จะประสานการทำงานโดยที่ n คือจำนวนเส้นที่เข้าเกตเวย์, ทรานซิชัน T_ParallelCon แสดงเหตุการณ์การประสานการทำงาน และเพลส P_Pos แสดงสถานะหลังจากที่ได้ประสานการทำงานเรียบร้อยแล้ว รูปที่ 3-15 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ



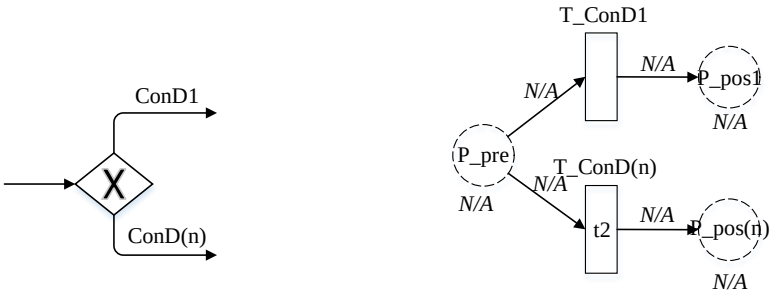
(a) BPMN convergent parallel gateway (b) CPN convergent parallel gateway

รูปที่ 3-15 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ

กฎข้อที่ 11 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ

อิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซิฟที่ใช้แตกกระบวนการสามารถกำหนดเงื่อนไขบนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ได้ เมื่อแปลงไปเป็นโครงสร้างซีพีเอ็นจะประกอบด้วยจำนวนเพลสขั้นต่ำ 3 เพลสและ 2 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่เข้าเกตเวย์) เมื่อ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนแตกกระบวนการ, ทรานซิชัน T_ConD1 ถึง T_ConD(n) คือทรานซิชันที่แสดงเงื่อนไขบนเส้นที่ออกจากเกตเวย์, P_Pos1 ถึง P_Pos(n) คือเพลสที่แสดงสถานะว่าเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นได้ถูกประเมินเรียบร้อยแล้ว เมื่อ

n คือจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ รูปที่ 3-16 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงเกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ



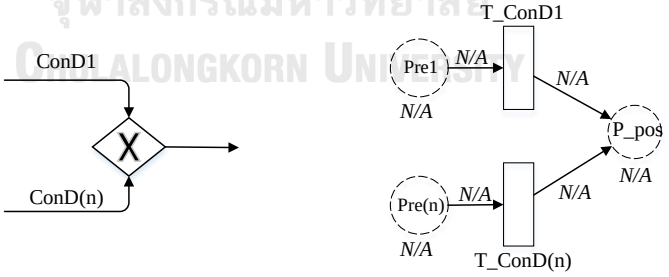
(a) BPMN divergent exclusive gateway (b) CPN divergent exclusive gateway

รูปที่ 3-16 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ

กฎข้อที่ 12 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ

อิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการอาจมีการกำหนดเงื่อนไขในการประสานกระบวนการ โครงสร้างที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟประกอบด้วย 3 เพลส และ 2 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์) รูปที่ 3-17 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นโมเดลที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ เพลส Pre1 ถึง เพลส Pre(n) คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนทำการประเมินเงื่อนไขก่อนที่จะประสานกระบวนการ ทรานซิชัน T_ConD1 ถึง T_conD(n) แทนการประเมินเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ และเพลส P_pos แสดงสถานะว่าการประสานกระบวนการได้เกิดขึ้นแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



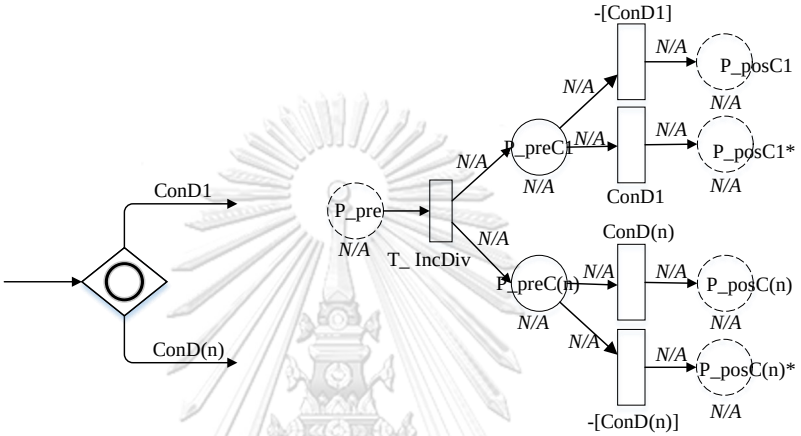
(a) BPMN divergent exclusive gateway (b) CPN convergent exclusive gateway

รูปที่ 3-17 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ

กฎข้อที่ 13 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบอินคลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ

อิลีเมนต์ที่เป็นเกตเวย์อินคลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการจำเป็นต้องพิจาณาเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ ดังนั้นเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นจึงถูกมองว่าเป็นสถานะหนึ่งของกระบวนการ อีกทั้ง

จำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่เป็นนิเสธเพื่อให้การทำงานของเกตเวย์จบการทำงานได้ รูปที่ 3-18 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อินคลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ ให้เพลส P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนที่จะดำเนินการแตกกระบวนการ, T_Con1 ถึง T_Con(n) คือทรานซิชันที่แทนการประเมินเงื่อนไขที่ของเกตเวย์ ในขณะที่ –[T_Con1] ถึง –[T_Con(n)] คือทรานซิชันที่แทนการประเมินเงื่อนไขที่เป็นนิเสธของเกตเวย์ และเพลส P_Pos(1) ถึง P_PosC1, P_posC1*, P_posC(n) และ P_posC(n)* คือเพลสที่แสดงสถานะว่าเงื่อนไขของเกตเวย์ได้ผ่านการประเมินค่าเรียบร้อยแล้ว เมื่อ n คือเส้นที่ออกจากเกตเวย์



(a) BPMN divergent inclusive gateway (b) CPN divergent inclusive gateway

รูปที่ 3-18 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อินคลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ

กฎข้อที่ 14 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบอินคลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ

โครงสร้างซีพีเอ็นซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบอินคลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการประกอบด้วย จำนวนเพลสขั้นต่ำ 3 เพลสและ 1 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่เข้าเกตเวย์) โดยPre1 ถึง Pre(n) คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนที่จะดำเนินการประสานการทำงาน เมื่อ n คือจำนวนเส้นที่เข้าเกตเวย์, T_IncCon คือทรานซิชันที่แสดงการประสานกระบวนการ และ P_Pos คือเพลสที่แสดงสถานะหลังจากที่ได้ประสานการทำงานเรียบร้อยแล้ว

(a) BPMN convergent inclusive gateway (b) CPN convergent inclusive gateway

รูปที่ 3-19 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อินคลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ

กฎข้อที่ 15 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์บอิงเหตุการณ์ที่ใช้แตกกระบวนการ

โครงสร้างของซีพีเอ็นของเกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้ในการแตกกระบวนการประกอบด้วย 3 เพลสและ 1 ทรานซิชัน (ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์) เนื่องจากเกตเวย์ประเภทนี้อาศัยเหตุการณ์ที่จะมากระตุ้นให้อิลิเมนต์ที่อยู่ถัดจากเกตเวย์ทำงาน ดังนั้นจะไม่มีเงื่อนไขอยู่บนเกตเวย์จึงไม่จำเป็นต้องมีทรานซิชันที่เป็นตัวแทนของการประเมินเงื่อนไขของเกตเวย์ รูปที่ 3-20 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้ในการแตกกระบวนการ ให้ P_Pre คือเพลสที่แสดงสถานะก่อนทำการแตกกระบวนการ, T_EvnDiv คือทรานซิชันที่แสดงการแตกกระบวนการ, P_Pos1 ถึง P_Pos(n) คือเพลสที่แสดงสถานะว่าการแตกกระบวนการแล้วได้ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว, โดยที่ n คือจำนวนเส้นที่ออกจากเกตเวย์

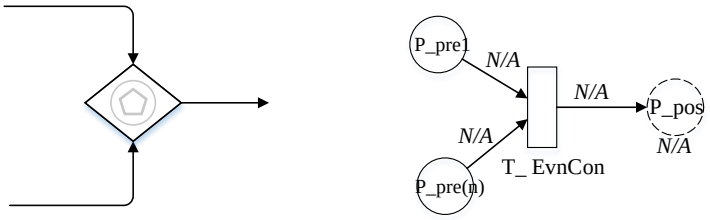
(a) BPMN divergent event-based gateway

(b) CPN divergent event-based gateway

รูปที่ 3-20 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงเกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้แตกกระบวนการ

กฎข้อที่ 16 : กฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์บอิงเหตุการณ์ที่ใช้ประสานกระบวนการ

การประสานกระบวนการโดยใช้เกตเวย์อิงเหตุการณ์มักจะใช้คู่กับเกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้แตกกระบวนการ ลักษณะโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์จะคล้ายกับโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์แบบขนาน โครงสร้างประกอบด้วย 3 เพลสและ 1 ทรานซิชัน โดยที่เพลส P_pre1 ถึง P_pre(n) แสดงสถานะก่อนทำการประสานกระบวนการ, ทรานซิชัน T_EvnCon แสดงเหตุการณ์การประสานกระบวนการ และเพลส P_pos แสดงสถานะว่าการประสานกระบวนการได้เสร็จสิ้นแล้ว รูปที่ 3-21 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากกฎการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อิงเหตุกรณ์ที่ใช้ประสานกระบวนการ



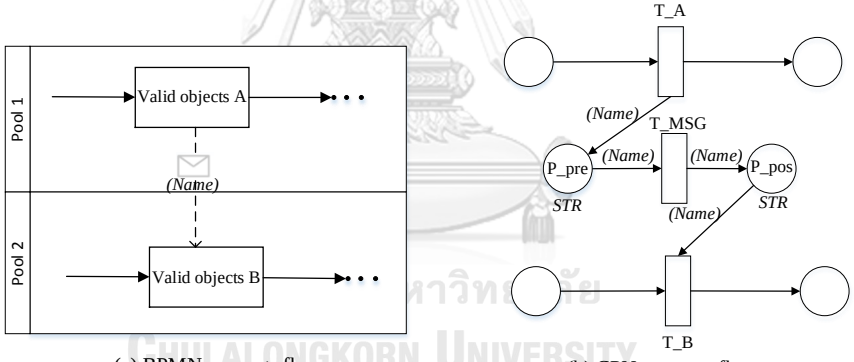
(a) BPMN convergent event-based gateway

(b) CPN convergent event-based gateway

รูปที่ 3-21 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์เกตเวย์อิงเหตุการณ์ที่ใช้ประสานกระบวนการ

กฎข้อที่ 17 : กฎการแปลงอิลีเมนต์โฟลว์ข้อความ

อิลีเมนต์โฟลว์ข้อความมักจะมาพร้อมกับข้อความ โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลิเมนต์โฟลว์ข้อความจะประกอบด้วย 2 เพลสและ 1 ทรานซิชัน รูปที่ 3-22 แสดงตัวอย่างโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์โฟลว์ข้อความที่มากับข้อความ เพลส P_pre แสดงสถานะว่าข้อความได้ถูกส่งออกมาจากผู้ส่งแล้ว ในขณะที่ทรานซิชัน T_MSG แทนการส่งข้อความที่อยู่บนเครือข่าย และเพลส P_pos แสดงสถานะว่าข้อความนั้นได้ถูกส่งผ่านเครือข่ายเรียบร้อยแล้ว สำหรับคัลเลอร์เซ็ตของเพลสและอินสคริปชันจะได้มาจากชนิดข้อมูลและตัวแปรที่อยู่ในข้อความ



(a) BPMN message flow

(b) CPN message flow

รูปที่ 3-22 โครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์โฟลว์ข้อความ

กฎข้อที่ 18 : กฎการแปลงอิลีเมนต์โฟลว์ลำดับ

อิลีเมนต์โฟลว์ลำดับที่ออกจากเกตเวย์หรือที่เข้าเกตเวย์จะถูกแปลงเป็น 1 ทรานซิชัน ถ้าเป็นกรณีอื่นอิลีเมนต์โฟลว์ลำดับจะไม่ปรากฏในโมเดลซีพีเอ็นเพราะอิลีเมนต์โฟลว์ลำดับจะถูกลดรูปไปในขั้นตอนการต่อโครงสร้างซีพีเอ็นตามกฎข้อที่ 19

กฎข้อที่ 19 : การต่อโครงสร้างซีพีเอ็น

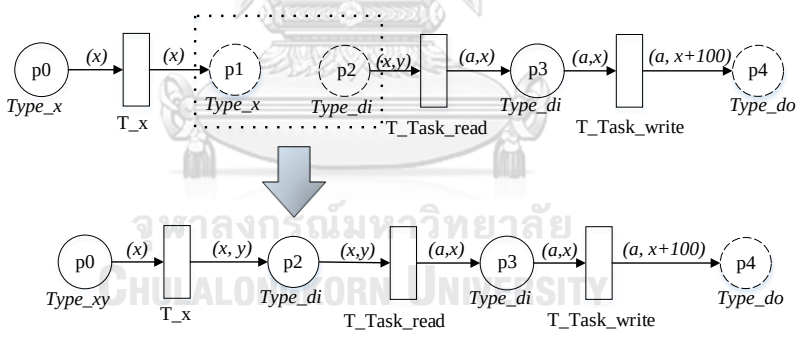
หลังจากแปลงแต่ละอิลีเมนต์ไปเป็นโครงสร้างซีพีเอ็นแล้วโครงสร้างซีพีเอ็นที่ได้จะถูกนำไปต่อกันตามลำดับของอิลีเมนต์ การต่อโครงสร้างซีพีเอ็นจะเริ่มจากโครงสร้างซีพีเอ็นของอิลีเมนต์เริ่มต้นแต่ละอิลีเมนต์จะถูกนำไปต่อกันจนครบทุกพาร์ทิชันและครบทุกพูล จากนิยามซีพีเอ็นในหัวข้อ 3.1.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กำหนดให้กฎการต่อโครงสร้างซีพีเอ็นมีเงื่อนไขดังนี้ ให้โครงสร้างซีพีเอ็นของอิลีเมนต์แรก คือ CP1 = (P1, T1, A1, Σ1, V1, C1, G1, E1, I1) โครงสร้างซีพีเอ็นของอิลีเมนต์ที่สอง CP2 = (P2, T2, A2, Σ2, V2, C2, G2, E2, I2) ให้ p1 ∈ PP1 เป็นเพลสนำออกของ CP1 และ p2 ∈ PP2 เป็นเพลสนำเข้าของ CP2 การเชื่อมต่อกันระหว่างโครงสร้างซีพีเอ็นของ CP1 และ CP2 จะถูกเชื่อมต่อที่เพลส p1 และ p2 จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นโมเดลซีพีเอ็นที่มีโครงสร้าง CPN = (PC, TC, AC, ΣC, VC, CC, GC, EC, IC) โดยที่

- PC = (P1 ∪ P2) \ {p1}
- TC = T1 ∪ T2
- AC = A1 ∪ A2
- ΣC = Σ1 ∪ Σ2
- VC = V1 ∪ V2
- C = (C1 ∪ C2)\{(p1, col) |col = C (p1)}
- GC= G1 ∪ G2
- EC = (fE1 ∪ fE2)\{((t1, p1), a_ex)|a_ex=E(t1, p1) ∧ t1 ∈ T1}∪ {((t1, p1), a_ex) | ((t1, p1) ∈ A1 ∧ t1 ∈ T1 ∧ a_ex = E((t1, p1)) * E(p2, t2)\(E(t1, p1)) ∧ t2 ∈ T2 ∧ (p2, t2) ∈ A2}
- IC = I1 ∪ I2

จากเงื่อนไขการต่อโครงสร้างซีพีเอ็นข้างต้น ตัวอย่างการต่อโครงสร้างซีพีเอ็นแสดงในรูปที่ 3-23



รูปที่ 3-23 ตัวอย่างการต่อโครงสร้างซีพีเอ็น

จากตัวอย่างการต่อโครงสร้างซีพีเอ็นแสดงตามรูปที่ 3-23 เพลส p1 จะถูกแทนที่ด้วยเพลส p2 และอินสคริปชันของอาร์กนำออกของทรานซิชัน T_x จะถูกเปลี่ยนจาก (x) เป็น (x, y) สาเหตุที่ต้องเพิ่มตัวแปร y เข้าไปเนื่องจากทรานซิชัน T_Task_read ต้องการข้อมูลนำเข้า (x, y)

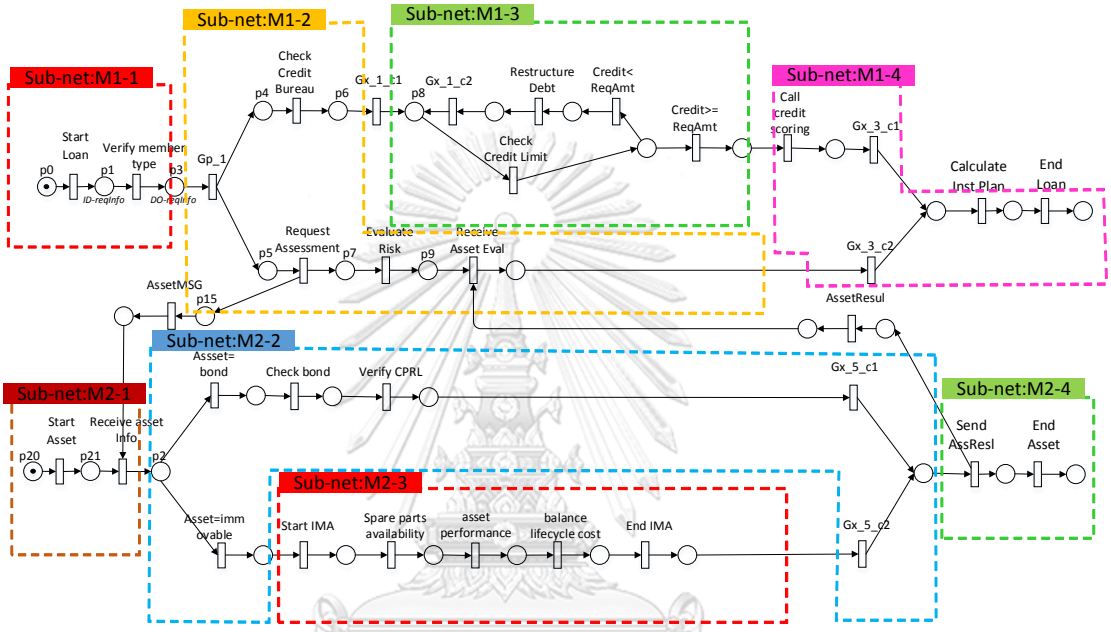
กฎข้อที่ 20 : การกำหนดขอบเขตของเพลส

ทุกเพลสที่ถูกสร้างจะถูกกำหนดให้มีค่าขอบเขตให้บรรจุโทเค็นได้มากสุด 1 โทเค็น

กฎข้อที่ 21 : การแปลงอินสคริปชัน

ทุกอินสคริปชันถูกอ่านมาโดยตรงจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น อินสคริปชันที่นำมาจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นประกอบด้วย

1) เงื่อนไขที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์
2) โอเปอร์เรชันที่ระบุไว้ในแต่ละทาสก์



รูปที่ 3-24 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นในรูปที่ 3-4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

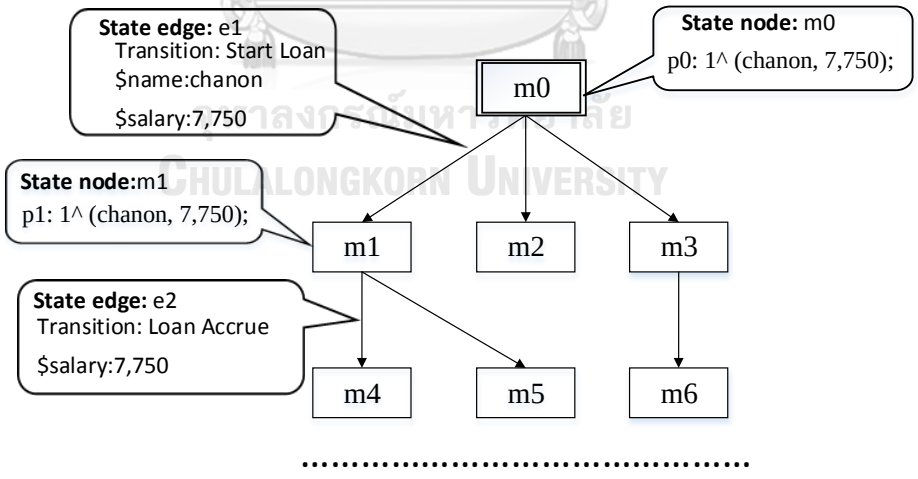
จากรูปที่ 3-24 จะเห็นได้ว่าพาร์ทิชันของโมเดลยังเหมือนเดิม โดยพาร์ทิชันที่แสดงในโมเดลซีพีเอ็นมีชื่อเรียกว่า สับเน็ต (Sub-net) ผู้ออกแบบโมเดลสามารถเลือกแต่ละสับเน็ตไปสร้างปริภูมิสถานะหรือปรับแต่งโมเดลได้อย่างอิสระอีกทั้งสามารถจัดโครงสร้างของโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้นได้ โดยรายละเอียดของการปรับแต่งโมเดลและการสร้างปริภูมิสถานะอธิบายในบทที่ 4

บทที่ 4
การสร้างและค้นปริภูมิสถานะ

บทนี้อธิบายเกี่ยวกับองค์ประกอบของปริภูมิสถานะและขั้นตอนการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น โมเดลที่นำมาสร้างปริภูมิสถานะเป็นโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงโมเดลตามวิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 เนื้อหาแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก คือ 1) โครงสร้างข้อมูลของปริภูมิสถานะ 2) การปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น 3) การสร้างปริภูมิสถานะด้วยเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะ และ 4) การค้นปริภูมิสถานะ รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

4.1. โครงสร้างข้อมูลของปริภูมิสถานะ

หลังจากที่ได้โมเดลซีพีเอ็นจากขั้นตอนการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น ปริภูมิสถานะจะถูกสร้างโดยการจำลองทุกสถานะที่เป็นไปได้ของระบบจากมาร์คกิงเริ่มต้น เรียกข้อมูลนั้นว่ากราฟการเข้าถึงหรือปริภูมิสถานะ บางงานวิจัยเรียกว่ากราฟการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ (Occurrence graph) องค์ประกอบของกราฟการเข้าถึงประกอบด้วยโหนดสถานะ (State nodes) หรือมาร์คกิง, และข้อมูลการเปลี่ยนสถานะเก็บบนเส้นสถานะ (State edges) แต่ละโหนดสถานะที่อยู่ในปริภูมิสถานะเก็บค่าโทเค็นคัลเลอร์และทรานซิชันที่ทำการยิงโทเค็น โหนดสถานะและเส้นสถานะมีไว้เพื่อใช้ในการค้นปริภูมิสถานะและใช้แสดงตัวอย่างเหตุการณ์ (Counter example) รูปที่ 4-1 แสดงองค์ประกอบของกราฟการเข้าถึง



รูปที่ 4-1 องค์ประกอบของกราฟการเข้าถึง

จากรูปที่ 4-1 ทั้งโหนดสถานะและเส้นสถานะมีรหัสอ้างอิง เช่น โหนดสถานะ m0 คือรหัสอ้างอิงของโหนดเริ่มต้น และ e1 คือรหัสอ้างอิงของเส้นสถานะที่แสดงการเปลี่ยนสถานะจาก m0 เป็น m1 ในโหนดสถานะมีข้อมูลการกระจายของโทเค็น เช่น สถานะ m0 แสดงการกระจายโทเค็นที่

มีโทเค็นอยู่ที่เพลส p0 โดยโทเค็นคัลเลอร์ “chanon” และ 7750 ในขณะที่การเปลี่ยนสถานะจาก m0 ไป m1 แสดงด้วยข้อมูลเส้นสถานะที่ e1 ซึ่งค่าข้อมูลคือ ทรานซิชัน “Start Loan” ได้รับโทเค็นคัลเลอร์ “chanon” และ 7750 แล้วทรานซิชันยิงโทเค็นไปยังเพลส p1 ด้วยค่า “chanon” และ 7750 ตามข้อมูลที่ปรากฏในสถานะ m1 ทั้งนี้ข้อมูลที่อยู่ในโหนดสถานะอาจมีการเก็บค่าผลการประเมินค่ายืนยงที่เป็นค่าจริงหรือเท็จเพื่อใช้ในการควบคุมการสร้างปริภูมิสถานะด้วย

ข้อมูลของเส้นสถานะคือไบด์ดิงอิลีเมนต์ที่แสดงข้อมูลลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน โดยที่ไบด์ดิงอิลีเมนต์เก็บข้อมูลทรานซิชันและข้อมูลค่าของตัวแปรแต่ละตัวแปรที่ทำให้ทรานซิชันนั้นถูกเปิดและทรานซิชันนั้นได้ยิงโทเค็นออกไป ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนสถานะของระบบ ตัวอย่างเช่น m0 $\overset{b}{\rightarrow}$ m1 โดยที่สัญลักษณ์ $\overset{b}{\rightarrow}$ คือไบด์ดิงอิลีเมนต์ที่เป็นคู่อันดับ (Ordered Pairs) ของรหัสอ้างอิงสถานะในอิลีเมนต์ยืดเหนี่ยวประกอบด้วยข้อมูล 2 ส่วนคือ

1) รหัสอ้างอิงทรานชันที่ทำการยิงโทเค็น
2) ตัวแปรและค่าตัวแปรที่ทำให้เกิดการยิงโทเค็น

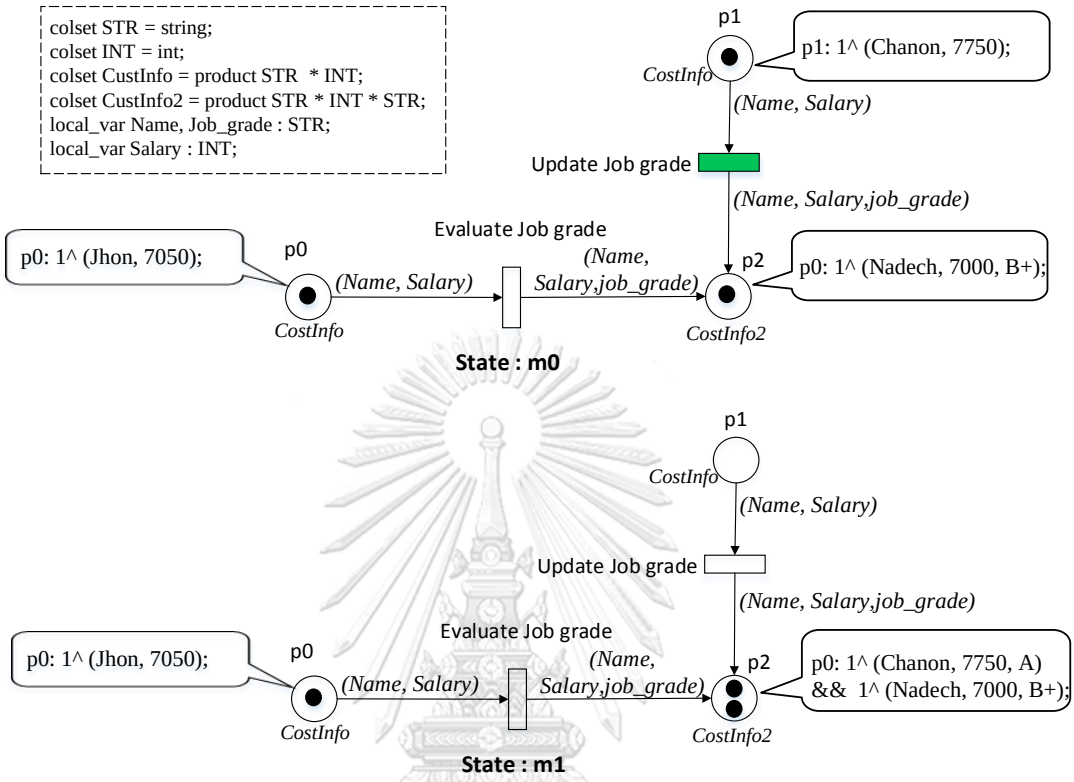
จากรูปที่ 4-1 หากต้องการทราบค่าข้อมูลการเปลี่ยนสถานะจาก m0 $\overset{\mathrm{b}}{\rightarrow}$ m4 ไบด์ดิงอิลีเมนต์ประกอบด้วยเส้นสถานะ e1 และ e2 ตามลำดับ โดยที่เส้นสถานะ e1 มีค่าเท่ากับ (Start loan, “Chanon”, 7750) และ e2 มีค่าเท่ากับ (Loan Accrue, 7750) หมายความว่า จากสถานะ m0 ระบบไปยังสถานะ m4 เกิดจากการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Start loan และทรานซิชัน Loan Accrue ตามลำดับ

เนื่องจากข้อมูลสถานะจะมีค่าข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Duplicate value) เพื่อลดการเก็บค่าข้อมูลซ้ำซ้อนจึงจำเป็นต้องมีการแชร์โทเค็นคัลเลอร์เพื่อลดการใช้หน่วยความจำในการจัดเก็บปริภูมิสถานะ รูปที่ 4-2 (a) แสดงการเปลี่ยนสถานะจาก m0 ไปยัง m1 ที่เป็นการยิงโทเค็นของโมเดลซีพีเอ็นของทรานซิชัน Update job grade, รูปที่ 4-2 (b) แสดงโครงสร้างปริภูมิสถานะ จะเห็นได้ว่าการจัดเก็บข้อมูลปริภูมิสถานะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ระดับ เมื่อพิจารณาสถานะ m0 และ m1 จะพบว่ามีการแชร์โทเค็นคัลเลอร์ระหว่างสถานะ คุณสมบัติของข้อมูลแต่ละระดับมีดังนี้

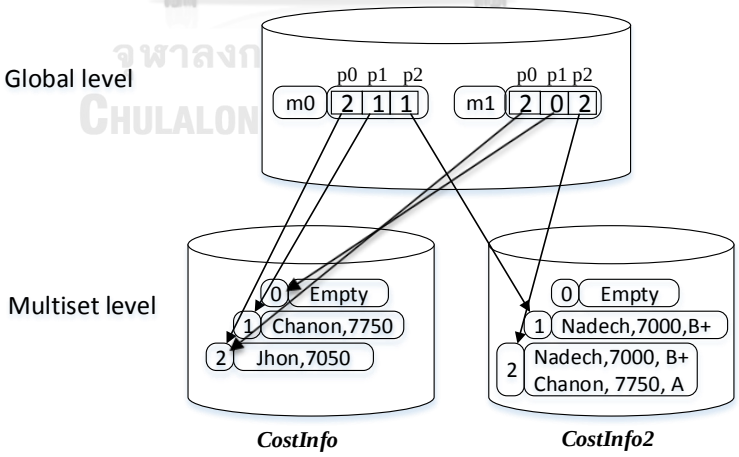
1. ข้อมูลระดับมัลติเซ็ต (Multi set level): แต่ละเพลสของโมเดลซีพีเอ็นมีคัลเลอร์เซ็ตบ่งบอกชนิดข้อมูลที่บรรจุอยู่ในโทเค็น แต่ละคัลเลอร์เซ็ตจะถูกสร้างเป็นกุญแจคัลเลอร์ (Color keys) เพื่อใช้ในการแชร์ค่าข้อมูลและเข้าถึงค่าข้อมูลในปริภูมิหนึ่งๆ จะมีรายการกุญแจคัลเลอร์ที่ไม่ซ้ำกันเช่น รูปที่ 4-2 (b) กุญแจคัลเลอร์คือ CustInfo และ CustInfo2, และระบบใช้ดัชนี (Index) ในการเข้าถึงค่าข้อมูลในระดับมัลติเซ็ต
2. ข้อมูลระดับโกลบอล (Global level): เป็นข้อมูลระดับสถานะระดับสูงสุดของปริภูมิสถานะ คำค้นปริภูมิสถานะจะเข้าถึงข้อมูลระดับโกลบอลเป็นขั้นแรก จากรูปที่ 4-2 (a) สถานะ m0 ดัชนีที่ 0 คือเพลส p0, ดัชนีที่ 1 คือเพลส p1 และดัชนีที่ 2 คือเพลส p2 ซึ่งหมายถึงเพลสที่มีโทเค็นอยู่ขณะนั้น เมื่อระบบเปลี่ยนสถานะไปเป็น m1 จะเหลือ 2 ดัชนี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยที่ดัชนีที่ 0 คือเพลส p0 ยังชี้ไปที่ข้อมูลมัลติเซ็ต, และดัชนีที่ 1 คือเพลส p2 ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากดัชนีที่ 1 เป็นดัชนีที่ 2



(a) Explicit states of transition firing (Update Job grade)



(b) Data structure of the state space

รูปที่ 4-2 โครงสร้างข้อมูลปริภูมิสถานะ

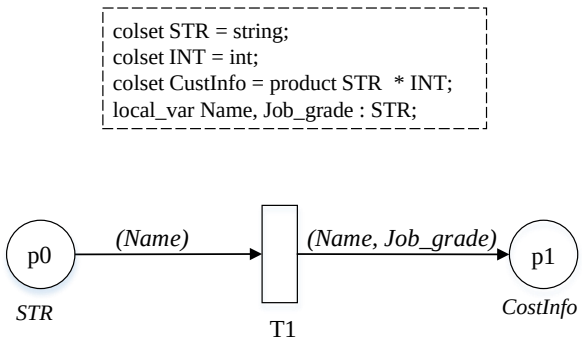
4.2. การปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็นก่อนสร้างปริภูมิสถานะ

โมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงในบทที่ 3 ยังไม่สามารถนำไปสร้างปริภูมิสถานะได้เนื่องจากโมเดลยังขาดข้อมูลที่จำเป็นบางส่วน สาเหตุหลักเกิดจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไม่รองรับการระบุรายละเอียดในส่วนนั้นลงไปในโมเดล เช่น ข้อมูลที่ผ่านเกตเวย์ รวมถึงการเขียนอินสคริปชันที่ระบุในโมเดลอาจมีข้อผิดพลาดที่ไม่เป็นไปตามวากยสัมพันธ์ (Syntax) ของภาษาโปรแกรม หรือในกรณีที่โมเดลมีขนาดใหญ่ ผู้ใช้งานอาจจะแบ่งการการทวนสอบออกเป็นส่วนย่อยเพื่อให้การทวนสอบง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม การปรับแก้โมเดลที่อาจส่งผลให้ผลของการทวนสอบไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากการปรับแต่งโมเดลเป็นการแก้ไขเพิ่มเติมโมเดลซีพีเอ็นไม่ใช่การปรับแต่งโมเดลต้นฉบับที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น การปรับแต่งและการใส่รายละเอียดเพิ่มเติมลงไปในโมเดลซีพีเอ็นสามารถทำได้ดังนี้

4.2.1. การปรับแต่งคุณสมบัติของเพลส

จากนิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นในหัวข้อ 3.1.6 แต่ละเพลสของโมเดลซีพีเอ็นสามารถกำหนดคัลเลอร์เซ็ตและค่าขอบเขตของเพลสได้ โดยคัลเลอร์เซ็ตที่นำมาใช้กำหนดให้กับเพลสจำเป็นต้องถูกประกาศไว้ อีกทั้งคัลเลอร์เซ็ตและชนิดตัวแปรที่อยู่ในอินสคริปชันของอาร์กต้องสัมพันธ์กับ ตัวอย่างการปรับแต่งคุณสมบัติของเพลสแสดงในรูปที่ 4-3 จากรูปจะเห็นได้ว่าคัลเลอร์เซ็ตของเพลส p0 คือ STR ซึ่งหมายถึงเพลส p0 บรรจุโทเค็นคัลเลอร์ที่เป็น string เท่านั้น และเมื่อพิจารณาที่อาร์กนำเข้ามีอินสคริปชัน (name) ที่เป็นตัวแปรที่มีคัลเลอร์เซ็ตเป็น string ที่สอดคล้องกัน ในทำนองเดียวกัน เพลส p1 ก็มีคัลเลอร์เซ็ต custInfo ที่ชนิดตัวแปรสอดคล้องกับอินสคริปชันของอาร์กนำออก (Name, Job_grade)

ค่าขอบเขตของเพลสมีไว้กำหนดจำนวนโทเค็นสูงสุดที่เพลสนั้นรองรับโทเค็นได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีไว้สำหรับทดสอบการทำงานแบบขนาน ผู้ออกแบบโมเดลสามารถกำหนดค่าขอบเขตของเพลสได้ตั้งแต่ 1 ขึ้นไป โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 (ตามกฎการแปลงอิลีเมนต์ข้อที่ 20 ในบทที่ 3) อย่างไรก็ตาม ค่าขอบเขตมีผลโดยตรงต่อขนาดของปริภูมิสถานะดังนั้นผู้ออกแบบควรกำหนดค่าขอบเขตของเพลสให้เหมาะสม

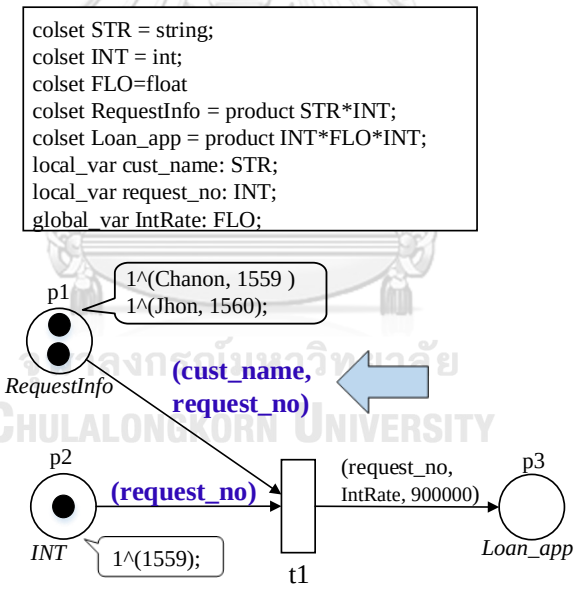


รูปที่ 4-3 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติให้กับเพลส

4.2.2. การปรับแต่งอินสคริปชันของอาร์ก

จากหัวข้อ 4.2.1. อินสคริปชันที่อยู่บนอาร์กนำเข้าและอาร์กนำออกจะต้องมีคัลเลอร์เซ็ตสอดคล้องกับคัลเลอร์เซ็ตของเพลส โดยปกติแล้วอินสคริปชันได้มาจากการกฎการแปลงทาสก์ที่มีการกำหนดข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออก แต่ในกรณีที่ไม่มีการกำหนดข้อมูลนำเข้าหรือนำออกให้กับทาสก์เมื่อแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลซีพีเอ็นแล้วผู้ออกแบบจำเป็นต้องระบุอินสคริปชันของอาร์กให้สมบูรณ์ ข้อกำหนดของการเขียนอินสคริปชันของอาร์กมีดังนี้

1) อาร์กนำเข้า : โทเค็นคัลเลอร์ที่อยู่ในเพลสนำเข้าจะถูกส่งผ่านอินสคริปชันที่อยู่บนอาร์กนำเข้าด้วยตัวแปรโลคอล รูปที่ 4-4 แสดงตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำเข้า อินสคริปชัน (cust_name, request_no) แสดงรายการตัวแปรที่นำมาใช้ในการส่งโทเค็นคัลเลอร์จากเพลส p1 ไปยังทรานซิชัน t1 จะเห็นได้ว่าตัวแปร cust_name, request_no เป็นตัวแปรโลคอลที่มีชนิดตัวแปรเป็น string และ int ตามลำดับ โดยตัวแปร cust_name จะรับค่า chanon และตัวแปร request_no รับค่า 1559 ถ้าผู้ออกแบบต้องการเปลี่ยนตัวแปรที่จะใช้ส่งผ่านโทเค็นคัลเลอร์ ตัวแปรที่ใช้ต้องเป็นตัวแปรโลคอลและชนิดตัวแปรต้องสอดคล้องกับโทเค็นคัลเลอร์ RequestInfo

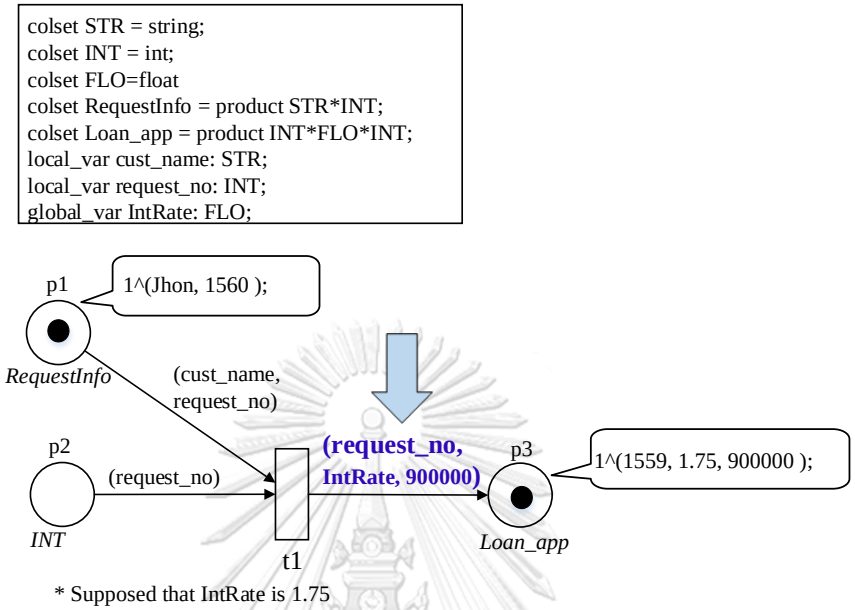


รูปที่ 4-4 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำเข้า

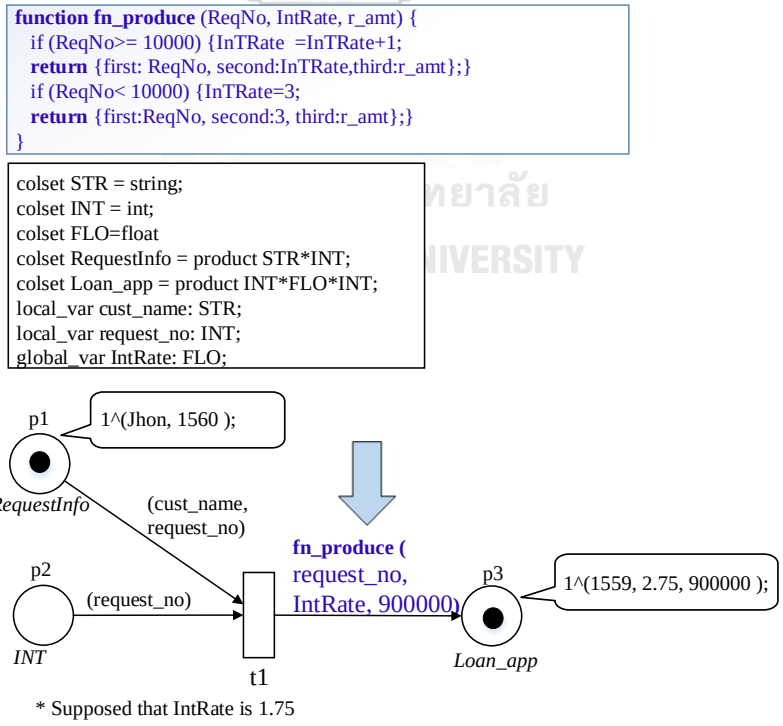
2) อาร์กนำออก: อินสคริปชันของอาร์กนำออกเป็นส่วนที่สำคัญต่อการกำหนดโทเค็นคัลเลอร์ให้กับเพลสนำออก การกำหนดอินสคริปชันให้กับอาร์กนำออกมี 2 ลักษณะคือ

การส่งค่าทางตรง: การส่งค่าทางตรงเป็นการนำเอาตัวแปรโลคอลที่อยู่ในอาร์กนำเข้า, ตัวแปรโกลบอล หรือเป็นค่าคงที่มาใช้ในการส่งค่าโดยตรงไปยังเพลสนำออก รูปที่ 4-5 แสดงตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าทางตรง จากรูปจะเห็นได้ว่าอิน

สคริปชัน (request_no, IntRate, 900000) เป็นการใช้ตัวแปรโลคอล request_no, ตัวแปรโกลบอล IntRate และค่าคงที่ 900000 มาใช้ส่งโทเค็นคัเลอร์ไปยังเพลส p3 โดยการส่งค่าดังกล่าวไม่มีการทำโอเปอร์เรชันกับตัวแปรหรือค่าคงที่ที่อยู่ในอาร์กอินสคริปชัน



รูปที่ 4-5 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าทางตรง

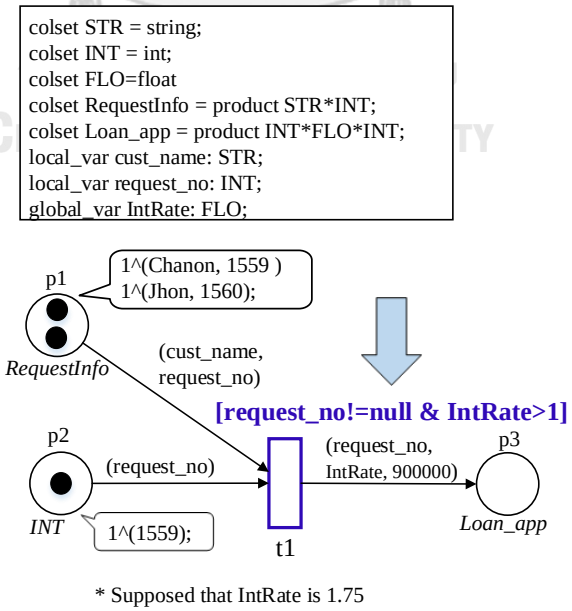


รูปที่ 4-6 ตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าเชิงฟังก์ชัน

การส่งค่าเชิงฟังก์ชัน: ในกรณีที่ใช้โอเปอร์เรชันสำหรับสร้างโทเค็นคัลเลอร์ หรือต้องการเขียน/อ่านค่าตัวแปรกลาง การเขียนอินสคริปชันเชิงฟังก์ชันเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับอาร์กนำออก รูปที่ 4-6 แสดงตัวอย่างอินสคริปชันของอาร์กนำออกแบบส่งค่าเชิงฟังก์ชัน โดยอาร์กนำออกเรียกใช้ฟังก์ชัน fn_produce และส่งค่าผ่านตัวแปร ReqNo, IntRate และ r_amt ตามลำดับ ภายในฟังก์ชันมีโอเปอร์เรชันตรวจสอบช่วงของค่าข้อมูลของตัวแปร ReqNo และมีการเพิ่มค่าให้กับตัวแปรโกลบอล IntRate หลังจากนั้นมีการให้ผลลัพธ์ในคำสั่ง return ซึ่งเป็นคำสั่งสร้างโทเค็นคัลเลอร์ไปยังเพลส p3

4.2.3. การปรับแต่งเงื่อนไขของทรานซิชัน

เงื่อนไขของทรานซิชันในโมเดลซีพีเอ็นได้จากเงื่อนไขที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น หรือได้จากโอเปอร์เรชันของทาสก์ (ตามกฎการแปลงเกตเวย์ หรือทาสก์) หลังจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นถูกแปลงไปเป็นโมเดลซีพีเอ็นแล้ว ผู้ออกแบบสามารถแก้ไขปรับปรุงสร้างเงื่อนไขให้กับแต่ละทรานซิชันได้ โดยตัวแปรที่ใช้สร้างเงื่อนไขให้กับทรานซิชันอาจจะเป็นตัวแปรโลคอลที่อยู่ในอาร์กนำเข้า, ตัวแปรโกลบอล หรือเป็นค่าคงที่ก็ได้ แต่ผลการประเมินเงื่อนไขต้องมีค่าเป็นจริงหรือเท็จเท่านั้น ถ้าการเขียนเงื่อนไขนั้นไม่เป็นไปตามวากยสัมพันธ์ของภาษาโปรแกรมเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะจะหยุดการทำงาน รูปที่ 4-7 แสดงตัวอย่างเงื่อนไขของทรานซิชัน จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขเงื่อนไขของทรานซิชัน t1 คือ request_no!=0 & IntRate > 1 จากเงื่อนไขดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตัวแปร request_no เป็นตัวแปรโลคอล ในขณะที่ตัวแปร IntRate เป็นตัวแปรโกลบอล และเมื่อแทนตัวแปรด้วยโทเค็นคัลเลอร์จะได้ 1559 != null & 1.75 > 1 ซึ่งผลการประเมินเงื่อนไขมีค่าเป็นจริง ทรานซิชัน t1 จึงถูกเปิดและสามารถยิงโทเค็นไปยังเพลส p3 ได้



รูปที่ 4-7 ตัวอย่างอินสคริปชันที่เป็นเงื่อนไขของทรานซิชัน

4.3. การสร้างปริภูมิสถานะ

ก่อนสร้างปริภูมิสถานะต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็นก่อนเสมอ ถ้าตรวจสอบพบว่าโมเดลซีพีเอ็นไม่เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้ เครื่องมือจะทำให้ไม่สามารถสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นได้

1) แต่ละทรานซิชันและแต่ละเพลสต้องมีการระบุชื่อ และชื่อต้องไม่ซ้ำกัน
2) กรณีที่สร้างปริภูมิสถานะจากการเลือกหลายสับเน็ต, สับเน็ตที่เลือกมาสร้างปริภูมิสถานะต้องมีส่วนที่เชื่อมต่อถึงกัน
3) โมเดลซีพีเอ็นต้องมีการกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้น
4) ทุกเพลสต้องมีการกำหนดคัลเลอร์เซ็ต
5) ตัวแปรที่ใช้อธิบายบนอาร์กนำออกต้องสามารถจับคู่ได้กับตัวแปรที่อยู่บนอาร์กนำเข้าหรือตัวแปรโกลบอล และอินสคริปชันนั้นต้องเป็นไปตามวากยสัมพันธ์ของภาษาโปรแกรมที่เครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะรองรับ
6) ตัวแปรโกลบอลต้องมีการกำหนดค่าเริ่มต้น

4.3.1. การสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น

หลังจากตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็นเรียบร้อยแล้ว เครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะมีหน้าที่สร้างสถานะที่เป็นไปได้ของโมเดล การสร้างปริภูมิสถานะของงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม [34] รายละเอียดแสดงในอัลกอริทึมที่ 4.1

อัลกอริทึมที่ 4.2 การสร้างปริภูมิสถานะ

Algorithm 4.1: The state space construction

01 Require: *A CPN model CPN* = (*PP, TT, AA, Σ, VV, fCC, fGG, fEA, fI*)
02 Ensure*: CPN is the finite reachable marking*
03 $\{M_0\}=fI()$
04 *work* := $\{M_0\}$
05 **While** *work* ≠ ∅
06 M_1 := select a marking from *work* by FIFO ordering
07 *work* := *work* \ $\{M_1\}$
08 *singleBinding*:=empty
09 **For** enabled(M_1): *trans*
10 **If** fire(M_1, *trans*) **then**
11 M_2:= fire(M_1, *trans*)
12 b:= binding elements of transition firing $\xrightarrow{b}$
13 **if** M_2 dose not exists in nodes **then**
14 *nodes*:= *nodes* ∪ $\{M_2\}$
15 *work*:= *work* ∪ $\{M_2\}$
16 **end if**
17 *edges*:= *edge* ∪ $\{M_1 \xrightarrow{b} M_2\}$
18 *singleBinding*:= *singleBinding* ∪ {b}
19 **End if**
20 **Next**
21 *MultiBinding(singleBinding):*
22 **End while**

รายละเอียดของอัลกอริทึมมีดังนี้

บรรทัดที่

01 ข้อมูลโมเดลซีพีเอ็นที่จะใช้สร้างปริภูมิสถานะต้องมีองค์ประกอบตามนิยาม 3.1.6

02 ตรวจสอบโมเดลซีพีเอ็นต้องเป็นโมเดลที่มีสถานะจำกัดเท่านั้น

03 อ่านค่ามาร์คกิงเริ่มต้นของโมเดลซีพีเอ็นผ่านฟังก์ชันเรียกข้อมูลมาร์คกิงเริ่มต้น fII()

04 ตัวแปร work เป็นตัวแปรที่เก็บเซ็ตของมาร์คกิงที่อยู่ในคิวการสร้างมาร์คกิงใหม่ โดยค่าแรกที่อ่านเข้าตัวแปร work คือมาร์คกิงเริ่มต้น $\{M_0\}$

05 วนลูปจนกว่าเซ็ตของมาร์คกิงในเซ็ตการทำงาน work จะเป็นเซ็ตว่าง

06 ลูปเซ็ตมาร์คกิง $\{M_1\}$ ถูกเลือกและลบออกจากเซ็ตการทำงาน work

09 เนื่องจากในเซ็ตของมาร์คกิงหนึ่งๆ สามารถทำให้ทรานซิชันถูกเปิดได้มากกว่า 1 ทรานซิชัน ดังนั้นจึงมีการวนลูปตามทรานซิชันที่ถูกเปิด

10 ถ้าเซ็ตของมาร์คกิงที่เลือกสามารถทำให้ทรานซิชันเปิดได้ ทรานซิชันนั้นจะสร้างมาร์คกิงใหม่และสร้างไบด์ดิงอิลีเมนต์ $M_1 \xrightarrow{b} M_2$ หมายความว่ามาร์คกิงที่ $\{M_1\}$ สามารถเกิดมาร์คกิง $\{M_2\}$ ตามมา โดยรายละเอียดการเกิดมาร์คกิงใหม่เป็นไปตามรายละเอียดที่ระบุใน b

13 ก่อนทำการบันทึกมาร์คกิงเป็นหนึ่งโหนดในปริภูมิสถานะ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบว่ามาร์คกิงที่สร้างมีแล้วหรือไม่

14 หากยังไม่มีในปริภูมิสถานะในเซ็ต node, จะทำการสร้างโหนดใหม่ในปริภูมิสถานะ

15 เพิ่มมาร์คกิงใหม่ที่ได้เข้าเป็นสมาชิกของเซ็ตการทำงาน work

17 สร้างเส้นเชื่อมระหว่างโหนดด้วยไบด์ดิงอิลีเมนต์ b

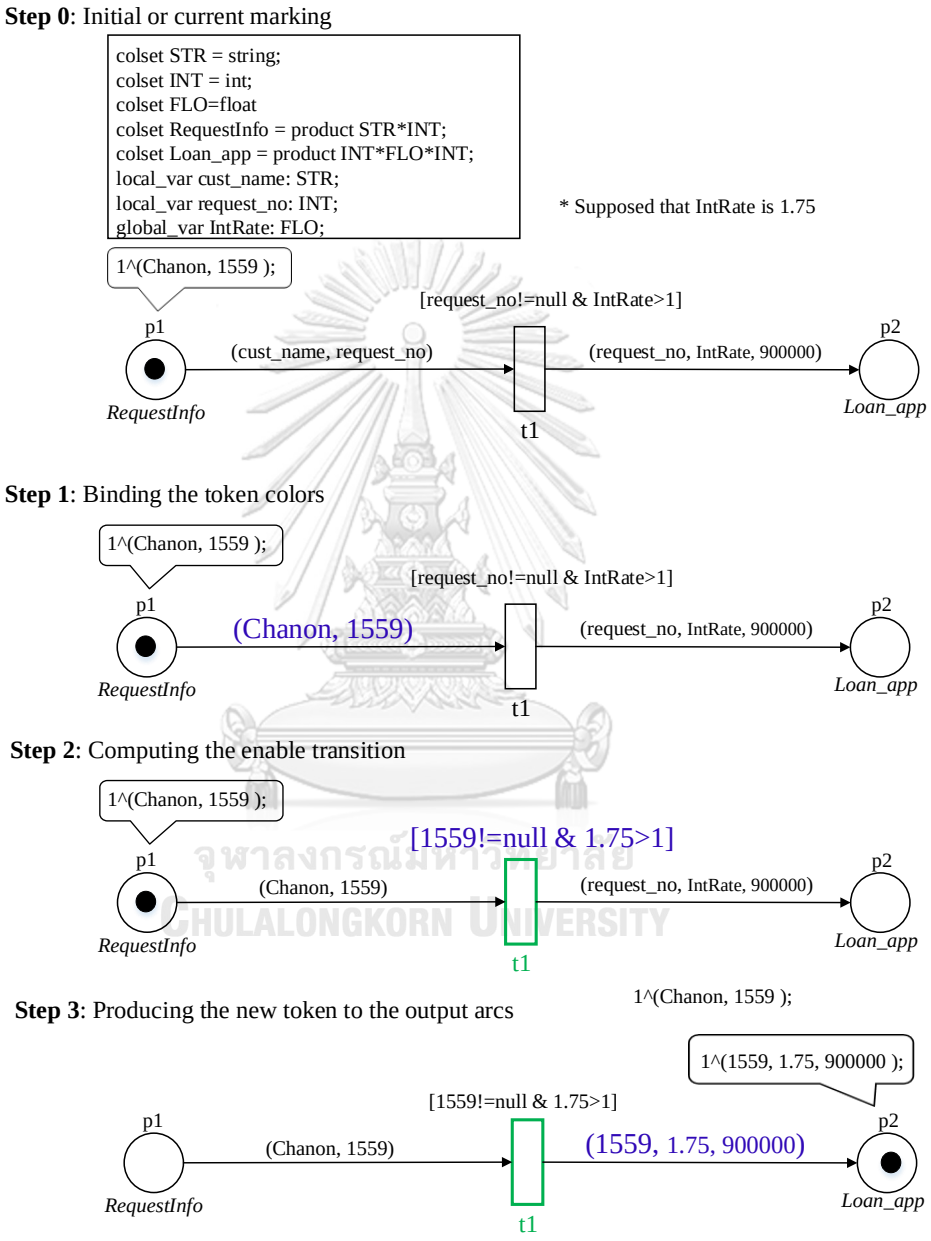
21 สร้างมัลติไบด์ดิงอิลีเมนต์จากซิงเกิลไบด์ดิงอิลีเมนต์

จากอัลกอรึทึม 4.1 การคำนวณแต่ละโหนดที่อยู่ในกราฟของปริภูมิสถานะเรียกว่า การสร้างมาร์คกิงบัพหลัง (Successor marking construction) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก, ซึ่งเป็นขั้นตอนการยิงโทเค็นของทรานซิชันนั่นเอง

1) **การไบร์ดิงโทเค็นคัลเลอร์**
   ตัวแปรที่อยู่ในอินสคริปชันของอาร์กนำเข้าจะถูกไปแทนตัวแปรที่ของโทเค็นคัลเลอร์ถ้าชื่อของตัวแปรตรงกัน โดยการเลือกโทเค็นจากเพลสนำเข้าจะคำนวณจากกรณีที่เป็นไปได้และขึ้นอยู่กับผลการประเมินเงื่อนไขของทรานซิชัน
2) **การคำนวณทรานซิชันที่ถูกเปิด**
   กรณีที่ทรานซิชันนั้นมีเงื่อนไข ตัวแปรที่อยู่ในเงื่อนไขจะถูกแทนที่ด้วยตัวค่าคัลเลอร์ที่ส่งมากับอาร์กนำเข้าหรือตัวแปรโกลบอล หลังจากนั้นทำการประเมินผลของเงื่อนไขว่ามีค่าเป็นจริงหรือเท็จ ถ้าผลการประเมินเงื่อนไขมีค่าเป็นจริงทรานซิชันนั้นจะอยู่ในสถานะถูกเปิด ในกรณีที่ทรานซิชันไม่มีการระบุเงื่อนไข การเปิดทรานซิชันจะขึ้นอยู่กับกฎการเปิดทรานซิชันของเพทริเนต

3) การสร้างโทเค็นใหม่ให้เพลสนำออก

เมื่อทรานซิชันถูกเปิด ทรานซิชันจะยิงโทเค็นไปยังเพลสนำออกโดยอาศัยอาร์กนำออก รายการโทเค็นคัลเลอร์ที่ใช้ในการเปิดทรานซิชัน, และค่าตัวแปรกลาง ชื่อทรานซิชันที่ยิงโทเค็นจะถูกจัดเก็บเป็นข้อมูลการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่เรียกว่าไบด์ดิงอิลีเมนต์



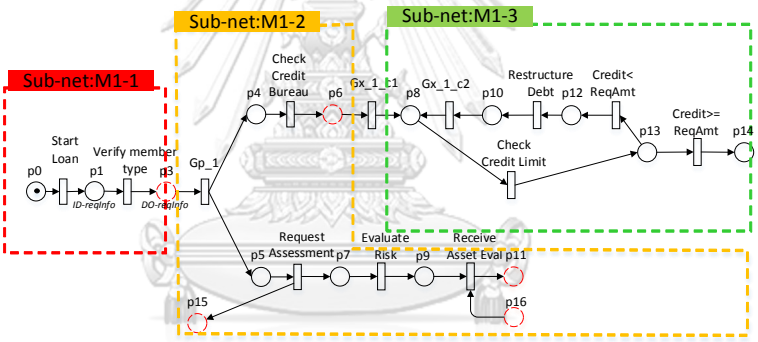
รูปที่ 4-8 ตัวอย่างขั้นตอนการสร้างมาร์คกิงบัพหลัง

รูปที่ 4-8 แสดงขั้นตอนการสร้างมาร์คกิงบัพหลัง โทเค็นคัลเลอร์ที่อยู่ในเพลส p1 ถูกนำไปแทนตัวแปรที่อยู่ในอินสคริปชันของอาร์กนำออกซึ่งมีค่า cust_name= “Chanon” และ

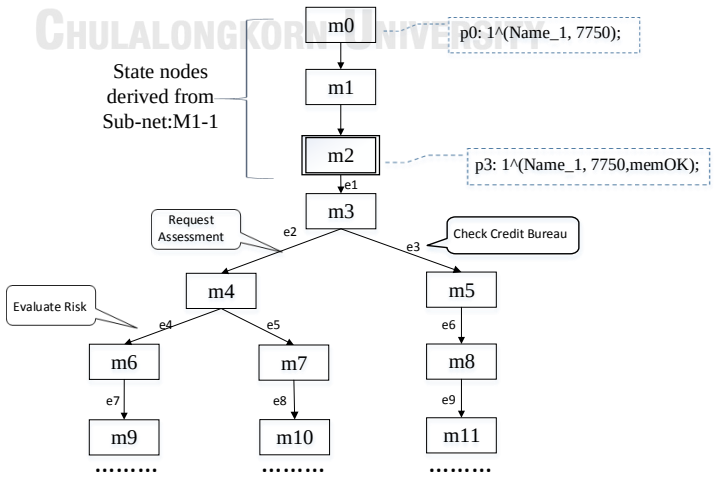
request_no= 1559 และโทเค็นคัลเลอร์ 2 ค่านี้ถูกนำไปแทนตัวแปรที่อยู่ในเงื่อนไขที่อยู่บนทรานซิชัน t1 และนำไปแทนตัวแปรที่อยู่ในอินสคริปชันของอาร์กนำออกตามลำดับ จากขั้นตอนข้างต้นทำให้ได้โทเค็น 1^(1559, 1.75, 900000); ที่อยู่ในเพลส p2

4.3.2. ปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น

ในกรณีที่โมเดลซีพีเอ็นที่มีขนาดใหญ่ผู้ออกแบบอาจใช้วิธีทวนสอบแบบทำทีละส่วนย่อยหรืออาจจัดโครงสร้างโมเดลแบบลำดับชั้น การเลือกสับเน็ตมาสร้างปริภูมิสถานะจำเป็นต้องเลือกสับเน็ตที่อยู่ติดกันซึ่งหมายถึงทุกอิลีเมนต์ในโมเดลซีพีเอ็นต้องมีอาร์กเชื่อมถึงกัน รูปที่ 4-9 (a) แสดงตัวอย่างการเลือกสับเน็ตจากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 3-24 (เลือก 3 สับเน็ตจากทั้งหมด 8 สับเน็ต) โมเดลแสดงการจัดโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น รูปที่ 4-9 (b) แสดงปริภูมิสถานะบางส่วนของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-9 (a) โดยสถานะที่ m0, m1 และ m2 เป็นสถานะที่เกิดจากสับเน็ต Sub-net:M1-1 และสถานะอื่นๆ ได้จากสับเน็ต Sub-net:M1-2



(a) non-hierarchical CPN structure



(b) state space of non-hierarchical CPN structure

รูปที่ 4-9 ตัวอย่างปริภูมิสถานะที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น

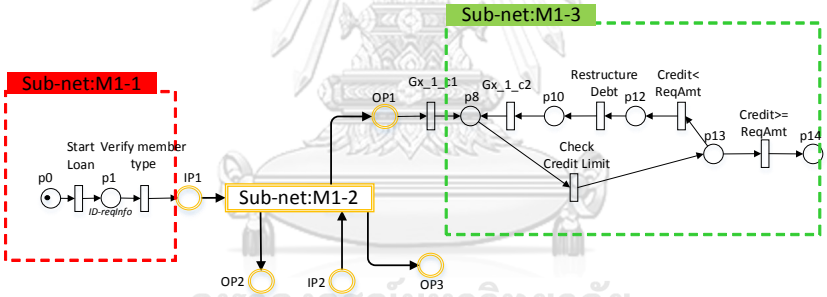
การจำลองสถานะของระบบจะดำเนินการตามการกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นและโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็น ขนาดของโมเดลซีพีเอ็นและการกำหนดโทเค็นเริ่มต้นและขนาดขอบเขตของเพลสมีผลโดยตรงต่อขนาดของปริภูมิสถานะ การหยุดสร้างสถานะของเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะจะเกิดขึ้นเมื่อเครื่องมือตรวจสอบพบเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) เมื่อไม่มีทรานซิชันใดในโมเดลซีพีเอ็นถูกเปิด

2) เมื่อมีการละเมิดเงื่อนไขค่ายืนยง ที่เป็นการใช้ประพจน์ควบคุมการสร้างปริภูมิสถานะ โดยประพจน์ถูกกำหนดเพื่อให้ติดตามค่าตัวแปรโกลบอล ถ้าผลประเมินของประพจน์มีค่าเท็จกระบวนการสร้างปริภูมิสถานะจะถูกหยุดและเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะจะรายงานว่ามีการละเมิดเงื่อนไขค่ายืนยง

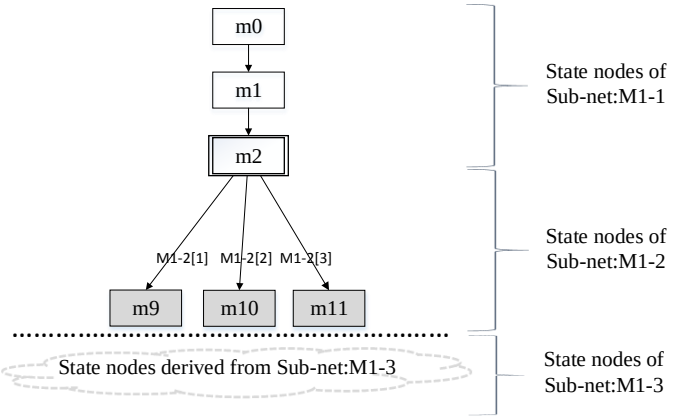
4.3.3. ปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นแบบมีโครงสร้างแบบมีลำดับชั้น

รูปที่ 4-10 (a) แสดงตัวอย่างการจัดโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้นโดยกำหนดให้สับเน็ต Sub-net:M1-2 เป็นสับเน็ตที่ถูกลดรูปให้เป็นทรานซิชันทดแทนที่มีพฤติกรรมการทำงานแบบกล่องดำ เพลสที่แสดงด้วยเส้นคู่ IP1 และ IP2 คือพอร์ทนำเข้าและเพลส OP1, OP2 และ OP3 คือพอร์ทนำออกของทรานซิชันทดแทน



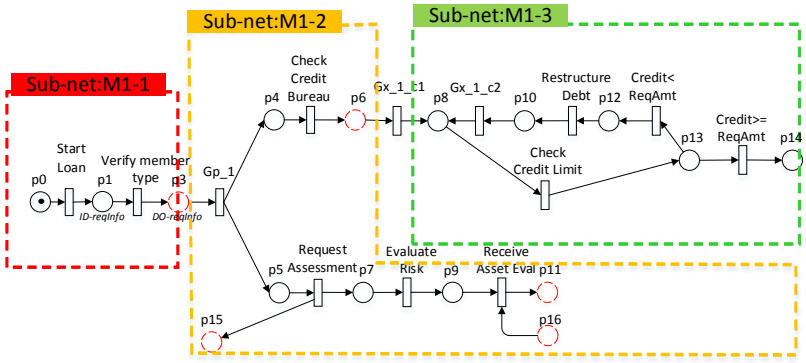
(a) hierarchical CPN structure

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

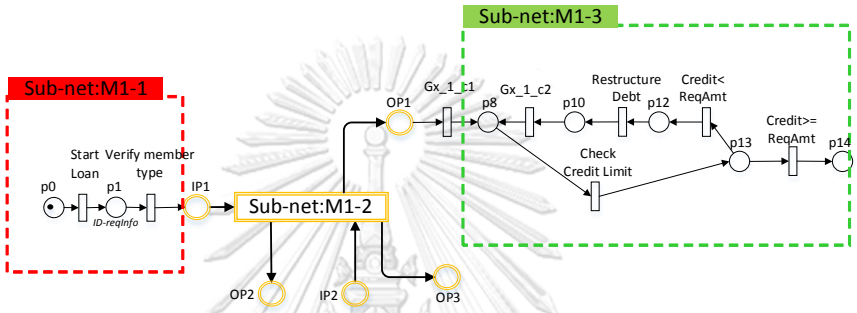


(b) state space of hierarchical CPN structure

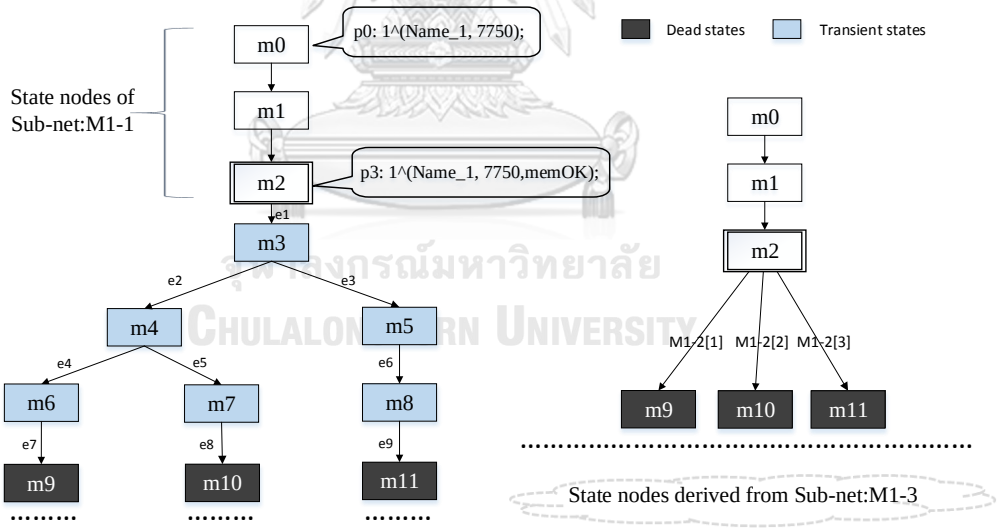
รูปที่ 4-10 ตัวอย่างปริภูมิสถานะที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้น



(a) non-hierarchical CPN structure



(b) hierarchical CPN structure by setting sub-net M1-2 to be the substituted transition



(c) state space of non-hierarchical CPN structure in figure (a)

(d) state space of hierarchical CPN structure in figure (b)

รูปที่ 4-11 เปรียบเทียบปริภูมิสถานะของซีพีเอ็นโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและมีลำดับชั้น

การสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นที่มีลำดับชั้นใช้วิธีสวิปไลน์ (Sweep-line method) [16, 67] กับส่วนที่เป็นทรานซิชันทดแทน การจำลองสถานะทำแบบเดียวกับการสร้างสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น การเก็บข้อมูลสถานะส่วนของโมเดลที่ไม่ได้ถูกจัดลำดับชั้นจะถูกจัดเก็บตามปกติ แต่การจัดเก็บข้อมูลสถานะที่ได้จากทรานซิชันทดแทนจะเก็บเฉพาะสถานะที่เป็น

มาร์คกิงตาย (Dead markings) ที่มาร์คกิงนั้นอยู่บนพอร์ทเพลสนำออกเท่านั้น รูปที่ 4-11 เปรียบเทียบการเก็บข้อมูลปริภูมิสถานะระหว่างโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและแบบมีลำดับชั้น รูปที่ 4-11 (c) แสดงปริภูมิสถานะที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น สถานะ m0, m1 และ m2 ได้จากสับเน็ต Sub-net:M1-1 ส่วนของสถานะ m3 ถึง m11 เป็นสถานะที่ได้จากสับเน็ต Sub-net:M1-2 ส่วนที่แสดงด้วยโหนดสถานะสีฟ้าเรียกว่าสถานะชั่วคราว (Transient states) และโหนดสถานะที่เป็นสีเทาคือมาร์คกิงตาย เมื่อเทียบกับรูปที่ 4-11 (d) จะเห็นได้ว่าส่วนของสับเน็ต Sub-net:M1-2 จะเก็บเฉพาะสถานะที่เป็นมาร์คกิงตายเท่านั้น ซึ่งมาร์คกิงตายจะถูกนำไปใช้ในการจำลองปริภูมิสถานะของสับเน็ตที่อยู่ติดกัน (Neighboring sub-nets) สับเน็ต Sub-net:M1-3

ตารางที่ 4-2 แสดงรายการมาร์คกิงตายที่ได้จากสับเน็ต Sub-net:M1-2 จะเห็นได้ว่ามีมาร์คกิงตาย 5 มาร์คกิง ซึ่งหมายถึงสับเน็ต Sub-net:M1-2 ให้ข้อมูลนำออกที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 กรณี จากทั้ง 3 กรณีได้โทเค็นคัลเลอร์เดียวกัน คือมีโทเค็นอยู่ในเพลส p6, p9 และ p15 รายละเอียดลำดับการยิงโทเค็นของแต่ละมาร์คกิงตายและโทเค็นคัลเลอร์แสดงในตารางที่ 4-2 จากข้อมูลไบร์ดิงที่แสดงในตารางที่ 4-1 และข้อมูลมาร์คกิงตายในตารางที่ 4-2 เมื่อข้อมูลของทรานซิชันทดแทนถูกจำลองแล้ว สถานะที่เป็นทรานซิทีฟจะไม่ถูกจัดเก็บและไบด์ดิงอิลีเมนต์จะไม่เก็บข้อมูลลำดับการยิงโทเค็นไว้ ซึ่งเครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะเก็บเพียงหมายเลขประจำแต่ละกรณีที่เป็นไปได้เอาไว้ใช้ในการตรวจสอบย้อนกลับเท่านั้น ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4-11 (b) เช่น สถานะที่ m12 มีไบด์ดิงอิลีเมนต์ M-1-2[1] หมายถึงสถานะที่ m12 ได้จากสับเน็ตที่ได้กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน M-1-2 ของเทรซผลลัพธ์ดัชนี (Trace index) ที่ 1

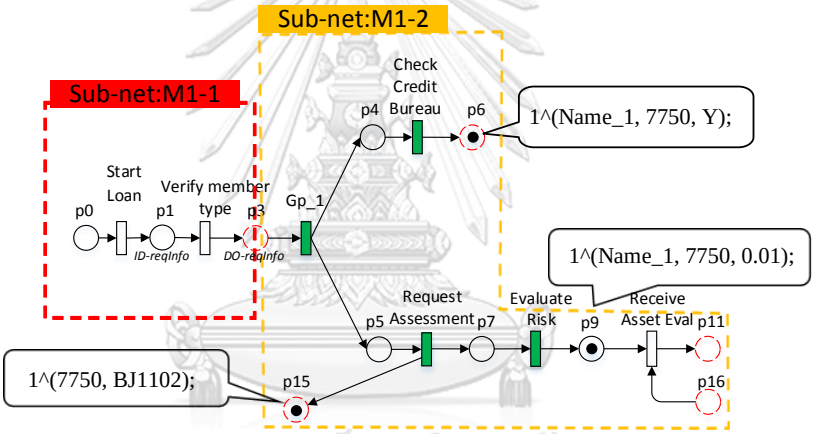
ตารางที่ 4-1 ข้อมูลไบด์ดิงอิลีเมนต์ของสับเน็ต Sub-net:M1-2

เลขที่ไบร์ดิง	ไบด์ดิงอิลีเมนต์
e1	**Gp_1**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e2	**Request_Assessment**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e3	**Check_credit_bureau**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e4	**Evaluate_Risk**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e5	**Check_credit_bureau**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e6	**Request_Assessment**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e7	**Check_credit_bureau**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e8	**Evaluate_Risk**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>
e9	**Evaluate_Risk**<[cusr_name=name_1; request_no=7750]>

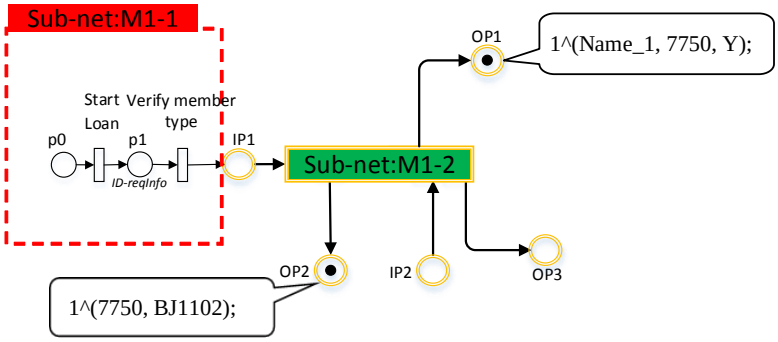
ตารางที่ 4-2 รายการมาร์คกิงตายและลำดับการยิงโทเค็นของสับเน็ต Sub-net:M1-2

เลขที่สถานะ	ลำดับการยิงโทเค็น	มาร์คกิงและโทเค็นคัลเลอร์
m9	e1, e2, e4, e7	p6: 1^(Name_1, 7750, Y);
m10	e1, e2, e5, e8	p9: 1^(Name_1, 7750, 0.01);
m11	e1, e3, e6, e9	p15: 1^(7750, BJ1102);

อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการจำลองสถานะของสับเน็ตที่เป็นทรานซิชันทดแทนจะไม่มีการยิงโทเค็นของทรานซิชันอื่นที่อยู่ต่างสับเน็ตเกิดขึ้น สมมติว่ากำลังจำลองสถานะของสับเน็ต Sub-net:M1-2 ถ้ามีทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ต Sub-net:M1-3 ถูกเปิด ทรานซิชันนั้นจะไม่สามารถยิงโทเค็นได้จนกว่าการจำลองสถานะของสับเน็ต Sub-net:M1-2 จะสิ้นสุด ซึ่งหมายความว่าสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนมีการทำงานแบบอะตอมมิค (Atomic) ที่ไม่ยอมให้มีการขัดจังหวะจากการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่อยู่ต่างสับเน็ตเกิดขึ้นได้



(a) Dead marking of non hierarchical CPN structure



(b) Dead marking of hierarchical CPN structure

รูปที่ 4-12 เปรียบเทียบมาร์คกิงตายระหว่างโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและมีลำดับชั้น

จากรูปที่ 4-12 (a) แสดงมาร์คกิงตายและโทเค็นคัลเลอร์ของสับเน็ต Sub-net:M1-2 ที่กระจายอยู่บนโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น จะเห็นได้ว่ามีโทเค็นอยู่ในเพลส p6, p9 และ p15 แต่ถ้าสับเน็ต Sub-net:M1-2 ถูกทำเป็นทรานซิชันทดแทนตามรูปที่ 4-12 (b) จะปรากฏมาร์คกิงในเพลส OP1 และ OP2 เท่านั้น (ไม่ปรากฏมาร์คกิงของเพลส p9) ซึ่งเพลส OP1 เท่ากับเพลส p6 และเพลส OP2 เท่ากับเพลส p15 ในรูปที่ 4-12 (a) สาเหตุที่ไม่ปรากฏโทเค็น p9 ใน รูปที่ 4-12 (b) เนื่องจากเพลส p9 ไม่ใช่พอร์ทเพลสนำออกของทรานซิชันทดแทน Sub-net:M1-2

ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ของสับเน็ต Sub-net:M1-2 มีข้อมูลนำออกที่เป็นไปได้ถึง 5 กรณี แต่มาร์คกิงทั้ง 5 กรณีมีค่าโทเค็นคัลเลอร์แบบเดียวกัน ดังนั้นมาร์คกิงที่นำไปจำลองสถานะของสับเน็ต Sub-net:M1-3 จะใช้เพียงค่าโทเค็นคัลเลอร์จากข้อมูลนำออกเพียงกรณีเดียวก็เพียงพอแล้ว การเลือกค่านำออกที่จะนำไปเป็นมาร์คกิงเพื่อจำลองสถานะของสับเน็ตถัดไปแสดงในภาคผนวก จ

4.4. การค้นปริภูมิสถานะ

การค้นปริภูมิสถานะเป็นการพิสูจน์ว่าโมเดลที่ออกแบบมีคุณสมบัติตรงตามต้องการหรือไม่ องค์ประกอบของคำค้นที่ใช้และลักษณะการค้นปริภูมิสถานะอธิบายในหัวข้อ 4.4.1 และ 4.4.2

4.4.1. องค์ประกอบของคำค้นปริภูมิสถานะ

การค้นปริภูมิสถานะจำเป็นต้องสร้างคำค้นที่อยู่ในรูปแบบตรรกศาสตร์เชิงกาลเวลาเพื่อค้นปริภูมิสถานะที่เก็บอยู่ในโครงสร้างต้นไม้ งานวิจัยนี้แบ่งคำค้นออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1) คำค้นพื้นฐานสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของปริภูมิสถานะ

2) คำค้นเชิงฟังก์ชันที่อิงตรรกศาสตร์เชิงกาลเวลา

คำค้นจะถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบระบบ และคำค้นถูกกำหนดตามข้อกำหนดต้องการ (Requirements specification) งานวิจัยนี้เสนอคำค้นเพื่อใช้ค้นปริภูมิสถานะดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 คำค้นที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะ

ลำดับที่	คำค้นหรือพฤติกรรมที่ต้องการค้น	แบบรูปของพฤติกรรม	เทียบเท่าตรรกศาสตร์ต้นไม้คณนา
1	แสดงทรานซิชันที่ไม่ถูกเอ็กซ์ซิคิว	คำค้นพื้นฐาน	-
2	แสดงมาร์คกิงตายของโมเดล	คำค้นพื้นฐาน	-
3	แสดงโทเค็นคัลเลอร์	คำค้นพื้นฐาน	-
4	แสดงตัวอย่างข้อมูลของการเกิดสถานะ	คำค้นพื้นฐาน	-
5	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้น	แบบรูปเชิงสมภพ	EF(ρ)

ตารางที่ 4-3 คำค้นที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะ (ต่อ)

ลำดับที่	คำค้นหรือพฤติกรรมที่ต้องการค้น	แบบรูปของพฤติกรรม	เทียบเท่าตรรกศาสตร์ต้นไม้คณนา
6	เป็นไปไม่ได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้น	แบบรูปเชิงยกเว้น	-EF(ρ)
7	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้นเป็นสถานะถัดไป	แบบรูปเชิงสมภพ	EX(ρ)
8	จะเกิดสถานะ ρ เป็นสถานะถัดไปเสมอ	แบบรูปเชิงสมภพ	AX(ρ)
9	ถ้าสถานะ ρ เกิดขึ้น หลังจากนั้นเป็นไปได้ที่จะเกิด φ ตามมา	แบบรูปเชิงผลลัพธ์	AG (ρ ⟶EF (φ))
10	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ เกิดขึ้นและอาจมีสถานะ φ เกิดขึ้นพร้อมกัน ณ ขณะนั้น	แบบรูปเชิงลำดับ	EF(ρ and EF(φ))
11	สถานะ ρ เป็นจริงเสมอ	แบบรูปเชิงยืนยง	AG(ρ)
12	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ เป็นจริงเสมอ	แบบรูปเชิงยืนยง	EG(ρ)

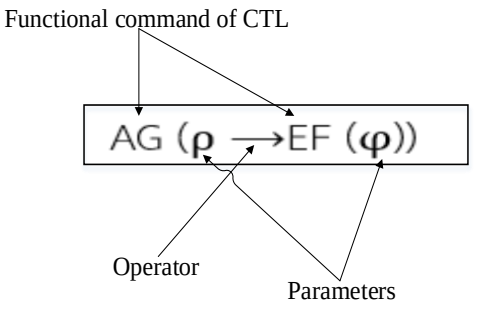
ρ , φ คือสถานะหรือประพจน์ที่ประกาศไว้เป็นตรวจสอบค่าโกลบอลระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ

เมื่อเครื่องมือได้รับคำค้นปริภูมิสถานะเครื่องมือจะแปลคำค้นโดยแยกองค์ประกอบของคำค้นและเรียงลำดับของคำค้น องค์ประกอบของคำค้นประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

1) คำสั่งเชิงฟังก์ชันที่บ่งชี้ตรรกศาสตร์ต้นไม้คณนา เช่น AG(), EF(), EX() เป็นต้น
2) พารามิเตอร์ที่แทนสถานะ หรือรหัสทรานซิชันที่ต้องการค้น
3) ตัวดำเนินการที่ประกอบด้วย ⟶ และ and
4) วงเล็บที่ใช้ในการกำหนดลำดับคำค้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4-13 แสดงตัวอย่างคำค้นและองค์ประกอบของคำค้นปริภูมิสถานะ เครื่องมือทวนสอบจะทำการแยกองค์ประกอบของคำค้นและเริ่มแปลคำค้นจากซ้ายไปขวา จากตัวอย่างคำค้น, ระบบจะค้นหาสถานะ ρ ก่อน หลังจากนั้นจึงหาสถานะ φ ภายหลัง

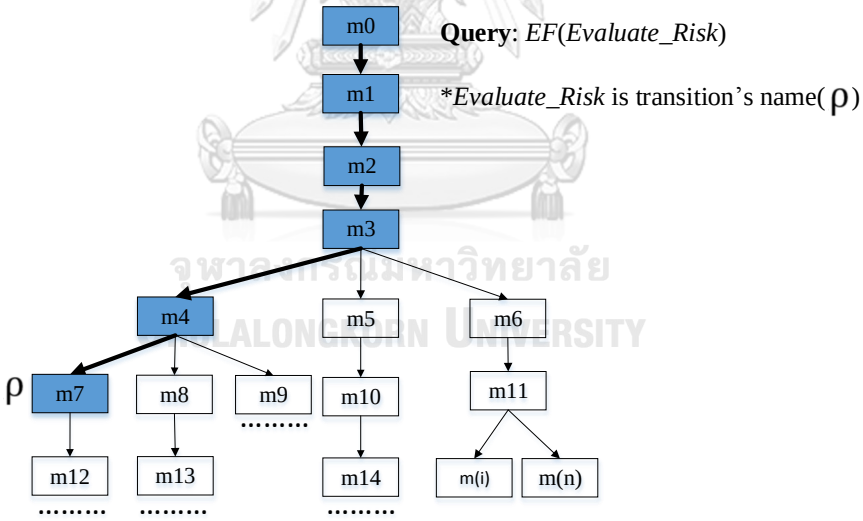


รูปที่ 4-13 ตัวอย่างคำค้นและองค์ประกอบของคำค้นปริภูมิสถานะ

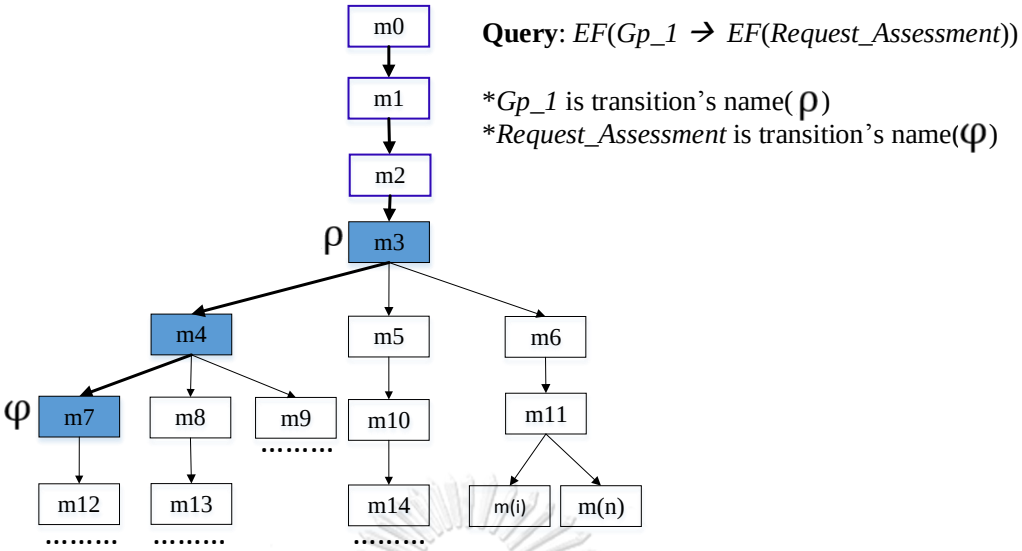
4.4.2. การแวะผ่านกราฟการเข้าถึง (Reachability graph traversal)

การแวะผ่านปริภูมิสถานะด้วยคำค้นปริภูมิสถานะของแต่ละเครื่องมือทวนสอบจะมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกันไป โดยเครื่องมือจะค้นหาสถานะเป้าหมาย (Goal State) ตามที่ผู้ใช้งานระบุในคำค้นปริภูมิสถานะ เครื่องมือจะค้นสถานะโดยแปลผลสถานะจากข้อมูลสถานะร่วมกับข้อมูลไบด์ดิงอิลีเมนต์ และประเมินผลที่ได้ว่าตรงกับสถานะเป้าหมายที่ผู้ใช้ระบุหรือไม่ และแสดงตัวอย่างข้อมูลพร้อมกับพาร์ทที่แสดงให้เห็นว่าระบบไปยังสถานะเป้าหมายนั้นได้อย่างไร

การแวะผ่านปริภูมิสถานะที่เก็บในโครงสร้างต้นไม้ของงานวิจัยนี้ใช้วิธีการค้นหาแนวลึก (Depth-first search) ตัวอย่างแผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะตามจำนวนพารามิเตอร์ที่ปรากฏในคำค้นแสดงในรูปที่ 4-14 และ รูปที่ 4-15 จากตัวอย่างรูปที่ 4-14 แสดงกรณีที่คำค้นมี 1 พารามิเตอร์ด้วยคำค้น EF(Evaluate_Risk) ซึ่งคำค้นหมายถึง “เป็นไปได้ที่การประเมินความเสียงจะเกิดขึ้นในโมเดลนี้” โดย EF คือคำค้นเชิงฟังก์ชันที่อิงตรรกศาสตร์และ Evaluate_Risk คือชื่อของทรานซิชันที่แทนทาสก์การประเมินความเสียงที่ปรากฏในโมเดลบีพีเอ็มเอ็น เครื่องมือแปลคำค้นและเริ่มแวะผ่านปริภูมิสถานะจากสถานะที่ m0 เรียงลำดับโหนดในต้นไม้เพื่อค้นหาข้อมูล “Evaluate_Risk” ที่อยู่ไบด์ดิงอิลีเมนต์ เมื่อการแวะผ่านมาถึงโหนด m7 ซึ่งโหนดที่เกิดจากการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Evaluate_Risk ทำให้เครื่องมือหยุดการแวะผ่านเพราะเจอสถานะเป้าหมายและสามารถสรุปผลคำค้นได้ว่าโมเดลที่กำลังทวนสอบมีพฤติกรรมเป็น “จริง” ตามคำค้น EF(Evaluate_Risk)



รูปที่ 4-14 แผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นแบบ 1 พารามิเตอร์



รูปที่ 4-15 แผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นแบบ 2 พารามิเตอร์

จากรูปที่ 4-15 แสดงแผนภูมิการค้นปริภูมิสถานะแบบระบุ 2 พารามิเตอร์ จากคำค้น EF(Gp_1 ⟶ EF(Request_Assessment)) หมายถึง "เมื่อมีการแตกกระบวนการคำขอกู้แล้วเป็นไปได้ที่จะมีการเรียกใช้เซอร์วิสประเมินหลักประกัน" เครื่องมือจัดลำดับคำค้นโดยให้พารามิเตอร์แรก ρ คือเหตุการณ์แตกกระบวนการ (Gp_1) ซึ่งเครื่องมือจะค้นเป็นลำดับแรก และพารามิเตอร์ที่สอง φ แทนเหตุการณ์เรียกใช้เซอร์วิสประเมินหลักประกัน การค้นปริภูมิเริ่มจากสถานะ m0 แล้วค้นหาแนวลึกจนกระทั่งถึงสถานะ m4 ที่มีข้อมูลสถานะตรงตามพารามิเตอร์แรก โดยไบด์ดิงอิลีเมนต์เป็นข้อมูลของการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Gp_1 หลังจากนั้นเครื่องมือจะแวะผ่านแนวลึกต่อไปอีกเพื่อหาสถานะที่ตรงตามพารามิเตอร์ที่สอง จนกระทั่งถึงสถานะ m7 ที่เป็นไบด์ดิงอิลีเมนต์เป็นของการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Request_Assessment เมื่อเจอสถานะเป้าหมายครบแล้วเครื่องมือหยุดการแวะผ่านและรายงานผลการทวนสอบว่าโมเดลมีพฤติกรรมเป็น "จริง" ตามคำค้น EF(Gp_1 ⟶ EF(Request_Assessment))

เนื่องจากงานวิจัยนี้เก็บข้อมูลปริภูมิสถานะไว้ในฐานข้อมูลที่มีระบบจัดการฐานข้อมูล ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้คำสั่งของระบบจัดการฐานข้อมูลในการสร้างคำค้นสถานะเป้าหมาย รายการคำค้นที่พัฒนาแสดงในภาคผนวก ค

4.5. หลักการเลือกสับเน็ตเพื่อสร้างปริภูมิสถานะและคำค้นปริภูมิสถานะ

ในกรณีที่โมเดลบีพีเอ็มเอ็นถูกแบ่งออกเป็นโมเดลย่อยๆ แล้วโมเดลย่อยเหล่านั้นถูกแปลงไปเป็นซีพีเอ็นที่แบ่งเป็นสับเน็ต การเลือกสับเน็ตไปสร้างปริภูมิสถานะมีผลโดยตรงกับขนาดของปริภูมิสถานะและคำค้นที่ใช้ รวมถึงการกำหนดสับเน็ตเป็นทรานซิชันทดแทนและการแบ่งพูลการทวนสอบมี

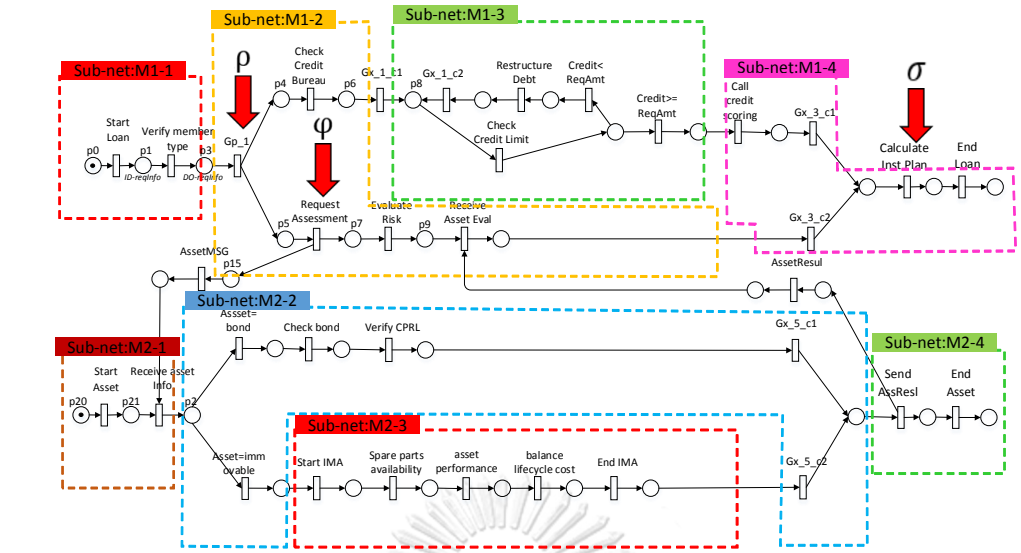
ผลต่อขนาดของปริภูมิสถานะเช่นกัน เพื่อให้การทวนสอบมีประสิทธิภาพมีหลักการเลือกสับเน็ตและวิธีการทวนสอบให้พิจารณาตามเงื่อนไขและข้อจำกัดดังต่อไปนี้

4.5.1. การพิจารณาสับเน็ตและความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตกับคำค้นปริภูมิสถานะที่ใช้

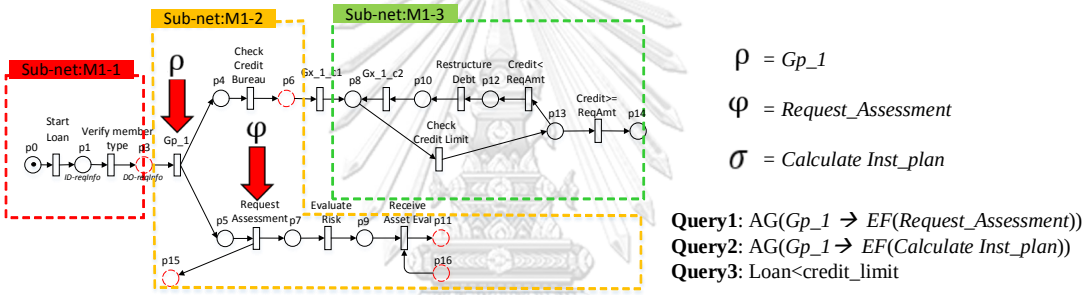
ในกรณีที่โมเดลซีพีเอ็นมีขนาดใหญ่การเลือกสับเน็ตและคำค้นปริภูมิสถานะต้องสัมพันธ์กันเสมอ ตัวอย่างสับเน็ตในรูปที่ 4-16 (a) ที่มีทั้งหมด 8 สับเน็ต สมมติว่ามีการเลือก 3 สับเน็ต (M1-1, M1-2 และ M1-3) เพื่อนำไปสร้างและค้นปริภูมิสถานะดังแสดงในรูปที่ 4-16 (b) ถ้านำโมเดลซีพีเอ็นที่เลือกไปสร้างปริภูมิสถานะและค้นด้วยคำค้นที่แสดงในรูปที่ 4-16 (c) ผลของคำค้นที่ 1 “AG(Gp_1 → EF(Request_Assessment))” เครื่องมือจะสรุปได้ว่าโมเดลนั้นมีคุณสมบัติตรงตามคำค้นหรือไม่ เพราะส่วนของสถานะ ρ (Gp_1) และ φ (Request Assessment) เป็นสถานะที่เกิดขึ้นในโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-16 (b) ในขณะที่คำค้นที่ 2 “AG(Gp_1 → EF(Calculate Inst_plan))” เครื่องมือจะสรุปว่าโมเดลในรูปที่ 4-16 (b) ไม่มีคุณสมบัติตามคำค้นเนื่องจากสถานะ σ (Calculate Inst_plan) เป็นสถานะที่อยู่ในสับเน็ต M1-4 ซึ่งอยู่ในสับเน็ตที่ไม่ได้ถูกเลือกมาสร้างปริภูมิสถานะ จากตัวอย่างข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเลือกสับเน็ตและการเขียนคำค้นมาผลต่อการค้นปริภูมิสถานะ

ในกรณีการทวนสอบค่ายืนยง เครื่องมือทวนสอบจะสรุปผลการทวนสอบค่ายืนยงว่ามีการละเมิดค่ายืนยงหรือไม่ ตัวอย่างเช่น การทวนสอบค่ายืนยงตามคำค้นที่ 3 ในรูปที่ 4-16 (c) “Loan < credit_limit” โดยที่ Loan และ credit_limit เป็นตัวแปรกลางที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็น ถ้าใช้คำค้นนี้กับปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-16 (b) หากผลการทวนสอบไม่พบการละเมิดค่ายืนยง ผลการทวนสอบนี้จะรับประกันเฉพาะส่วนของสับเน็ต M1-1, M1-2 และ M1-3 เท่านั้น ไม่รับประกันสับเน็ตอื่นของโมเดลในรูปที่ 4-16 (a) เพราะไม่ได้ถูกเลือกมาสร้างปริภูมิสถานะ ดังนั้นหากต้องการหาข้อสรุปผลการทวนสอบค่ายืนยงของโมเดลในรูปที่ 4-13 (a) ผู้ออกแบบต้องนำเพรดิเคทการตรวจสอบค่ายืนยงไปใช้กับปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-13 (a) เท่านั้นจึงจะสามารถสรุปผลได้ว่าโมเดลของระบบมีการละเมิดค่ายืนยงหรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



(a) Obtained CPN model from the transformation stage



(b) CPN model selected for state space generation

(c) State space queries

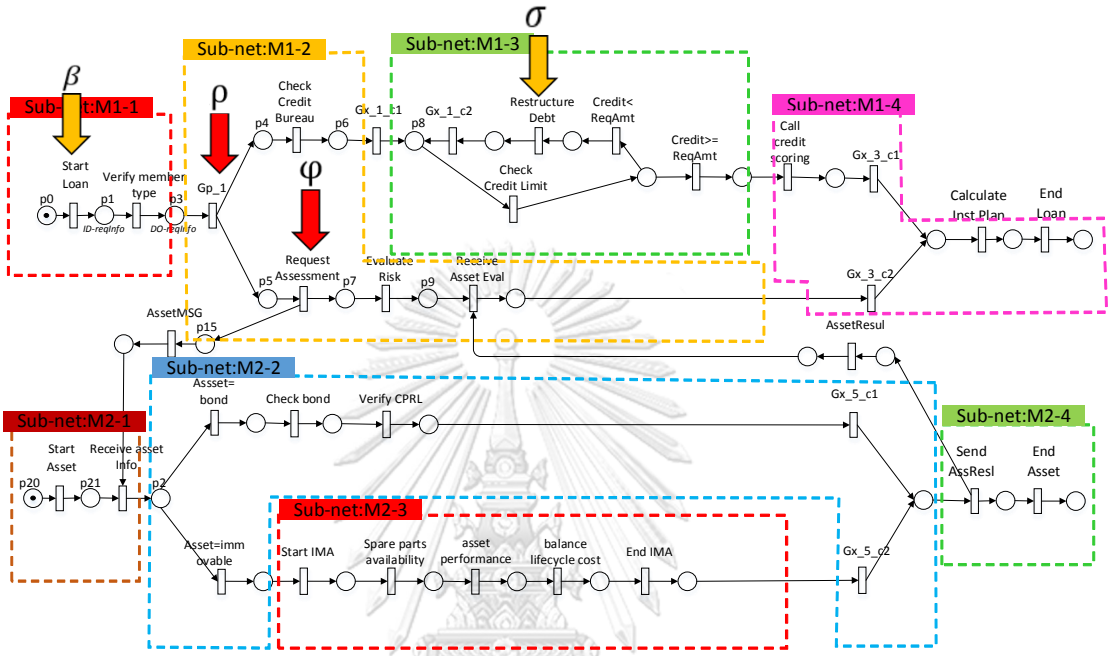
รูปที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตและคำค้นปริภูมิสถานะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

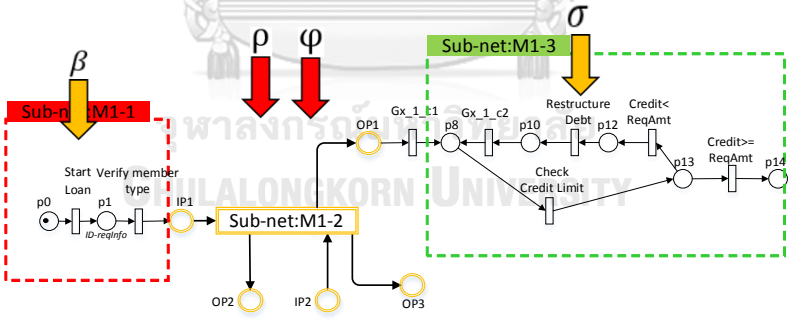
4.5.2. การพิจารณาสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนและคำค้นปริภูมิสถานะ

ถ้าสับเน็ตที่เลือกไปสร้างปริภูมิสถานะถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน แล้วคำค้นมีส่วนของสถานะที่เกิดขึ้นจากสับเน็ตที่เป็นทรานซิชันทดแทน คำค้นนั้นจะให้ผลไม่ถูกต้อง ตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกสับเน็ตตามที่แสดงในรูปที่ 4-17 (b) และให้สับเน็ต M1-2 เป็นทรานซิชันทดแทน ถ้านักออกแบบนำโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-17 (b) ไปสร้างปริภูมิสถานะและสร้างคำค้นปริภูมิสถานะตามตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 4-4 จะพบว่ามีคำค้นปริภูมิสถานะบางคำค้นให้ผลลัพธ์ว่าโมเดลไม่มีคุณสมบัตินั้น เครื่องมือจะให้ผลลัพธ์ได้ถูกต้องก็ต่อเมื่อคำค้นนั้นปรากฏสถานะที่ไม่ได้เกิดจากสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน ตัวอย่างคำค้นที่ 1 “AG(Start_loan→ EF(Restructure_debt))” สถานะ β (Start_loan) เป็นสถานะที่เกิดจากสับโมเดล M1-1 และสถานะ σ (Restructure_debt) เป็นสถานะที่เกิดจากสับโมเดล M1-3 ซึ่งทั้งสองสับเน็ตเป็นสับเน็ตที่ไม่ได้ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน แต่คำค้นลำดับที่ 2 “AG(Gp_1 → EF(Request Assessment))” เป็นคำค้นที่สถานะ ρ (Gp_1) และ φ (Request Assessment) เกิดขึ้นในสับเน็ต M1-2 ที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน

ดังนั้นคำค้นลำดับที่ 2 จะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องถ้านำคำค้นไปใช้กับปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-17 (b) เพราะสถานะของ ρ และ φ ถูกสร้างเป็นสถานะชั่วคราว รวมถึงกรณีที่คำค้นปริภูมิสถานะมีสถานะใดสถานะหนึ่งที่เกี่ยวที่เกิดจากสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน ผลลัพธ์ของคำค้นนั้นจะไม่ถูกต้องด้วยเช่นกัน



(a) Obtained CPN model from the transformation stage



(b) CPN model selected for state space generation

รูปที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนและคำค้นปริภูมิสถานะ

ตารางที่ 4-4 ตัวอย่างคำค้นที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะของปริภูมิสถานะของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-17 (b)

ลำดับที่	คำค้นปริภูมิสถานะ และคำอธิบาย	ผลของคำค้น
1	AG(Start_loan→ EF(Restructure_debt)) β (Start_loan) เป็นสถานะที่เกิดจากสับโมเดล M1-1 และสถานะ σ (Restructure_debt) ที่เกิดจากสับโมเดล M1-3 ทั้งสองสถานะเป็นสถานะที่อยู่ในระดับเดียวกันและไม่ใช่สถานะที่เกิดจากสับเน็ตเป็นทรานซิชันทดแทน	เครื่องมือสามารถ **สรุปคุณสมบัติตามคำค้นได้**
2	AG(Start_loan→ EF(Request Assessment)) β (Start_loan) เป็นสถานะที่เกิดจากสับโมเดล M1-1 แต่สถานะ φ (Request Assessment) เป็นสถานะที่เกิดจากสับเน็ต M1-2 ที่เป็นทรานซิชันทดแทน	เครื่องมือจะสรุปว่า**โมเดลไม่มีคุณสมบัติตามคำค้น**
	AG(Gp_1 → EF(Request Assessment)) สถานะ ρ (Gp_1) และสถานะ φ (Request Assessment) เป็นสถานะที่เกิดจากสับเน็ต M1-2 ที่เป็นทรานซิชันทดแทน	เครื่องมือจะสรุปว่า**โมเดลไม่มีคุณสมบัติตามคำค้น**
3	Loan < credit_limit เพรดิเคดเพื่อทวนสอบการละเมิดค่ายืนยงสามารถใช้ได้กับปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นแบบมีไม่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทนหรือแบบไม่มีการกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนก็ได้	เครื่องมือสามารถ **สรุปคุณสมบัติตามคำค้นได้**

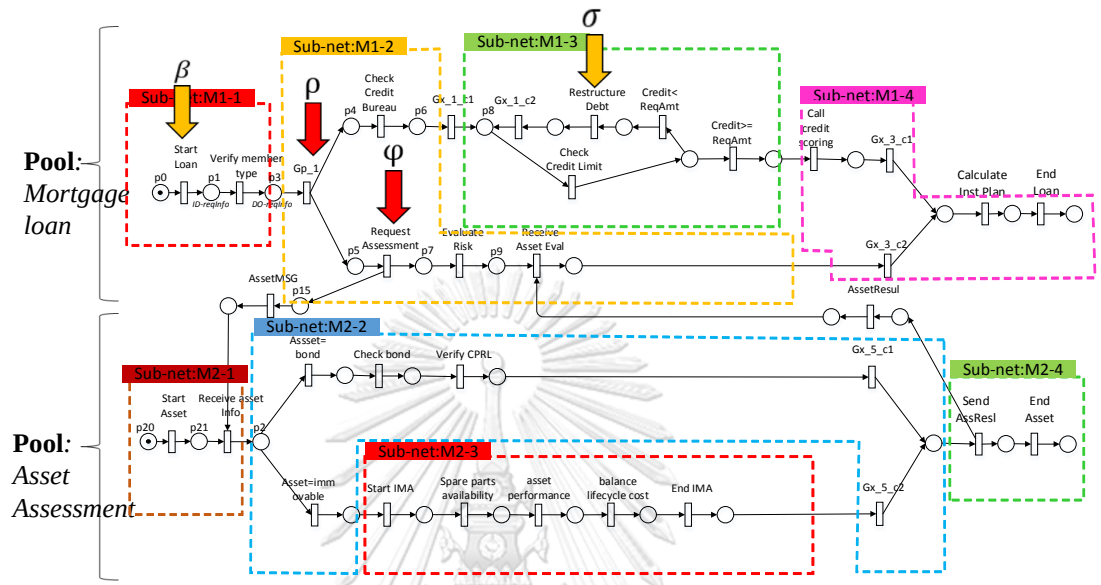
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตัวอย่างคำค้นปริภูมิสถานะที่แสดงในตารางที่ 4-4 สามารถสรุปได้ว่า คำค้นปริภูมิสถานะต้องเป็นคำค้นที่ไม่มีส่วนของสถานะที่เกิดจากสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน เพราะสถานะนั้นๆ ถูกสร้างเป็นสถานะชั่วคราวจึงทำให้เครื่องมือไม่พบสถานะดังกล่าวในปริภูมิสถานะ

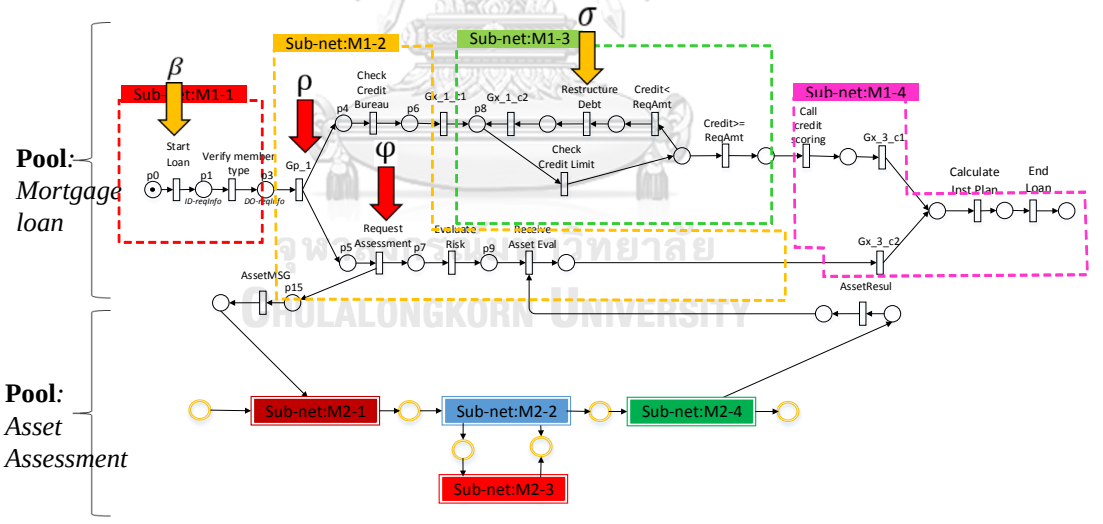
4.5.3. การทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นที่สร้างจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน

โมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชันคือโมเดลที่มีพูลแบ่งกระบวนการ ซึ่งกระบวนการทำงานของแต่ละพูลทำงานอิสระจากกัน จะมีเพียงบางทาสก์ที่อาศัยข้อมูลหรือสัญญาณจากทาสก์ที่อยู่ต่างพูลเท่านั้น ตัวอย่างเช่น โมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบสินเชื่อจำนองที่ประกอบด้วย พูลของสินเชื่อทำหน้าที่พิจาณาวงเงินกู้และพูลของการประเมินสินทรัพย์มีหน้าที่ประเมินราคาสินทรัพย์ตามที่ผู้กู้ระบุ ซึ่งการทำงานดังกล่าวเปรียบเสมือนมีโปรแกรมสองโปรแกรมทำงานร่วมกัน เป็นลักษณะการทำงานของระบบกระจาย (Distributed system) ดังนั้น เมื่อแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นจะได้

โมเดลซีพีเอ็นที่แสดงพฤติกรรมการทำงานของโมเดลทั้ง 2 พูล แต่ในความเป็นจริงแล้วการทำงานแต่ละพูลอิสระจากกัน ถ้านำโมเดลซีพีเอ็นไปสร้างปริภูมิสถานะโดยที่ไม่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทนจะทำให้ได้ปริภูมิสถานะที่มีขนาดใหญ่และไม่สอดคล้องกับหลักการออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน



(a) Obtained CPN model from the transformation stage



(b) CPN model selected for state space generation

รูปที่ 4-18 การทวนสอบโมเดลกรณีที่เลือกสับเน็ตที่อยู่ต่างพูล

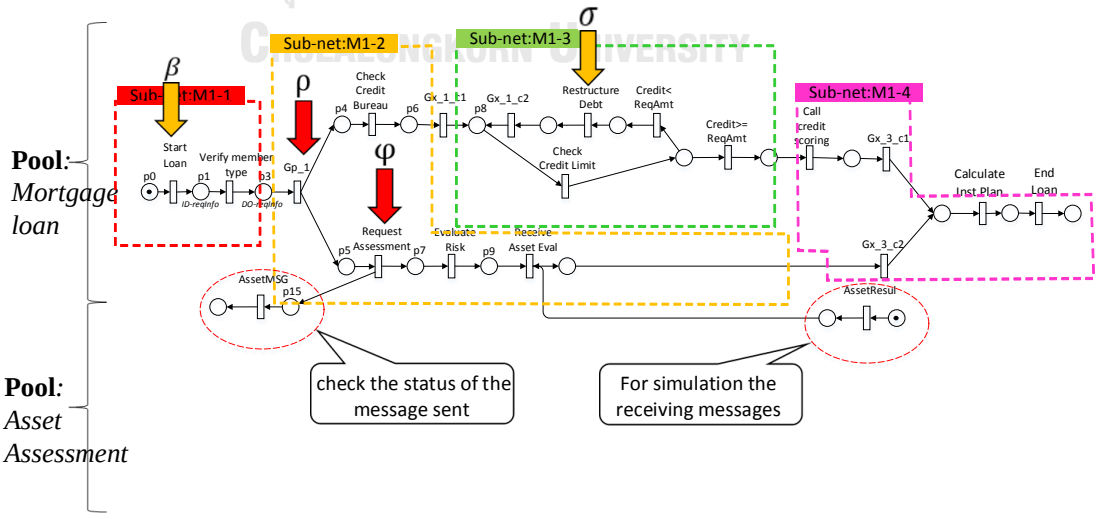
เพื่อให้การสร้างปริภูมิสถานะสอดคล้องกับหลักการออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน การทวนสอบควรใช้วิธีการทวนสอบแบบล่างขึ้นบน (Bottom up) กล่าวคือ ให้ทวนสอบทีละพูลให้เรียบร้อยก่อน หลังจากนั้นค่อยนำแต่ละพูลที่ผ่านการทวนสอบมาแล้วมากำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนเพื่อทวนสอบการส่งข้อความหรือสัญญาณระหว่างพูล ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 4-18 (a)

เป็นโมเดลซีพีเอ็นที่สร้างจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ประกอบด้วย 2 พูลคือ พูลสินเชื่อจำนอง (Mortgage loan) และพูลการประเมินหลักประกัน (Asset management) จะเห็นได้ว่าไม่มีการกำหนดสับเน็ตเป็นทรานซิชันทดแทน ถ้านำโมเดลซีพีเอ็นนี้ไปสร้างปริภูมิสถานะ เครื่องมือจะสร้างสถานะที่เกิดจากยิงโทเค็นของทรานซิชันที่แทรกสลับกันได้ ตัวอย่างเช่น อาจเกิดการแทรกสลับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Check credit bureau และทรานซิชัน Check bond (ทั้ง 2 ทรานซิชันอยู่ต่างพูล) ซึ่งสถานะดังกล่าวจะขัดแย้งกับหลักการของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชัน เพื่อให้วิธีการทวนสอบไม่ขัดแย้งกับหลักการดังกล่าว ผู้ออกแบบต้องทวนสอบพูลสินเชื่อจำนองหรือพูลการประเมินหลักประกันพูลใดพูลหนึ่งก่อน แล้วหลังจากนั้นค่อยกำหนดสับเน็ตที่อยู่ในพูลที่ได้ทวนสอบแล้วให้เป็นทรานซิชันทดแทน

ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นที่มีสับเน็ตที่ได้จากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชันแสดงในรูปที่ 4-18 (b) จะเห็นได้ว่าทุกสับเน็ตในพูลการประเมินหลักประกันถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน ซึ่งหมายความว่าการทวนสอบโมเดลนี้เป็นการทวนสอบพฤติกรรมพูลสินเชื่อจำนองเป็นหลักโดยไม่ได้สนใจพฤติกรรมการทำการที่อยู่ในพูลการประเมินหลักประกัน ในทางกลับกัน ถ้าผู้ออกแบบต้องการทวนสอบการทำงานของกระบวนการที่อยู่ในพูลการประเมินหลักประกัน ทุกสับเน็ตที่อยู่ในพูลสินเชื่อจำนองควรถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อความที่ส่งระหว่างพูลเป็นอิลีเมนต์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับพูลใดพูลหนึ่ง ดังนั้นสับเน็ตที่มีทาสก์ใดเกี่ยวข้องกับการรับหรือส่งข้อมูลจะต้องคงทรานซิชันและเพลสของการส่งข้อความหรือรับข้อความระหว่างพูลไว้ ซึ่งการคงโครงสร้างนี้ไว้ทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นในเพลสของการรับข้อความเพื่อจำลองการรับข้อมูลจากต่างพูลได้ และผู้ออกแบบยังสามารถทวนสอบการส่งข้อมูลไปต่างพูลได้เช่นกัน รูปที่ 4-19 แสดงโมเดลซีพีเอ็นที่มีส่วนของโครงสร้างซีพีเอ็นให้จำลองการรับและส่งข้อความต่างพูลได้ ซึ่งวิธีนี้จะลดขนาดของปริภูมิสถานะได้ดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



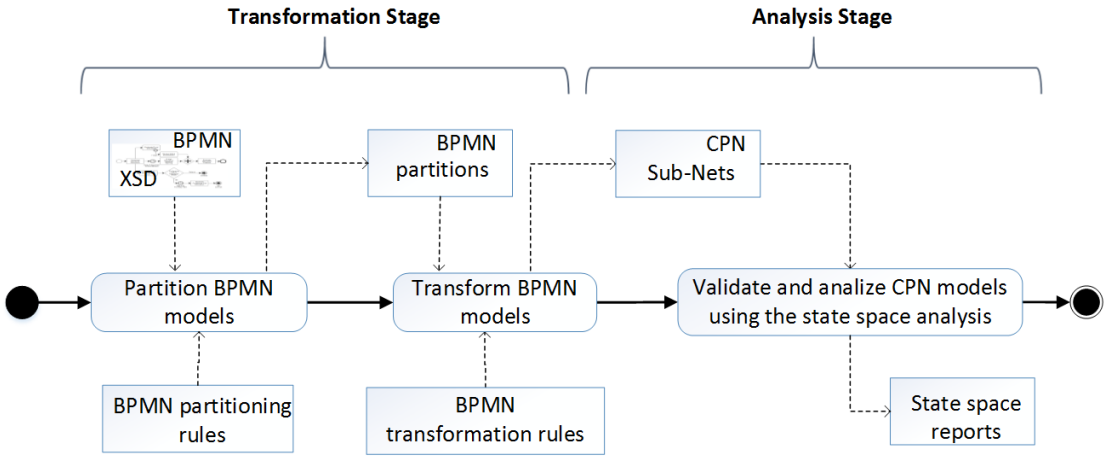
รูปที่ 4-19 การทวนสอบโมเดลกรณีที่เลือกสับเน็ตที่อยู่ต่างพูล

บทที่ 5
การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบและการพัฒนาระบบ

บทนี้อธิบายสถาปัตยกรรมและฟังก์ชันการทำงานของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ในส่วนแรกอธิบายการวิเคราะห์ระบบจากขั้นตอนการทวนสอบพร้อมทั้งอธิบายสถาปัตยกรรมของระบบ และส่วนที่สองอธิบายเกี่ยวกับขั้นตอนพัฒนาเครื่องมือ

5.1. การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ

จากขั้นตอนการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ขั้นตอนหลักของการทวนสอบแบ่งออกเป็น 2 ระยะ ระยะแรกเป็นการสร้างโมเดลซีพีเอ็นจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น กาสร้างโมเดลได้เสนอวิธีการแบ่งโมเดลก่อนทำการแปลงโมเดลไปเป็นโมเดลซีพีเอ็น และในระยะที่สองคือขั้นตอนการทวนสอบโดยการนำโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากระยะแรกมาสร้างปริภูมิสถานะและค้นปริภูมิสถานะ ภาพรวมของขั้นตอนการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแสดงในรูปที่ 5-1

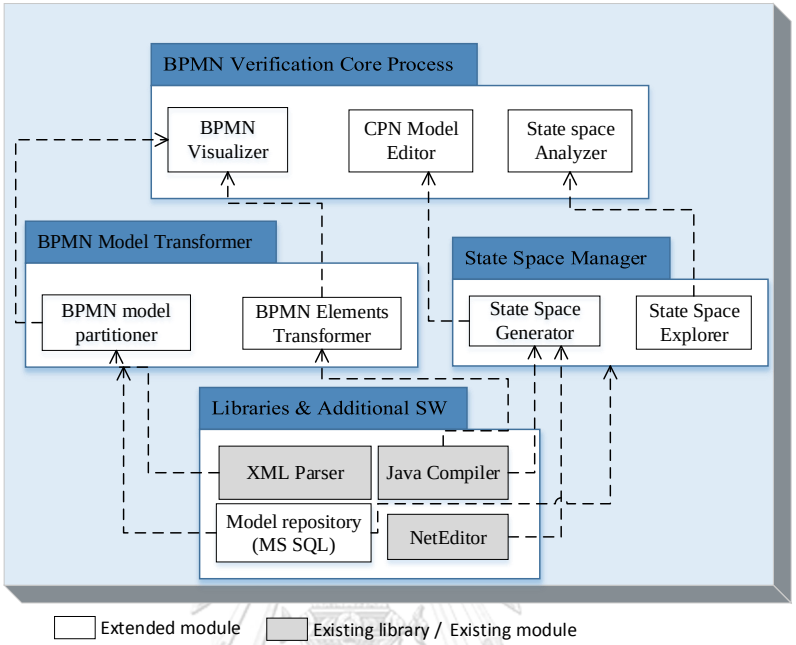


รูปที่ 5-1 ภาพรวมของขั้นตอนการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น [18]

จากขั้นตอนการทวนสอบที่แสดงในรูปที่ 5-1 สามารถอธิบายรายละเอียดของกิจกรรมที่ต้องดำเนินการในการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นดังนี้

1) นำเข้าข้อมูลโมเดลที่เก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุลบีพีเอ็ม และข้อมูลนิยามไอเท็มที่ประกาศในรูปแบบไฟล์นามสกุลเอ็กซ์เอสดี
2) แบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อยที่เรียกว่าพาร์ทิชัน
3) แปลงอิลีเมนต์อิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นโครงสร้างซีพีเอ็น และต่อโครงสร้างซีพีเอ็นเข้าด้วยกันให้เป็นโมเดลซีพีเอ็นที่พร้อมที่นำไปสร้างปริภูมิสถานะ
4) เลือกสับเน็ตของโมเดลซีพีเอ็นไปสร้างปริภูมิสถานะและรายงานการสร้างปริภูมิสถานะ
5) ทวนสอบโมเดลโดยเขียนคำค้นและค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นที่สร้าง

จากขั้นตอนการดำเนินการข้างต้น ผู้วิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแสดงในรูปที่ 5-2



รูปที่ 5-2 สถาปัตยกรรมระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

จากสถาปัตยกรรมที่แสดงในรูปที่ 5-2 รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

1) กระบวนการหลักของทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น
ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและใช้งาน 3 โมดูล
   (1) ตัวแสดงโมเดลบีพีเอ็มเอ็น (BPMN Visualizer): ใช้แสดงผลหน้าจอโมเดลบีพีเอ็มเอ็น โดยอ่านไฟล์โมเดลบีพีเอ็นที่สร้างจากเครื่องมือ Eclipse BPMN modeler ที่อยู่ในรูปแบบเอ็กซ์เอ็มแอล
   (2) ตัวปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น (CPN model editor): ใช้แสดงผลหน้าจอโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และใช้ในการปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น รวมทั้งการเลือกโมเดลซีพีเอ็นไปสร้างปริภูมิสถานะ
2) ตัววิเคราะห์ปริภูมิสถานะ (State space analyzer): ใช้สำหรับค้นปริภูมิสถานะที่ได้สร้างไว้
3) ตัวแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็น (BPMN model transformer) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการสำหรับแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเป็นโมเดลย่อย และมีฟังก์ชันสำหรับแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโครงสร้างซีพีเอ็น
4) ตัวจัดการปริภูมิสถานะ (State space manager) มีหน้าที่สร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นที่ผู้ใช้งานกำหนด และมีฟังก์ชันสำหรับสร้างคำค้นปริภูมิสถานะ

5) ไลบรารีและซอฟต์แวร์เสริม (Libraries and additional software) ในขั้นตอนการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นและขั้นตอนการสร้างปริภูมิสถานะจำเป็นต้องใช้ไลบรารีและเรียกใช้ซอฟต์แวร์เสริมดังนี้
   (1) พาเซอร์เอ็กซ์เอ็มแอล (XML parser) [71] ใช้การอ่านข้อมูลโมเดลบีพีเอ็มเอ็น
   (2) ตัวสร้างปริภูมิสถานะของ NetEditor [72] เวอร์ชัน 17.0 ที่เป็นตัวอ่านโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็นและสร้างปริภูมิสถานะที่อยู่บนพื้นฐานการเปิดทรานซิชันและยิงโทเค็นของเพทริเน็ตแบบดั้งเดิม ในขณะที่โทเค็นคัลเลอร์และอินสคริปชันของโมเดลซีพีเอ็นใช้ตัวคอมไพล์เลอร์ภาษาจาวาอ่านและแปลผล
   (3) คอมไพล์เลอร์ภาษาจาวา (Java compiler) [71] ใช้ตรวจสอบความถูกต้องเชิงวากยสัมพันธ์ของอินสคริปชันที่ระบุในโมเดลซีพีเอ็น
   (4) แหล่งเก็บข้อมูลโมเดล (Model repository) ใช้ซอฟต์แวร์โปรแกรม ไมโครซอฟท์ เอสคิวแอล (MS SQL) [73] เป็นเครื่องมือในการจัดการข้อมูลโมเดลและปริภูมิสถานะ

5.2. การออกแบบและการพัฒนาระบบ

การออกแบบเครื่องมืออิงตามความต้องการเชิงฟังก์ชัน ผู้วิจัยได้รวบรวมความต้องการเชิงฟังก์ชัน ได้ออกแบบแผนภาพที่ใช้ประกอบการพัฒนาระบบ รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาระบบอธิบายตามหัวข้อดังต่อไปนี้

5.2.1. ความต้องการเชิงฟังก์ชัน

ตารางที่ 5-1 รายการความต้องการเชิงฟังก์ชันของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

รหัสฟังก์ชัน	**ชื่อฟังก์ชัน**	**คำอธิบาย**
FN-00	สร้างโครงการ	ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลโครงการทวนสอบที่ประกอบด้วย 1) ชื่อโครงการ 2) ไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็น 3) ไฟล์นิยามไอเท็ม
FN-01	แสดงผลโมเดลบีพีเอ็มเอ็นบนหน้าจอ	ระบบอ่านไฟล์นามสกุลบีพีเอ็มและแสดงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นบนหน้าจอ
FN-02	แบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย	ระบบสามารถแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อยโดยพิจารณา 2 เงื่อนไขคือ 1) คู่ของเกตเวย์ 2) ค่าน้ำหนักต่ออิลีเมนต์และค่าอิลีเมนต์ต่อพาร์ทิชัน
FN-03	แปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น	ระบบแปลงอิลีเมนต์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโครงสร้างซีพีเอ็นตามกฎการแปลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

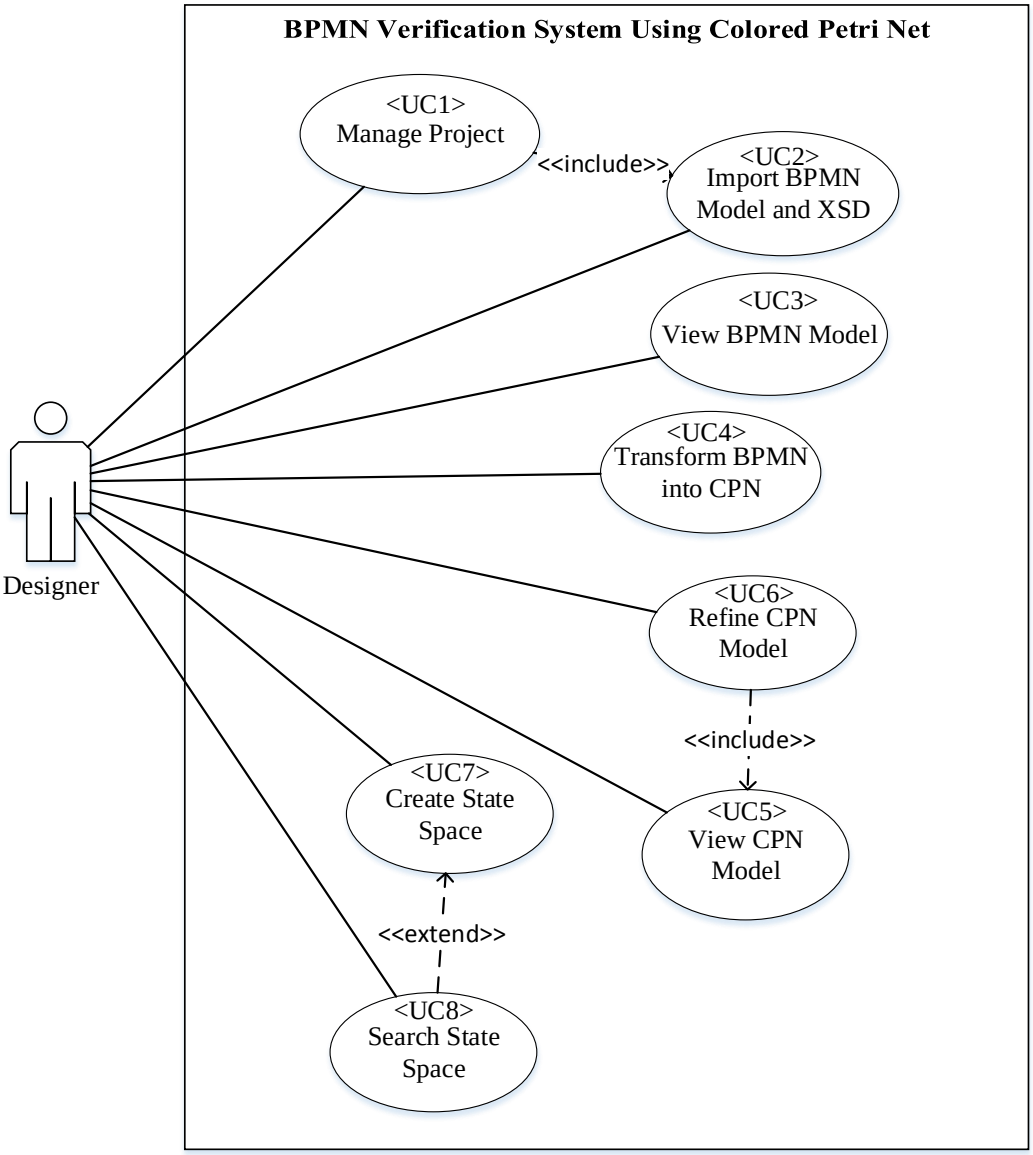
ตารางที่ 5-1 รายการความต้องการเชิงฟังก์ชันของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น (ต่อ)

รหัสฟังก์ชัน	ชื่อฟังก์ชัน	คำอธิบาย
FN-04	แก้ไขข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็น	ระบบแสดงรายการตัวแปรที่สกัดได้จากโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และผู้ใช้งานสามารถเพิ่มตัวแปรเพื่อใช้ในโมเดลได้ โดยตัวแปรมี 2 ประเภทคือ 1) ตัวแปรโลคอล 2) ตัวแปรโกลบอล
FN-05	แก้ไขอินสคริปชันของโมเดลซีพีเอ็น	หลังจากได้โมเดลซีพีเอ็นแล้ว ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขหรือระบุรายละเอียดให้กับโมเดลซีพีเอ็นได้ ข้อมูลที่สามารถแก้ไขหรือเพิ่มเติมมีดังนี้ 1) อินสคริปชันของอาร์กนำเข้า 2) อินสคริปชันของอาร์กนำออก 3) เงื่อนไขของทรานซิชัน 4) ชื่อของเพลสหรือชื่อของทรานซิชัน 5) คัลเลอร์เซ็ตของเพลส 6) ค่าขอบเขตของเพลส 7) กำหนดค่ามาร์คกิงเริ่มต้น
FN-06	เลือกโมเดลซีพีเอ็นเพื่อสร้างปริภูมิสถานะ	ระบบสามารถรองรับการเลือกสับเน็ตไปสร้างปริภูมิสถานะ สับเน็ตที่ถูกเลือกสารมารถนำไปกำหนดเป็นโมเดลซีพีเอ็นได้ 2 แบบคือ 1) จัดโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น 2) จัดโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้น
FN-07	ค้นปริภูมิสถานะและรายงานปริภูมิสถานะ	การค้นปริภูมิสถานะมีความสามารถดังนี้ 1) แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับปริภูมิสถานะ 2) ผู้ใช้งานสามารถสร้างคำค้นจากคำสั่งพื้นฐานตามที่อธิบายในตารางที่ 4-3 3) แสดงผลการค้นหาและแสดงตัวอย่างข้อมูลประกอบการสรุปผลคำค้นปริภูมิสถานะ
FN-08	นำออกรายงานการค้นปริภูมิสถานะ	การออกรายงานการค้นปริภูมิสถานะสามารถออกรายงานได้ดังนี้ 1) แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับปริภูมิสถานะ 2) ประวัติการค้นปริภูมิสถานะและผลการค้นหา

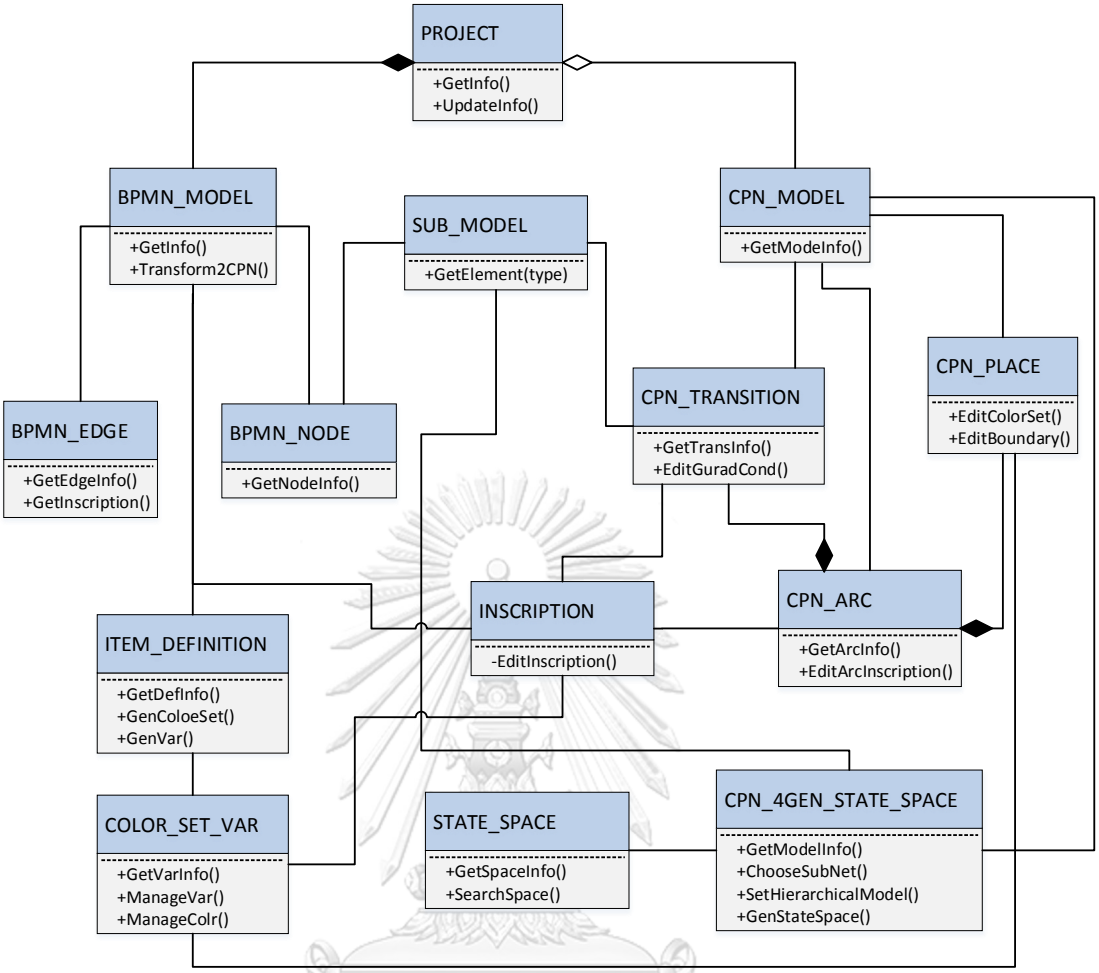
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2.2. การออกแบบระบบ

จากความต้องการเชิงฟังก์ชันที่อธิบายในตารางที่ 5-1 สามารถออกแบบระบบด้วยแผนภาพยูสเคส (Use case diagram) เพื่อแสดงระบบย่อยและแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างระบบงานดังรูปที่ 5-3 และคำอธิบายยูสเคสแสดงในภาคผนวก ก ผู้วิจัยยังได้ออกแบบโครงสร้างของระบบโดยอธิบายโอเปอร์เรชันและเงื่อนไขข้อบังคับของแต่ละโอเปอร์ชันด้วยแผนภาพคลาส (Class diagram) ดังแสดงในรูปที่ 5-4 รายละเอียดของคลาสอธิบายในภาคผนวก ข



รูปที่ 5-3 แผนภาพยูสเคสระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น



รูปที่ 5-4 แผนภาพคลาสของระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2.3. การพัฒนาระบบ

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาระบบประกอบด้วยสภาพแวดล้อมทางด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ดังต่อไปนี้

1) ด้านฮาร์ดแวร์

- หน่วยประมวลผล อินเทลเพนเทียมทีเอ็ม 2.40 กิกะเฮิร์ต (Core i7 TM 2.40 GHz.)
- หน่วยความจำ (RAM) 8 กิกะไบต์ (8 GB)
- ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) 1 เทระไบต์ (1 TB)

2) ด้านซอฟต์แวร์

- ระบบปฏิบัติการ วินโดวส์เท็น (Windows 10)
- เครื่องมือพัฒนาโปรแกรมอีคริปจูโน
  Development Package: Eclipse Java EE IDE for Web Developers Version: Juno Service Release 2

Build id: 20130225-0426

- ระบบจัดการฐานข้อมูลไมโครซอฟท์เอสคิวเอล 2012 (MS SQL 2012)
- เครื่องมือออกแบบโมเดลอีคลิปบีพีเอ็มเอ็นโมเดลเลอร์

หลังจากเตรียมเครื่องมือสำหรับการพัฒนาระบบเรียบร้อยแล้ว ทำการติดตั้งซอฟต์แวร์ในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้พัฒนาระบบ โดยมีลำดับการติดตั้งเครื่องมือเป็นไปตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ติดตั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10
2. ติดตั้งระบบจัดการฐานข้อมูลไมโครซอฟท์เอสคิวแอล 2012
3. ติดตั้งชุดพัฒนาโปรแกรมอีคริปจูโน
4. ติดตั้งเครื่องมืออีคลิปบีพีเอ็มเอ็นโมเดลเลอร์

หลังจากติดตั้งเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว ทำการพัฒนาส่วนต่อประสานให้สอดคล้องกับขอบเขตของระบบที่อธิบายในบทที่ 1 และการทำงานของระบบต้องตรงกับตามความต้องการเชิงฟังก์ชันในตารางที่ 5-1 หลังจากนั้นทำการทดสอบระบบโดยทดสอบใช้งานระบบด้วยกรณีตัวอย่าง หน้าจอการใช้งานระบบทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นอธิบายในภาคผนวก ค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6
การทดสอบระบบทวนสอบโมเดลบีพีเมเอ็น

บทนี้อธิบายเกี่ยวกับการทดสอบเครื่องมือทวนสอบบีพีเอ็มเอ็นโดยใช้กับโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ออกแบบกระบวนการของ 3 กลุ่มธุรกิจ (Business domains) โดยแผนการทดสอบมีดังนี้

1) สร้างโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยเครื่องมือโมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นของอีคลิปส์จำนวน 3 โมเดล ที่มีลักษณะที่แตกต่างกันคือ
   (1) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ไม่มีพูล ของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์
   (2) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มี 2 พูล ของระบบประเมินสินเชื่อจำนองของธนาคาร
   (3) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มี 3 พูล ของระบบค้าปลีก

   แต่ละโมเดลจะถูกออกแบบให้มีจุดผิดพลาดเพื่อที่จะใช้ในการทดสอบว่าเครื่องมือสามารถตรวจสอบพบความผิดพลาดนั้นหรือไม่
2) นำเข้าโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยเครื่องมือทวนสอบโมเดลที่พัฒนาและตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องของเครื่องมือโดยพิจารณาจากข้อมูลที่เครื่องมือสกัดได้ สิ่งที่ตรวจสอบมีดังนี้
   (1) ตรวจสอบจำนวนทาสก์ เกตเวย์ และข้อความ
   (2) ตรวจสอบตัวแปรและชนิดตัวแปรที่ได้จากไฟล์เอกซ์เอสดี
   (3) ตรวจสอบผลลัพธ์ของการแบ่งพาร์ทิชันว่าถูกต้องตามการตั้งค่าหรือไม่
3) แปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นและตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็น หลังจากนั้นปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็นให้สมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปสร้างปริภูมิสถานะ ขั้นตอนการดำเนินการมีดังนี้
   (1) ตรวจสอบการเชื่อมต่อของแต่ละอิลีเมนต์ในโมเดลซีพีเอ็นว่าสมบูรณ์หรือไม่
   (2) ตรวจสอบความสอดคล้องของสับโมเดลและพาร์ทิชันของบีพีเอ็มเอ็น
   (3) กำหนดอินสคลิปชันของโมเดลให้สมบูรณ์
4) สร้างปริภูมิสถานะโดยทดลองสร้างจากโมเดลซีพีเอ็นทั้งที่ไม่มีโครงสร้างแบบลำดับชั้นและโมเดลที่มีโครงสร้างแบบที่มีลำดับชั้น
   (1) การทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น เป็นการทวนสอบในระดับล่างสุดของโมเดล คือทุกสับเน็ตของโมเดลไม่ได้ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน
   (2) การทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้นโดยมีการกำหนดสับเน็ตใดๆ เป็นทรานซิชันทดแทน ซึ่งสับเน็ตที่กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนทำหน้าที่เสมือนโมเดลนามธรรมที่มีระดับที่สูงกว่าสับเน็ตแบบที่ไม่ได้กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน
   (3) เปรียบเทียบจำนวนสถานะที่ได้จากการทวนสอบทั้งสองแบบ
   (4) เปรียบคำคำค้น เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างของการทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและการทวนสอบบแบบมีลำดับชั้น
5) ทดลองค้นปริภูมิสถานะด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.1. กรณีทดสอบที่ 1: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์

การทดลองนี้เป็นการทวนสอบระบบจัดการภาระงานซ่อมรถยนต์แห่งหนึ่ง วัตถุประสงค์ของการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นนี้เป็นการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นอย่างง่าย โดยโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ทวนสอบเป็นโมเดลไม่มีพูลและไม่มีการส่งข้อความในโมเดล ความต้องการเบื้องต้นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์มีดังนี้

1) ช่างที่เป็นพนักงานประจำทุกคนมีรหัสพนักงาน ในแต่การเข้าปฏิบัติหน้าที่ของช่างระบบจะตรวจสอบประเภทพนักงานเพื่อตรวจสอบสอบข้อมูลพนักงานและหาภาระงานที่เหมาะสม ถ้าพนักงานที่บันทึกชื่อเข้าระบบไม่มีบทบาทในตำแหน่งช่างจะไม่สามารถเข้าใช้บริการจัดการภาระงานได้ ถ้าพนักงานมีบทบาทเป็นช่างตามใบประกอบการจะสามารถใช้บริการระบบภาระงานได้
2) ช่างทุกคนจะต้องบันทึกเวลาการเข้าภาระงานเพื่อกำหนดระยะเวลาในการดำเนินการทั้งที่เป็นเวลาการดำเนินการต่อโครงการและเวลาต่อ 1 หน่วยของงาน
3) ระบบทำการตรวจสอบภาระงานจากฐานข้อมูลภาระงาน ถ้าเป็นช่างประจำโครงการจะถูกกำหนดให้ไปประจำโครงการที่บริษัทกำหนดให้ ดูรายละเอียดภาระงานต่อในข้อ 12)
4) ถ้าเป็นช่างพิเศษ ก่อนที่จะส่งช่างปฏิบัติไปปฏิบัติหน้าที่ ช่างผู้นั้นต้องผ่านการอนุมัติโดยหัวหน้ากลุ่มงานก่อนเสมอ
5) กรณีเป็นช่างพิเศษ ช่างจะต้องถูกจัดกลุ่มใหม่ที่เรียกว่า ทีมงานพิเศษ เพื่อให้ทีมงานมีเฉพาะทางครอบคลุมกับปัญหา (Issues) ที่ต้องดำเนินการ
6) ถ้าจำนวนช่างไม่เพียงเพียงพอหรือความเชี่ยวชาญของช่างไม่ตรงตามปัญหา ระบบจะเรียกใช้เซอร์วิสจัดทีมช่างเสริมจากเอาท์ซอสโดยสร้างเป็นกลุ่มย่อย
7) เมื่อได้ทีมช่างตามความต้องการ ผู้บริหารสายงานช่างพิเศษเป็นผู้อนุมัติทีมงาน
8) ตรวจสอบว่าทีมงานนั้นเป็นทำงานนอกพื้นที่หรืออยู่ในสวนงานภายในบริษัท หากเป็นการทำงานภายในบริษัท เจ้าหน้าที่ส่วนกลางทำการจองบริการ HQ service เพื่อจองจุดซ่อมบำรุง ชิ้นส่วนรถยนต์, เครื่องมือและอุปกรณ์, และลงทะเบียนจองการทดสอบการขับเคลื่อนหลังซ่อมบำรุง
9) กรณีที่เป็นการแก้ไขปัญหานอกสถานที่ ระบบจะกำหนดภาระงานแบบ Onsite service ที่ระบุภาระงานไปยังอู่ซ่อมที่อยู่ในเครือข่ายของบริษัท โดยชิ้นส่วน เครื่องมือและสถานที่ได้ถูกจัดเตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว
10) ถ้าเป็นงานซ่อมนอกสถานที่ ช่างแต่ละทีมจะมีชุดเครื่องมือพื้นฐานประจำทีม และช่างทุกรายจะถูกกำหนดกรอบระยะเวลาในการแก้ไขปัญหาเพื่อติดตามความก้าวหน้าของงาน และกรณีที่ลูกค้ามีประกันรถยนต์ที่คุ้มครองการซ่อมบำรุง ระบบจะส่งข้อมูลไปยังส่วนประกันเพื่อประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นและประมาณค่าใช้จ่าย
11) หลังจบภาระงานทั้งที่เป็นงานซ่อมของส่วนกลางและงานนอกสถานที่จะผ่านกระบวนการสรุปรายการค่าบริการ หากค่าใช้จ่ายมากกว่าค่าใช้จ่ายที่ประเมินไว้ให้เข้าสู่ขั้นตอนการตั้ง

ลูกหนี้ (Advance MA) หากเป็นไปตามค่าใช้จ่ายที่ประเมินให้ผู้จัดการฝ่ายซ่อมบำรุงอนุมัติค่าใช้จ่าย

12) กรณีเป็นช่างประจำโครงการ ช่างจะได้ค่าตอบแทนพิเศษในรูปแบบของค่าล่วงเวลาและเงินสนับสนุนพิเศษตามแต่ละโครงการกำหนด โดยภาระงานจะถูกกำหนดโดยหัวหน้าโครงการร่วมกับฝ่ายบริหารงานบุคคล

จากความต้องการเบื้องต้นนักออกแบบระบบได้เก็บความต้องการเพิ่มเติมและได้ออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์และทดลองนำโมเดลที่ได้มาทวนสอบด้วยเครื่องมือทวนสอบ จากการทวนสอบได้ผลลัพธ์ของแต่ละส่วนดังนี้

1) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์แสดงในรูปที่ 6-2
2) รายชื่อและรายละเอียดของทาสก์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแสดงในตารางที่ 6-1
3) ข้อมูลโมเดลย่อยที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือแสดงในตารางที่ 6-2
4) โมเดลย่อยที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือแสดงในรูปที่ 6-3
5) โมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแบ่งโมเดลด้วยเครื่องมือแสดงในรูปที่ 6-4
6) ขนาดปริภูมิสถานะที่ได้ทำการทดลองด้วยค่ามาร์คกิงเริ่มต้นที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 6-3
7) ข้อมูลตัวอย่างการค้นปริภูมิสถานะแสดงในตารางที่ 6-4

ตารางที่ 6-1 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานงานช่างซ่อมรถยนต์

ชื่อทาสก์	**รายละเอียด**
Approve by manager (Sub-process)	ผู้จัดการฝ่ายช่างพิเศษอนุมัติการจัดกลุ่มทีมงาน
Approve By PM	ผู้จัดการฝ่ายช่างโครงการอนุมัติแผนค่าล่วงเวลาและเงินสนับสนุนพิเศษ
Appvove by Manager	ผู้จัดการฝ่ายช่างพิเศษอนุมัติการซ่อมและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการซ่อมบำรุง
Appvove by MD	ผู้จัดการแผนกช่างโครงการอนุมัติแผนค่าล่วงเวลาและเงินสนับสนุนพิเศษ
Assign group auth	ผู้ที่เป็นช่างพิเศษต้องผ่านการอนุมัติโดยหัวหน้ากลุ่มงานที่ช่างสังกัดอยู่
Assign HQ Service	สร้างงานย่อยภายใต้สำนักงานใหญ่
Assign Onsite Service	สร้างงานย่อยภายใต้ประเภทงานนอกสถานที่
Authenticate technician mem	ตรวจสอบข้อมูลช่างเทคนิค
Book test drive	ลงทะเบียนเพื่อจองการทดสอบการขับเคลื่อนหลังซ่อมบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6-1 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานงานช่างซ่อมรถยนต์ (ต่อ)

ชื่อทาสก์	**รายละเอียด**
Call Insurance	ร้องขอข้อมูลกรมธรรม์ประกันภัยเพื่อขอข้อมูลวงเงินและขอบเขตการซ่อมบำรุง
Call Onsite MA	เรียกใช้การคำนวณค่าบำรุงรักษากรณีบำรุงรักษานอกสถานที่
Call service charge and Insurance	คำนวณค่าบริการและยอดประกันเพื่อบันทึกการร้องขอรับผลประโยชน์กรมธรรม์ประกันภัย
Check NumOf technicials	ตรวจสอบจำนวนช่างเทคนิคในแต่ละกลุ่ม
Create Sub gorup for Fix Issue	สร้างกลุ่มสมาชิกย่อยกรณีที่ใช้ทีมช่างจากบริษัทคู่ร่วมหรือช่างต่างแผนก
Estimate Job weight	ประเมินน้ำหนักงานของภาระงานที่ช่างได้รับมอบหมาย
Find Issue	ค้นหาและจับคู่ช่างกับภาระงานซ่อมบำรุง
Hold Time line	บันทึกเวลาและจองช่วงเวลาให้ช่างเพื่อใช้ในการดำเนินการซ่อมบำรุงต่อ 1 ภาระงาน
Hold tools and materials	จองชุดเครื่องมือและอุปกรณ์ให้กับช่าง
Hold-HR-incentive	ส่งข้อมูลเพื่อตั้งยอดรายได้พิเศษให้ฝ่ายบุคลรับทราบ
Insert Dept Part	จองโรงซ่อมบำรุงหรือแท่นซ่อมบำรุง
Insert work project	สร้างหรือจัดช่างให้กับโครงการซ่อมบำรุง
Interface Advance MA	ตั้งลูกหนี้กรณีที่ค่าใช้จ่ายเกินกว่ายอดประเมินเบื้องต้น
Log-time attendance	บันทึกเวลาการเข้าภาระงาน
Set OT plan	กำหนดแผนการทำงานล่วงเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6-2 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ

รหัสพาร์ทิชัน	**ชื่ออิลีเมนต์ในพาร์ทิชัน**	**ค่าน้ำหนักรวม**
PL0101	Start Event, Authenticate technician mem, G1, G-Ex, End Process , Log-time attendance, Find Issue, G4, Insert work project, Assign group auth	30
PL0102	Gw_p1, Set OT plan, G6, Approve By PM, Appvove by MD, Estimate Job weight, G14, Hold-HR-incentive	24

พาร์ทิชันในตารางได้จากการตั้งค่าน้ำหลักต่ออิลีเมนต์คือ 3 และน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันสูงสุดคือ 30

ตารางที่ 6-2 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ (ต่อ)

รหัสพาร์ทิชัน	ชื่ออิลีเมนต์ในพาร์ทิชัน	ค่าน้ำหนักรวม
PL0103	G8, Assign Onsite Service, Call Onsite MA, G13, Call service charge and Insurance, Assign HQ Service, Insert Dept Part, Hold tools and materials, Book test drive	27
PL0104	G9, Call Insurance, G10, Set tool package, Hold Time line	15
PL0105	Gw, Appvove by Manager, Interface Advance MA	9
PL0106	Start Group Gr, Check NumOf technicials, Gex, Exclusive Gateway 12, Approve by manager, End Group Gr, Create Sub gorup for Fix Issue	21

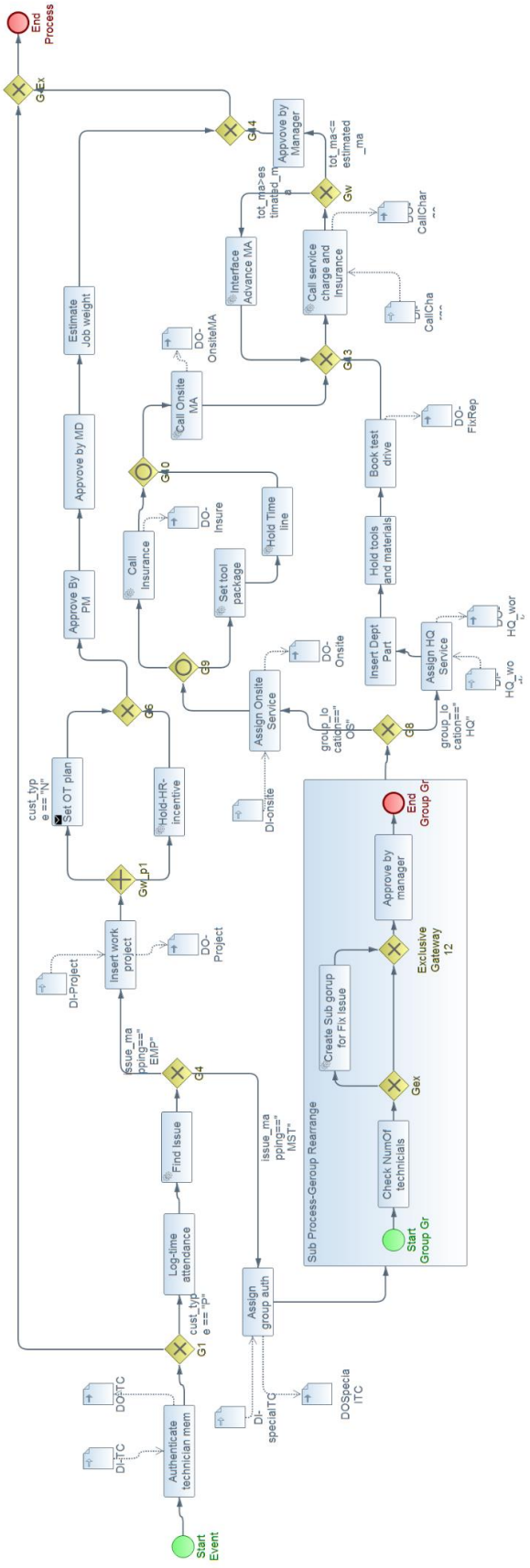
```
1   First step----<Gateway pairwise analysis>
2   Model: Partiton weight Config. is  30.00
3   [Partition ID][Weight]: Element list
4   [0101][6.00]: Start Event, Authenticate technician mem
5   [0102][15.00]: End Process , G1, G-Ex, Find Issue, Log-time attendance
6   [0103][9.00]: G4, Insert work project, Assign group auth
7   [0104][15.00]: G6, Gw_p1, Set OT plan, Hold-HR-incentive, Sub Process-Geroup Rearrange
8   [0105][12.00]: G14, Estimate Job weight, Approve By PM, Appvove by MD
9   [0106][18.00]: G8, Assign Onsite Service, Book test drive, Assign HQ Service, Insert Dept Part, Hold tools and
materials
10  [0107][15.00]: G9, G10, Set tool package, Hold Time line, Call Insurance
11  [0108][9.00]: G13, Call service charge and Insurance, Call Onsite MA
12  [0109][9.00]: Gw, Interface Advance MA , Appvove by Manager
13  [0101][6.00]: Start Group Gr, Check NumOf technicials
14  [0102][15.00]: End Group Gr, Gex, Exclusive Gateway 12, Create Sub gorup for Fix Issue, Approve by manager
15  ----------
16  Secound step----<Weight-based analysis : Merge partiton>
17  [0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101
18  [0104]: Merge partition , 0105 with partition 0104
19  [0106]: Merge partition , 0108 with partition 0106
20  [0101]: Merge partition , 0102 with partition 0101
```

รูปที่ 6-1 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์

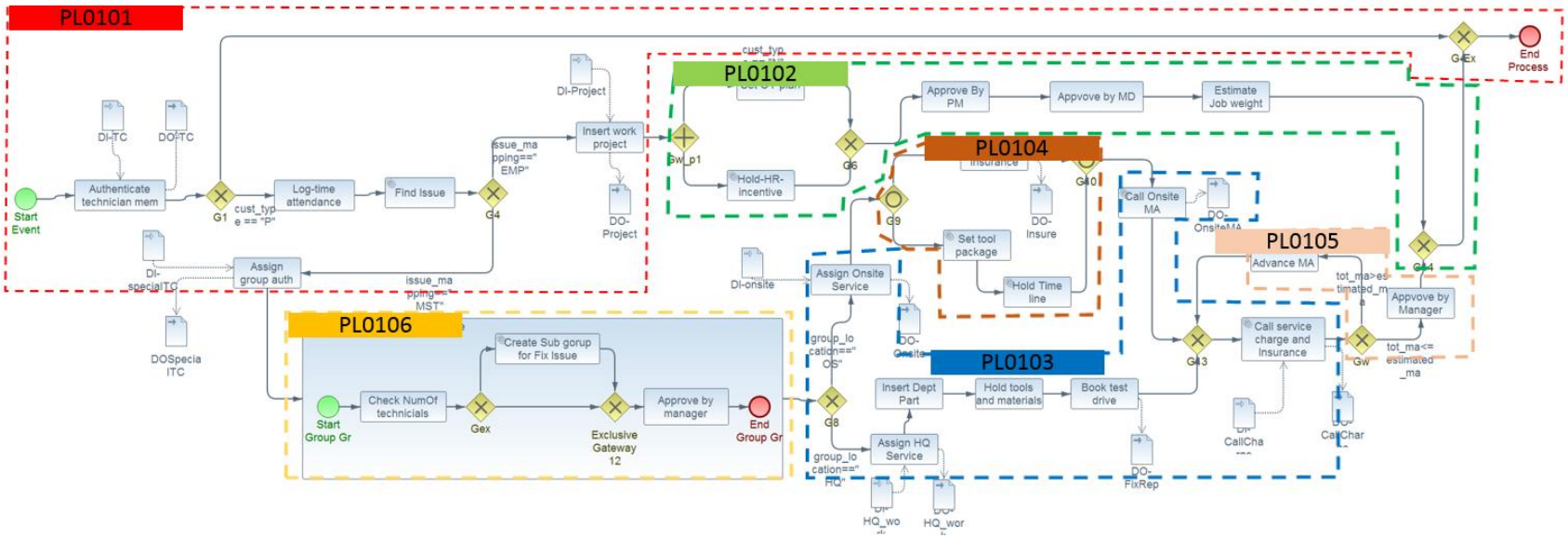
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันในรูปที่ 6-1 บรรทัดที่ 4–14 แสดงรายการพาร์ทิชันที่ได้จากการพิจารณาคู่เกตเวย์ซึ่งได้ผลลัพธ์จำนวน 11 พาร์ทิชัน (บรรทัดที่ 13 และ 14 คือพาร์ทิชันที่ได้จากอิลีเมนต์ที่อยู่ใน Sub Process-Geroup Rearrange ในรูปที่ 6-2) จะเห็นได้ว่าค่าน้ำหนักของแต่ละพาร์ทิชันมีขนาดค่อนข้างเล็ก และเนื่องจากระบบถูกตั้งค่าให้มีค่าน้ำหนักต่อพาร์ทิชันสูงสุดคือ 30 จึงทำให้ระบบมีการประสานพาร์ทิชันให้เหลือ 6 พาร์ทิชัน รายละเอียดการประสานพาร์ทิชันแสดงในบรรทัดที่ 17-20 ผลจากการประสานพาร์ทิชันทำให้ได้รายการอิลีเมนต์ในแต่ละพาร์ทิชันและน้ำหนักของพาร์ทิชันดังแสดงในตารางที่ 6-2

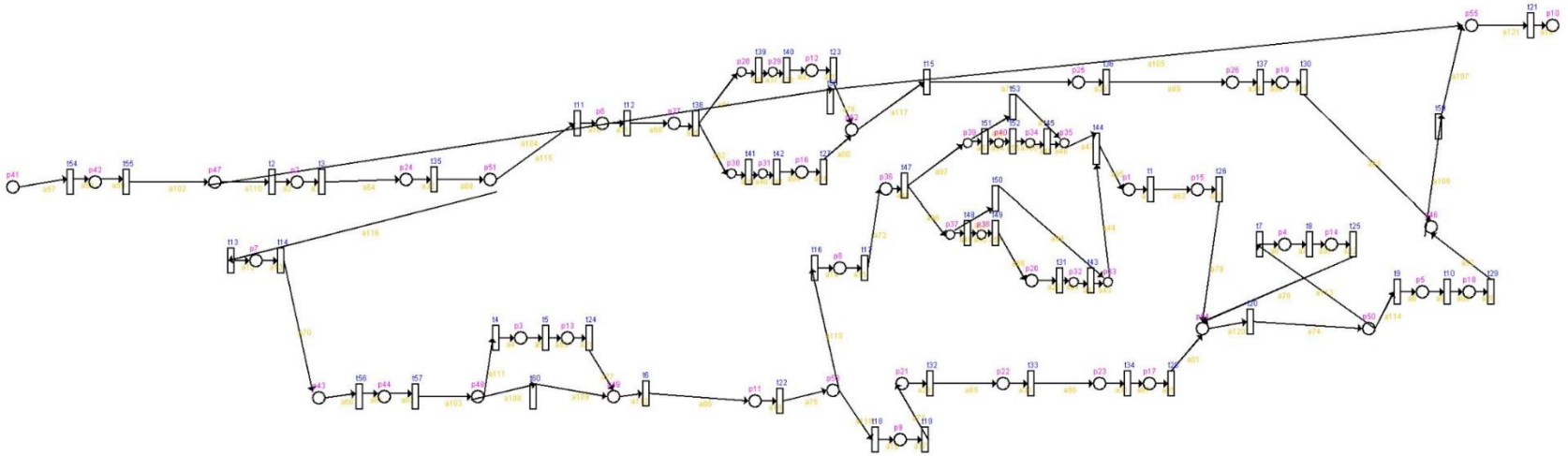
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6-2 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบจัดการการงานช่างซ่อมรถยนต์



รูปที่ 6-3 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ



รูปที่ 6-4 โมเดลซีพีเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์

จากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 6-4 การสร้างปริภูมิสถานะสร้างจากโมเดลซีพีเอ็นที่มีการกำหนดให้ทุกเพลสสามารถบรรจุโทเค็นได้สูงสุด 1 โทเค็น และการกำหนดค่ามาร์คกิงเริ่มต้นที่เพลส p41 ซึ่งเป็นเพลสเริ่มต้นของโมเดลโดยจำนวนและค่าโทเค็นที่กำหนดมีดังนี้

มาร์คกิงที่ 1: 1^("557","CHANON DECHSUPA","TECH","SP","MC","A","20180101","Y",30000);

มาร์คกิงที่ 2: 1^("557","CHANON DECHSUPA","TECH","SP","MA","A","20180101","Y",30000)&&
1^("558","JETSADA PRACHARAT","TECH","OP","OP","A","20180401","Y",25000);

ตารางที่ 6-3 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ในรูปที่ 6-4

ลำดับที่	จำนวนมาร์คกิงเริ่มต้น	สับเน็ต		การสร้างปริภูมิสถานะ	
		สับเน็ตที่เลือกมาสร้างปริภูมิสถานะ	สับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน	จำนวนสถานะ	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง:นาที)
1	1	ทุกสับเน็ต (แบบไม่มีลำดับชั้น)	ไม่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทน	1,183,701	7.09
2	1	ทุกสับเน็ต (แบบมีลำดับชั้น)	PL0102, PL0106	396,346	2.22
3	1	PL0101, PL0102, PL0102, PL0106	PL0102	521,530	3.03
4	1	PL0101, PL0102, PL0102, PL0106	PL0102, PL0106	330,058	2.01
5	2	ทุกสับเน็ต (แบบไม่มีลำดับชั้น)	ไม่กำหนดทรานซิชันทดแทน	4,073,256	24.31
6	2	ทุกสับเน็ต (แบบมีลำดับชั้น)	PL0102, PL0106	903,352	5.29
7	2	PL0101, PL0102, PL0102, PL0106	PL0102	1,421,523	8.34
8	2	PL0101, PL0102, PL0102, PL0106	PL0102, PL0106	696,088	4.12

ข้อมูลที่ปรากฏในตารางได้จากการทดสอบการสร้างปริภูมิสถานะบนเครื่องคอมพิวเตอร์ซีพียูขนาด 2.4 กิกะเฮิร์ทซและหน่วยความจำ 8 กิกะไบต์

หลังจากสร้างปริภูมิสถานะแล้วผู้วิจัยได้ทวนสอบโมเดลด้วยคำค้นปริภูมิสถานะจำนวน 10 คำค้นเพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบว่าปริภูมิสถานะที่สร้างถูกต้องตามโมเดลบีพีเอ็มเอ็นนำเข้าและปริภูมิสถานะเป็นไปตามความต้องการ ตารางที่ 6-4 แสดงรายการคำค้นและผลการทวนสอบที่ได้จากปริภูมิสถานะลำดับ 5 และ 6 ในตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-4 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบจัดการภาระงานช่างซ่อมรถยนต์ด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ

ลำดับที่	คุณสมบัติที่ทวนสอบ	คำค้นปริภูมิสถานะที่ใช้	ผลการทวนสอบ
1	ทุกทาสก์ของโมเดลสามารถถูกเอ็กซ์ซิคิว	UNREACH()	ผ่าน
2	กรณีช่างโครงการพิเศษ, ก่อนที่ผู้จัดการโครงการอนุมัติแผนโครงการ ข้อมูลของช่างต้องผ่านการคำนวณแผนค่าล่วงเวลาและอินเซ็นทีฟ	AG_ AND_EF(t40, t16) AG_ AND_EF(t42, t16)	ไม่ผ่าน
3	ช่างที่ผ่านการลงทะเบียนภาระงานต้องผ่านขั้นตอนการบันทึกเวลาการเข้าภาระงาน	EF(t13)	ผ่าน
4	จำนวนสมาชิกในกลุ่มช่างต้องเกิน 3 ท่าน	Watch(“NomOfMem>=3”)	ผ่าน
5	ค่าซ่อมบำรุงรวมค่าบริการเสริมต้องน้อยกว่าค่าประมาณการซ่อมบำรุงเสมอ ถ้าเกินวงเกินผู้จัดการฝ่ายจะเป็นผู้ตั้งงบพิเศษเพื่อขอขยายวงเงิน สบ.พ.	Watch(“tot_ma+AddOn<=estimated_ma”)	ไม่ผ่าน
6	งานโครงการทั่วไปต้องมีการประเมินน้ำหนักงานของภาระงานที่ช่างได้รับมอบหมายเพื่อตั้งค่าทางบัญชีและตั้งงบสำรองขอเบิกจ่ายค่าตอบแทน	AG_IMPLY_EF(t18, t36)	ผ่าน
7	ถ้าเป็นโครงการพิเศษนอกสถานที่ช่างสามารถจองช่วงเวลาเพื่อดำเนินการพร้อมกับขอเรียกกรมธรรม์ประกันภัยได้	EF_AND_EF(t32,t52)	ผ่าน
8	การตั้งลูกหนี้กรณีที่ค่าใช้จ่ายเกินกว่ายอดประเมินเบื้องต้นสามารถเกิดขึ้นได้	EF(t5)	ผ่าน
9	งานโครงการพิเศษต้องผ่านการคำนวณค่าบริการและยอดประกัน	EF(t6)	ผ่าน
10	ตรวจสอบการจบกระบวน	EF(t21)	ผ่าน
11	ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดล	SOUND()	ผ่าน
12	ตรวจสอบปัญหาการติดตาย	DEADLOCK()	ไม่มี

จากการทดสอบระบบด้วยกรณีทดสอบที่แสดงในตารางที่ 6-4 สามารถอภิปรายผลการทดลองในกรณีผลการทดสอบ “ไม่ผ่าน” มีดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) จากคำค้นปริภูมิสถานะลำดับที่ 2 ผลการทดสอบ “ไม่ผ่าน” เนื่องจากตรวจสอบพบว่ามีกรณีที่ผู้จัดการโครงการสามารถอนุมัติแผนโครงการโดยที่ไม่ผ่านการคำนวณแผนค่าล่วงเวลาหรือคำนวณอินเซ็นทีฟ วิธีการแก้ไขโมเดลคือเปลี่ยนเกตเวย์ G6 จาก “เอ็กซ์คลูซีฟเกตเวย์” เป็น “เกตเวย์แบบขนาน”
2) จากคำค้นปริภูมิสถานะลำดับที่ 5 ผลการทดสอบ “ไม่ผ่าน” พบว่าขณะที่กำลงสร้างปริภูมิสถานะมีค่าตัวแปรโกลบอล AddOn ที่บวกกับตัวแปร tot_ma แล้วมีค่ามากกว่า estimated_ma เนื่องจากค่า AddOn เพิ่มจะขึ้นเมื่อจำนวนช่างตั้งแต่ 2 ท่านขึ้นไปและเป็นช่างโครงการพิเศษนอกสถานที่

6.2. กรณีทดสอบที่ 2: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง

กรณีทดสอบที่ 2 นี้เป็นการทดสอบเครื่องมือด้วยโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่กระบวนของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีพูลแยกกลุ่มของกระบวนการ รวมทั้งระหว่างกระบวนการมีการส่งข้อความถึงกัน การทดลองนี้ใช้กรณีตัวอย่างโมเดลระบบประเมินสินเชื่อจำนอง (Mortgage loan system) ของระบบธนาคารแห่งหนึ่ง ความต้องการเบื้องต้นของระบบสินเชื่อจำนองมีดังนี้

1) ผู้กู้ทำการยื่นความประสงค์ขอกู้โดยระบุประเภทเงินกู้เป็น “สินเชื่อจำนอง” ระบบจะระบุข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับตัวผู้กู้ เช่น ประวัติผู้กู้ ข้อมูลสินทรัพย์จำนองและเอกสารที่จำเป็นต่อการขอกู้ตามที่ธนาคารกำหนด รายการสินทรัพย์จะถูกส่งให้ฝ่ายประเมินสินทรัพย์ตรวจสอบสินทรัพย์ตามข้อ 5)
2) ระบบตรวจสอบหนี้สินรวมของผู้กู้กับบริการเครดิตบูโร (Credit Bureau)
3) หลังจากตรวจสอบหนี้สินแล้วต้องตรวจสอบวงเงินกู้ที่ผู้กู้สามารถกู้ได้ ในกรณีที่ยอดขอกู้และราคาประเมินสินทรัพย์ไม่สอดคล้องกัน (ยอดขอกู้เกินราคาประเมินสินทรัพย์) ต้องมีการปรับโครงสร้างหนี้โดยการลดจำนวนหนี้หรือลดยอดที่ขอกู้ คำขอกู้จะไม่ผ่านการพิจารณาถ้ายอดที่ขอกู้ไม่สอดคล้องกับสินทรัพย์หลักประกัน
4) เมื่อวงเงินกู้ผ่านเงื่อนไขการพิจารณาขั้นต้น ระบบจะต้องคำนวณระดับคะแนนเครดิต
5) ฝ่ายประเมินสินทรัพย์ตรวจสอบราคาสินทรัพย์ที่ผู้ขอกู้ใช้เป็นหลักประกันว่าเป็น พันธบัตรหรืออสังหาริมทรัพย์ ถ้าเป็นพันธบัตรจะต้องมีการตรวจสอบข้อมูลพันธบัตรเกี่ยวกับวันครบกำหนดมูลค่าและอัตราดอกเบี้ยรับและตรวจสอบรหัสสินทรัพย์จำนองรวมทั้งการการส่งมอบตราสารหนี้
6) ถ้าหลักประกันเป็นอสังหาริมทรัพย์ ข้อมูลสินทรัพย์จะถูกส่งเข้ากระบวนการประเมินสินทรัพย์ประเภทอสังหาริมทรัพย์
7) ข้อมูลประเมินสินทรัพย์จะต้องมีการส่งกลับให้ฝ่ายเงินกู้เพื่อคำนวณระดับคะแนนเครดิตและคำนวณแผนการผ่อนชำระ

จากความต้องการเบื้องต้นนักออกแบบระบบได้เก็บความต้องการเพิ่มเติมและได้ออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนองและทดลองนำโมเดลที่ได้มาทวนสอบด้วยเครื่องมือทวนสอบ จากการทวนสอบได้ผลลัพธ์ของแต่ละส่วนดังนี้

1) โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนองแสดงในรูปที่ 6-6
2) รายชื่อและรายละเอียดของทาสก์ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแสดงในตารางที่ 6-5
3) ข้อมูลโมเดลย่อยที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือแสดงในตารางที่ 6-6
4) โมเดลย่อยที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือแสดงในรูปที่ 6-7

ตารางที่ 6-5 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง

ชื่อทาสก์	**รายละเอียด**
Verify customer type	ตรวจสอบข้อมูลผู้ขอกู้เบื้องต้นโดยตรวจสอบประเภทคำขอกู้ ความสมบูรณ์ของเอกสารคำขอกู้และข้อมูลสินทรัพย์ค้ำประกัน
Check Credit Bureau	ตรวจสอบหนี้กับบริการเครดิตบูโร
Request Assessment	ร้องขอบริการประเมินสินทรัพย์
Evaluate Risk	ประเมินความเสี่ยงขั้นต้นของสินเชื่อจำนอง
Receive Asset Eval	รับข้อมูลผลการประเมินสินทรัพย์ประกัน
Restructue Debt	ปรับโครงสร้างหนี้ตามแผนของธนาคาร
Check Credit Limit	ตรวจสอบวงเงินกู้
Call credit scoring	เรียกใช้บริการพิจาณาสินเชื่อตามเกณฑ์ของธนาคาร
Calculate Inst Plan	คำนวณแผนการชำระเงินกู้
Receive asset Info	รับข้อมูลสินทรัพย์ค้ำประกันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องประเมินมูลค่าสินทรัพย์
Check bond	ตรวจสอบพันธบัตร
Verify CPRL	ตรวจสอบข้อมูลพันธบัตรเกี่ยวเนื่องและข้อกำหนดในการถือกรรมสิทธิ์
Spare parts availability	สำรองมูลค่าสินทรัพย์เพื่อบำรุงรักษาให้สินทรัพย์คงสภาพพร้อมใช้
Asset performance	ประเมินประสิทธิภาพหรือสภาพคล่องของอสังหาริมทรัพย์
Balance lifecycle cost	จัดแผนต้นทุนมวลรวม
Send Ass Resl	ส่งข้อมูลการประเมินสินทรัพย์ค้ำประกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6-6 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนองที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ

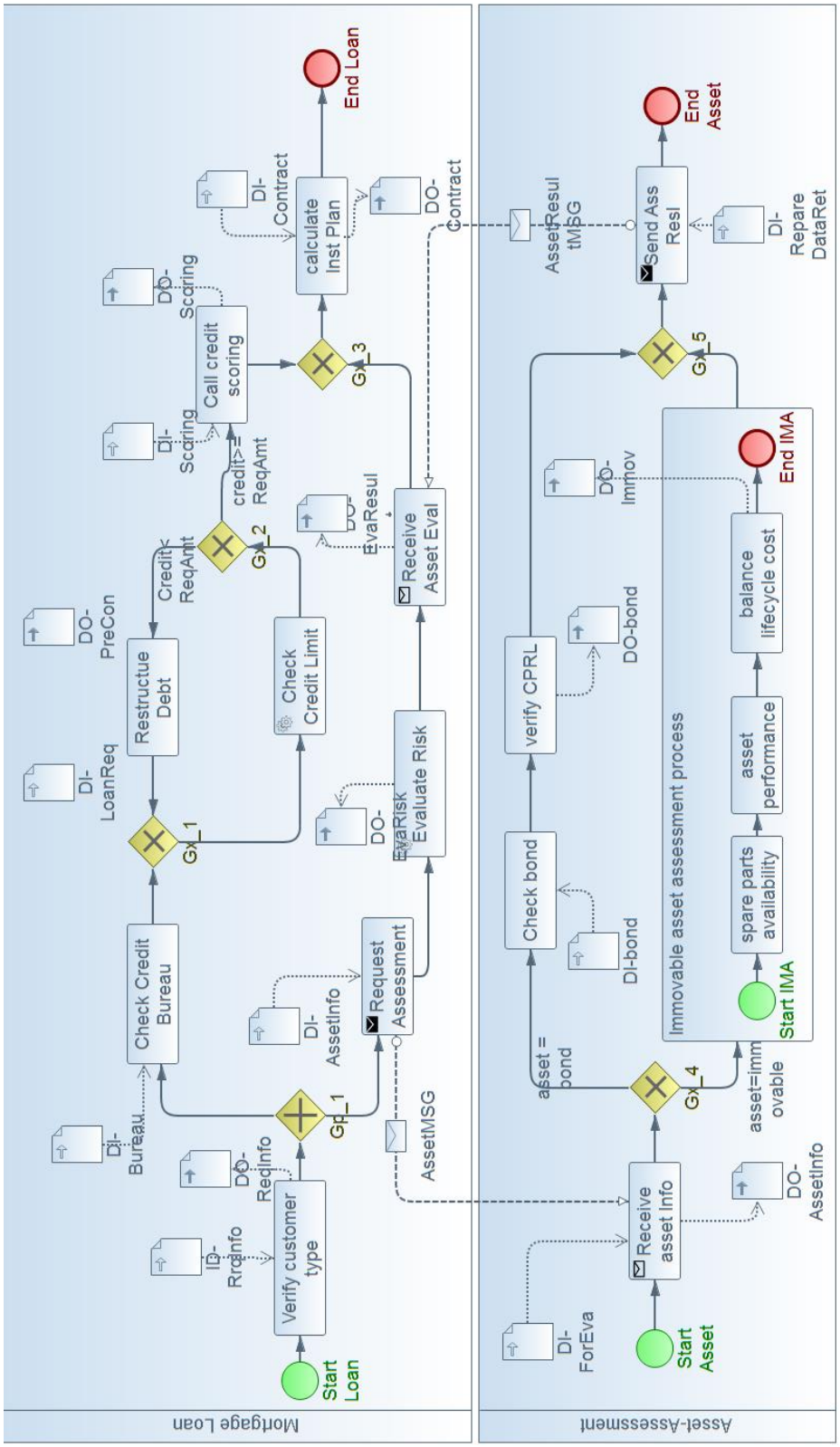
รหัสพาร์ทิชัน	ชื่ออิลีเมนต์ในพาร์ทิชัน	ค่าน้ำหนักรวม
PL0101	Start Loan, Verify customer type, Gp_1, Check Credit Bureau, Gx_1, Check Credit Limit, Request Assessment, Evaluate Risk, Receive Asset Eval	27
PL0102	Gx_2, Call credit scoring, Gx_3, calculate Inst Plan, End Loan, Restructue Debt	18
PL0201	Start Asset, Receive asset Info, Gx_4, Check bond, verify CPRL, Gx_5, Send Ass Resl, End Asset	24
PL0202	Start IMA, spare parts availability, asset performance, balance lifecycle cost, End IMA	15

ข้อมูลพาร์ทิชันในตารางได้จากการตั้งค่าน้ำหลักต่ออิลีเมนต์คือ 3 และน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันสูงสุดคือ 30

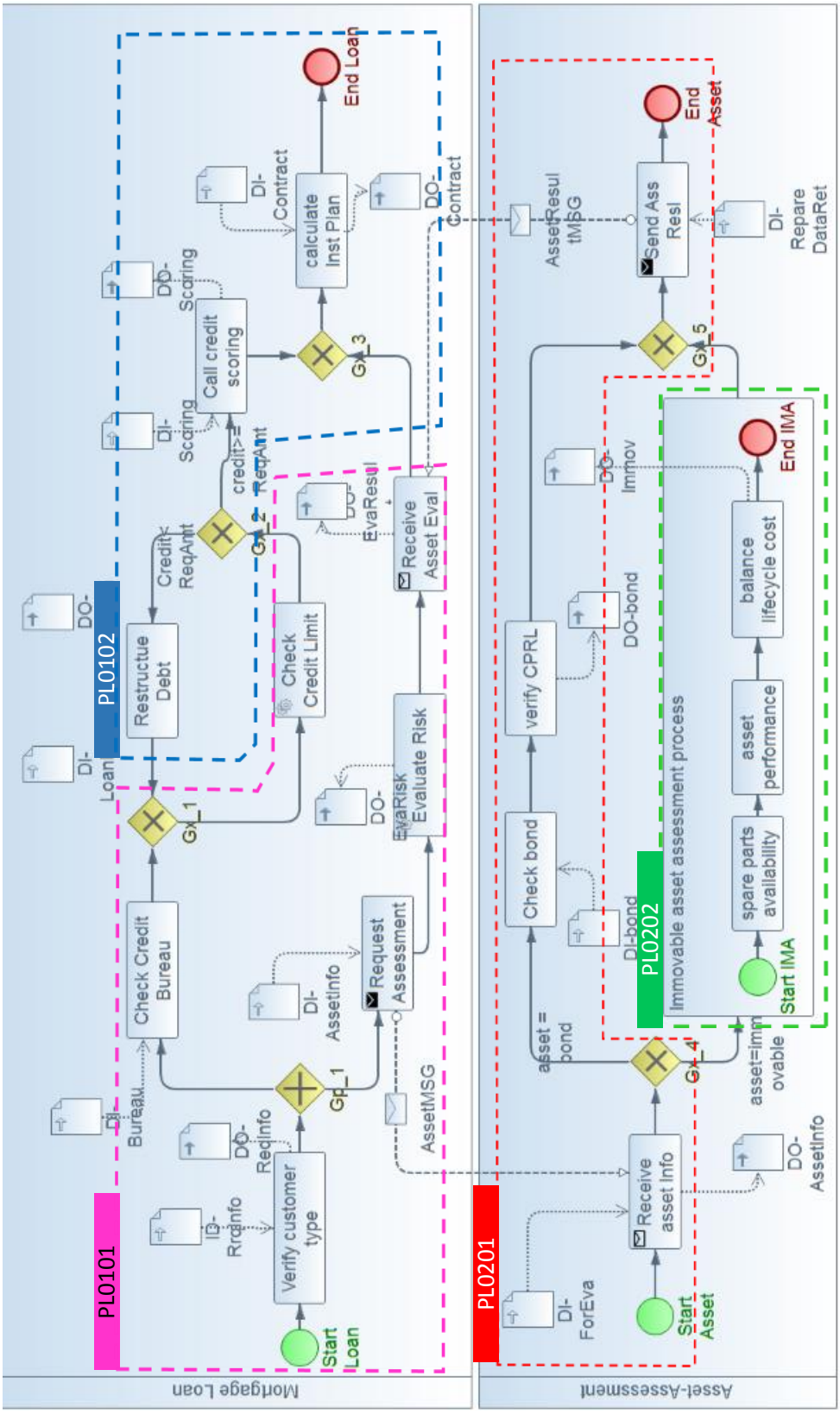
Line	Log
1	First step----<Gateway pairwise analysis>
2	Model: Partiton weight Config. is 30.00
3	[Partition ID][Weight]: Element list
4	[0101][6.00]: Start Loan, Verify customer type
5	[0102][15.00]: Gp_1, Receive Asset Eval, Request Assessment, Evaluate Risk, Check Credit Bureau
6	[0103][6.00]: Gx_1, Check Credit Limit
7	[0104][18.00]: End Loan, Gx_3, Gx_2, Restructue Debt, Call credit scoring, calculate Inst Plan
8	[0201][6.00]: Receive asset Info, Start Asset
9	[0202][15.00]: Gx_5, Gx_4, Immovable asset assessment process , Check bond, verify CPRL
10	[0203][6.00]: End Asset, Send Ass Resl
11	[0101][15.00]: End IMA, Start IMA, balance lifecycle cost, asset performance, spare parts availability
12	----------
13	Secound step----<Weight-based analysis : Merge partiton>
14	[0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101
15	[0201]: Merge partition , 0202, 0203 with partition 0201

รูปที่ 6-5 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง

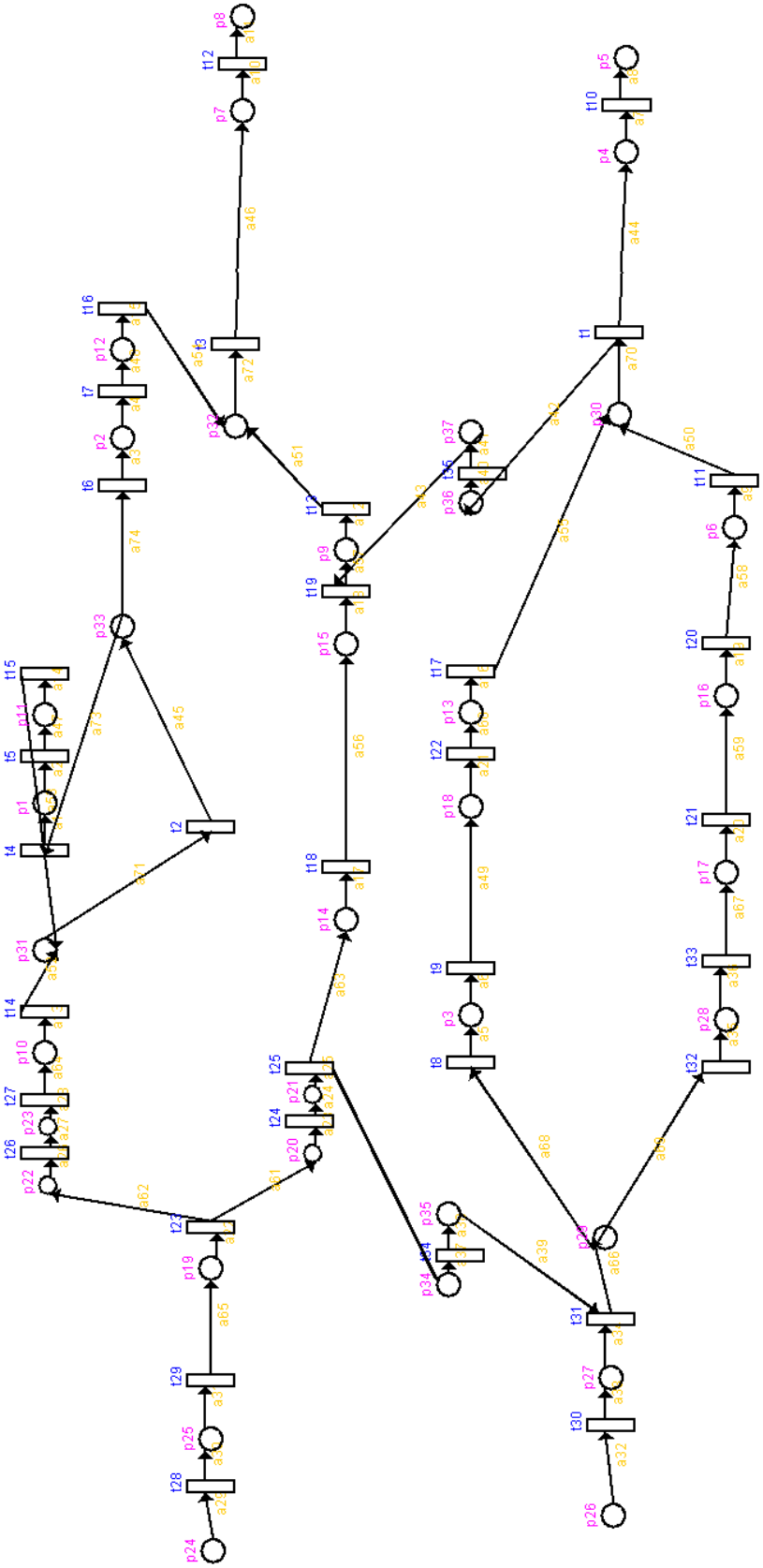
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 6-6 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง



รูปที่ 6-7 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบประเมินสินเชื่อจำนองที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ



รูปที่ 6-8 โมเดลซีพีเอ็นระบบประเมินสินเชื่อจำนอง

จากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 6-8 การสร้างปริภูมิสถานะสร้างจากการกำหนดค่ามาร์คกิงเริ่มต้นที่เพลส p24 ซึ่งเป็นเพลสเริ่มต้นของโมเดล โดยจำนวนและค่าโทเค็นที่กำหนดมีดังนี้

มาร์คกิงที่ 1: 1^("L1","CA-1","1250400040079","CHANON DECHSUPA","SP-01","ASS-01","B",300000);

มาร์คกิงที่ 2: 1^("L1","CA-1","1250400040079","CHANON DECHSUPA","SP-01","ASS-01","B",300000);

1^("L2","CA-2","1250407745975","SIRIPRAPA TIM ARATTA","SP-01","ASS-03","I",250000);

ตารางที่ 6-7 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นของระบบประเมินสินเชื่อจำนอง

ลำดับที่	จำนวนมาร์คกิงเริ่มต้น	สับเน็ต		การสร้างปริภูมิสถานะ	
		สับเน็ตที่เลือกมาสร้างปริภูมิสถานะ	สับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน	จำนวนสถานะ	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง:นาที)
1	1	ทุกสับเน็ต	ไม่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทน	817,671	4.55
2	1	ทุกสับเน็ต	PL0102, PL0202	492,469	2.58
3	1	ทุกสับเน็ต	PL0102	577,468	3.30
4	2	ทุกสับเน็ต	ไม่กำหนดทรานซิชันทดแทน	2,223,976	13.31
5	2	ทุกสับเน็ต	PL0102, PL0202	918,343	5.56
6	2	ทุกสับเน็ต	PL0102	1,868,439	11.25

ข้อมูลที่ปรากฏในตารางได้จากการทดสอบการสร้างปริภูมิสถานะด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ซีพียูขนาด 2.4 กิกะเฮิร์ทซและหน่วยความจำ 8 กิกะไบต์

หลังจากสร้างปริภูมิสถานะแล้วผู้วิจัยได้ทวนสอบโมเดลด้วยคำค้นปริภูมิสถานะจำนวน 5 คำค้นเพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบว่าปริภูมิสถานะที่สร้างถูกต้องตามโมเดลบีพีเอ็มเอ็นนำเข้าและปริภูมิสถานะเป็นไปตามความต้องการ ตารางที่ 6-8 แสดงรายการคำค้นและผลการทวนสอบที่ได้จากปริภูมิลำดับ 4 และ 6 ในตารางที่ 6-7

ตารางที่ 6-8 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบประเมินสินเชื่อจำนองด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ

ลำดับที่	คุณสมบัติที่ทวนสอบ	คำค้นปริภูมิสถานะที่ใช้	ผลการทวนสอบ
1	ทุกทาสก์ของโมเดลสามารถถูกเอ็กซ์ซิคิว	UNREACH()	ผ่าน
2	การคำนวณแผนการผ่อนชำระหนี้จะถูกดำเนินการหลังจากยอดกู้ผ่านการประเมินเกณฑ์ของธนาคารและผ่านการประเมินความเสี่ยงแล้ว	AG_ AND_EF((t7, t3) GA_ AND_EF((t18, t3)	ไม่ผ่าน*
3	หลักประกันที่เป็นพันธบัตรจะต้องถูกตรวจสอบความถูกต้องของสินทรัพย์หรือต้องตรวจสอบข้อมูลพันธบัตรเกี่ยวเนื่องและข้อกำหนดในการถือกรรมสิทธิ์เสมอ	EF_IMPLY_EF(t9,t13) EF_IMPLY_EF(t22,t13)	ผ่าน
4	วงเงินกู้ที่ธนาคารที่อนุมัติสัญญาในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ ต้องไม่เกินวงเงินกู้สูงสุด เช่น ต่อเดือนธนาคารจะอนุมัติสัญญาไม่เกิน 30 ล้านบาท (การทวนสอบใช้ตัวอย่างข้อมูลไม่เกิน 1 แสนบาท ถ้าเกิน 1 แสนบาทระบบต้องหยุดสร้างปริภูมิสถานะ)	Watch(“MaxLimit>=100000”)	ผ่าน
5	กรณีหลักประกันเป็นอสังหาริมทัพย์ ต้องจัดแผนต้นทุนมวลรวมเพื่อประเมินค่าบำรุงรักษาสินทรัพย์เสมอ	EF(t20)	ผ่าน
6	ทวนสอบความสมบูรณ์ของโมเดล	SOUND()	ผ่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดสอบระบบที่แสดงในตารางที่ 6-8 สามารถอภิปรายผลการทดลองในกรณีทดสอบที่ 2 ได้ผลการทดสอบ “ไม่ผ่าน” เนื่องจากพบว่าจากมาร์คกิงเริ่มต้นทำให้เกิดเหตุการณ์ที่การคำนวณแผนการผ่อนชำระหนี้สามารถถูกดำเนินการได้โดยไม่มีการประเมินความเสี่ยง สาเหตุเกิดจากถ้ายอดขอกู้ถูกประเมินเกณฑ์ของธนาคารแล้วระบบสามารถดำเนินการคำนวณแผนการผ่อนชำระได้ทันที เพราะเกตเวย์ Gx_3 เป็นเกตเวย์เอ็กซ์ครูซีฟ ถ้าข้อมูลจากทาสก์ Call credit scoling หรือจากทาสก์ Receive Asset Eval ทาสก์ใดทาสก์หนึ่งมาถึงเกตเวย์ก่อน, หลังจากนั้นทาสก์ Calculate Inst Plan สามารถทำงานได้ทันที ถ้าต้องการให้โมเดลนี้มีพฤติกรรมตรงตามความต้องการ นักออกแบบต้องเปลี่ยนเกตเวย์ Gx_3 เป็นเกตเวย์ขนานแทนเกตเวย์เอ็กซ์ครูซีฟ

6.3. กรณีทดสอบที่ 3: การทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก

กรณีทดสอบที่ 3 นี้เป็นการทดสอบด้วยโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่กระบวนภายในโมเดลมีพูลแยกกลุ่มของกระบวนการประกอบด้วย 3 พูล อีกทั้งระหว่างกระบวนการมีการส่งข้อความถึงกัน การทดลองนี้ใช้กรณีตัวอย่างโมเดลระบบค้าปลีกของห้างสรรพสินค้าแห่งหนึ่ง เป็นระบบระบบบขายหน้าร้านของสินค้ากลุ่มพิเศษที่ต้องมีการควบคุมและรายงานทางการเงินทุกทรานแซกชัน ระบบต้องส่งข้อมูลการขายแบบทันทีที่มีการขายเกิดขึ้นเนื่องจากเป็นสินค้าที่มีมูลค่าสูงและเกี่ยวข้องกับการประกันสินค้า ระบบจำหน่ายหน้าร้านในงานวิจัยนี้แสดงเฉพาะส่วนของเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับ 1) ฝ่ายการเงินการบัญชี (Finance and accounting) 2) ระบบขายหน้าร้าน (Point of sale: POS) และ 3) ระบบคลังสินค้าและการตลาด (Inventory and marketing) เมื่อพนักงานเปิดทรานแซกชันการขายพนักงานต้องระบุรหัสพนักงานที่ขายสินค่าและขอเปิดบัญชีเพื่อขอทำการขาย ฝ่ายบัญชีจะสร้างและส่งรหัสหัวบัญชีให้ระบบขายหน้าร้านนำรหัสบัญชีไปใช้ และพนักงานทำการระบุสินค้าและรหัสสมาชิกเพื่อทำการขายและให้ส่วนลด รายการขายแต่ละรายการอาจมีโปรโมชัน หรือลูกค้าอาจได้รับโปรโมชันอื่นนอกเหนือจากส่วนลดรายการเพิ่มเติมอีก เช่นส่วนลดซ้ำซ้อนร่วมกับบัตรเครดิตเป็นต้น รวมทั้งกรณีที่ลูกค้าเป็นพนักงาน ลูกค้าอาจได้ส่วนลดสวัสดิการพนักงาน รายการส่วนลดทั้งหมดจะถูกคำนวณและใช้สรุปยอดท้ายใบเสร็จที่ลูกค้าต้องจ่ายและทำการจบทรานแซกชันการขาย รายละเอียดของทาสก์ของระบบค้าปลีกแสดงในตารางที่ 6-9

ตารางที่ 6-9 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก

ชื่อทาสก์	**รายละเอียด**
Set Pos Prod	ขอเปิดทรานแซกชันการขายโดยร้องขอรหัสเปิดหัวปัญหาสินค้าพิเศษ (สินค้าเนชันไวด์และสินค้าแบรนด์เนม)
Open HeadAcc	ขอเปิดรหัสบัญชีพิเศษเพื่อขอหมายเลขพิเศษตรวจสอบ
Gen CheckSum	สร้างรหัสตรวจสอบของผังบัญชีเพื่อการขายผ่านระบบจำหน่ายหน้าร้าน
Send HeadAcc	ส่งรหัสบัญชีพิเศษให้ระบบจำหน่ายหน้าร้าน
Get RecAccTran	รับรหัสบัญชีพิเศษเพื่อเปิดทรานแซกชันการขาย
Get-MemCode	รับข้อมูลสมาชิกเพื่อขอรับส่วนลดปกติและส่วนลดซ้ำซ้อนร่วมกับบัตรเครดิต
Insert SaleItem	ระบบจำหน่ายหน้าร้านรับข้อมูลสินค้า หรือของแถม
Inv SetHold	ระบบจำหน่ายหน้าร้านส่งข้อมูลเพื่อตัดจำนวนและประกัน และเรียกบริการคำนวนโปรโมชันของระบบควบคุมของแถมสูญหาย
Set Inven HoldItem	กำหนดสินค้าทดลองขายและจำนวนสินค้าคงคลัง
Set-ProdY-Insur	กำหนดสินค้าเนชันไวด์เพื่อรับประกันสินค้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6-9 รายชื่อทาสก์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก (ต่อ)

ชื่อทาสก์	**รายละเอียด**
Set-ProdB-Insur	กำหนดสินค้าสินค้าแบรนด์เนมเพื่อรับประกันสินค้า
Rec Call Item Pro	เรียกบริการส่วนลดร่วมกับบัตรเครดิตและออนท็อป
Call PMCR	ระบบจำหน่ายหน้าร้านส่งข้อมูลเพื่อขอคำนวณส่วนลด
Cal PMCR Pro	รับข้อมูลเพื่อขอคำนวณส่วนลดซ้ำซ้อนร่วมกับบัตรเครดิต
Rec- MKPro	ระบบจำหน่ายหน้าร้านรับข้อมูลโปรโมชันจากจากฝ่ายการตลาด
Cancel SaleTran	ยกเลิกทรานแซกชันการขาย
Send Mem AccCode	ฝ่ายบัญชีส่งรหัสบัญชีให้ฝ่ายการตลาดเพื่อทำ Reconsign
Ret-ProInfo	ฝ่ายการตลาดส่งข้อมูลโปรโมชันให้ระบบจำหน่ายหน้าร้านเพื่อจบทรานแซกชันการขาย
Crear-EmpDisc	คืนส่วนลดสำหรับลูกค้าที่เป็นพนักงานที่มีการยกเลิกการขาย
IC-S-Disc	กำหนดส่วนลดพิเศษด้วยรหัสส่วนกลางสำหรับลูกค้าพิเศษ
Cal-BalDisc	คำนวณมูลค่าส่วนลดคงเหลือของลูกค้าพิเศษ
Close Tran	ลงรายการเพื่อจบทรานแซกชันการขายของระบบจำหน่ายหน้าร้าน

ตารางที่ 6-10 ข้อมูลโมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีกที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือทวนสอบ

รหัสพาร์ทิชัน	**ชื่ออิลีเมนต์ในพาร์ทิชัน**	**ค่าน้ำหนักรวม**
PL0101	StartAcc, Open HeadAcc, G1, Gen CheckSum, G2, GetAccChart, Send MemAcc Code, EndAcc, Send HeadAcc	27
PL0201	Start POS, Set Pos Prod, G3, Cancel SaleTran, G4, Close Tran, End POS, Get RecAccTran, Rec- MKPro	27
PL0202	Start SaleTran, Get-MemCode, GS1, Insert SaleItem, Inv SetHold, GS2, Call PMCR, End SaleTran	24
PL0301	Start INV, Set Inven HoldItem, G5, Set-ProdY-Insur, G6, Rec Call Item Pro , Set-ProdB-Insur	21
PL0302	G7, Cal PMCR Pro, G8, Ret-ProInfo, End INV, Cal MemPro	18
PL0303	IC-S-Disc, G9, Crear-EmpDisc, G10, Cal-BalDisc	15

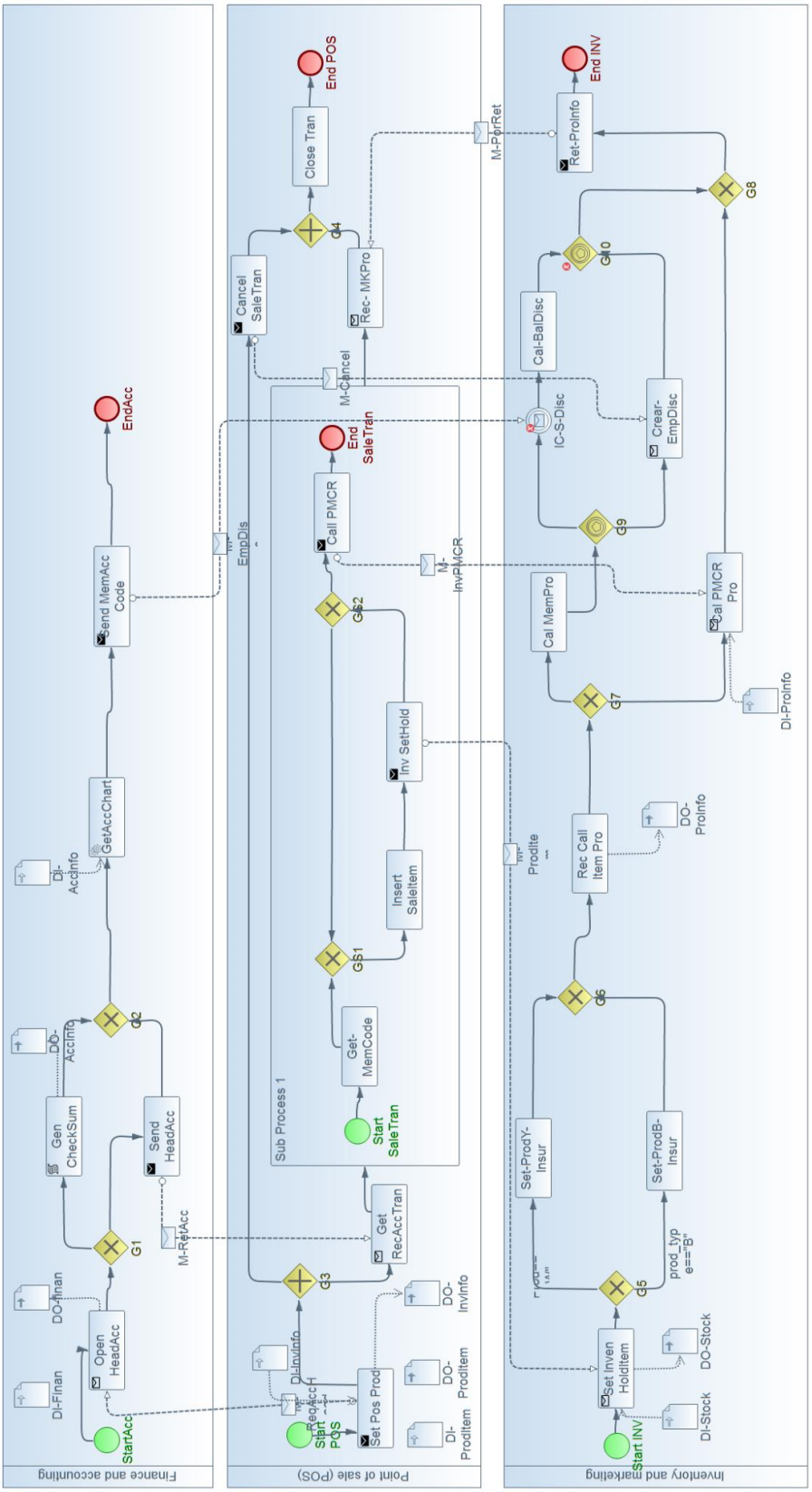
ข้อมูลในตารางได้จากการตั้งค่าน้ำหลักต่ออิลีเมนต์คือ 3 และน้ำหนักรวมต่อพาร์ทิชันสูงสุดคือ 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

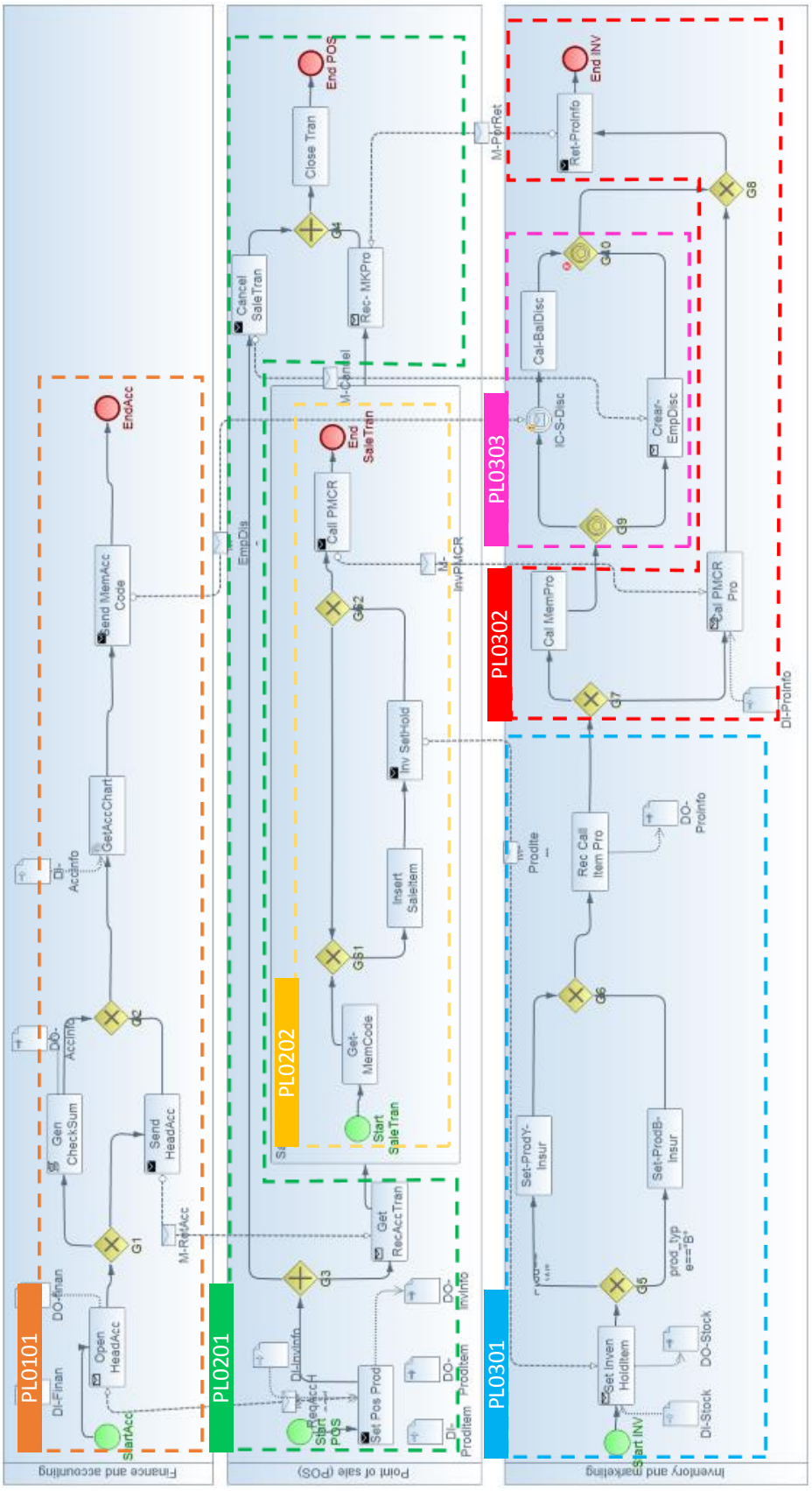
Line	Log
1	First step----<Gateway pairwise analysis>
2	Model: Partiton weight Config. is 30.00
3	[Partition ID][Weight]: Element list , 4 [0101][6.00]: Open HeadAcc, StartAcc
5	[0102][12.00]: G1, G2, Gen CheckSum, Send HeadAcc
6	[0103][9.00]: EndAcc, Send MemAcc Code, GetAccChart, 7 [0201][6.00]: Set Pos Prod, Start POS
8	[0202][12.00]: G3, G4, Get RecAccTran, Cancel SaleTran
9	[0203][12.00]: End POS, Rec- MKPro, Sub Process 1, Close Tran
10	[0301][6.00]: Set Inven HoldItem, Start INV
11	[0302][12.00]: G5, G6, Set-ProdY-Insur, Set-ProdB-Insur, 12 [0303][3.00]: Rec Call Item Pro
13	[0304][12.00]: G7, G8, Cal PMCR Pro, Cal MemPro, 14 [0305][6.00]: End INV, Ret-ProInfo
15	[0306][15.00]: G10, G9, IC-S-Disc, Crear-EmpDisc, Cal-BalDisc
16	[0101][6.00]: Start SaleTran, Get-MemCode, 17 [0102][9.00]: GS1, Inv SetHold, Insert SaleItem
18	[0103][9.00]: End SaleTran, GS2, Call PMCR, 19 [0101][6.00]: Open HeadAcc, StartAcc
20	[0102][12.00]: G1, G2, Gen CheckSum, Send HeadAcc
21	[0103][9.00]: EndAcc, Send MemAcc Code, GetAccChart
22	[0201][6.00]: Set Pos Prod, Start POS, 23 [0202][12.00]: G3, G4, Get RecAccTran, Cancel SaleTran
24	[0203][12.00]: End POS, Rec- MKPro, Sub Process 1, Close Tran
25	[0301][6.00]: Set Inven HoldItem, Start INV
26	[0302][12.00]: G5, G6, Set-ProdY-Insur, Set-ProdB-Insur, 27 [0303][3.00]: Rec Call Item Pro
28	[0304][12.00]: G7, G8, Cal PMCR Pro, Cal MemPro, 29 [0305][6.00]: End INV, Ret-ProInfo
30	[0306][15.00]: G10, G9, IC-S-Disc, Crear-EmpDisc, Cal-BalDisc
31	[0101][6.00]: Start SaleTran, Get-MemCode, 32 [0102][9.00]: GS1, Inv SetHold, Insert SaleItem
33	[0103][9.00]: End SaleTran, GS2, Call PMCR
34	----------
35	Secound step----<Weight-based analysis : Merge partiton>
36	[0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101
37	[0201]: Merge partition , 0202, 0203 with partition 0201
38	[0301]: Merge partition , 0302, 0303 with partition 0301
39	[0304]: Merge partition , 0305 with partition 0304
40	[0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101
41	[0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101
42	[0201]: Merge partition , 0202, 0203 with partition 0201
43	[0301]: Merge partition , 0302, 0303 with partition 0301
44	[0304]: Merge partition , 0305 with partition 0304
45	[0101]: Merge partition , 0102, 0103 with partition 0101

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

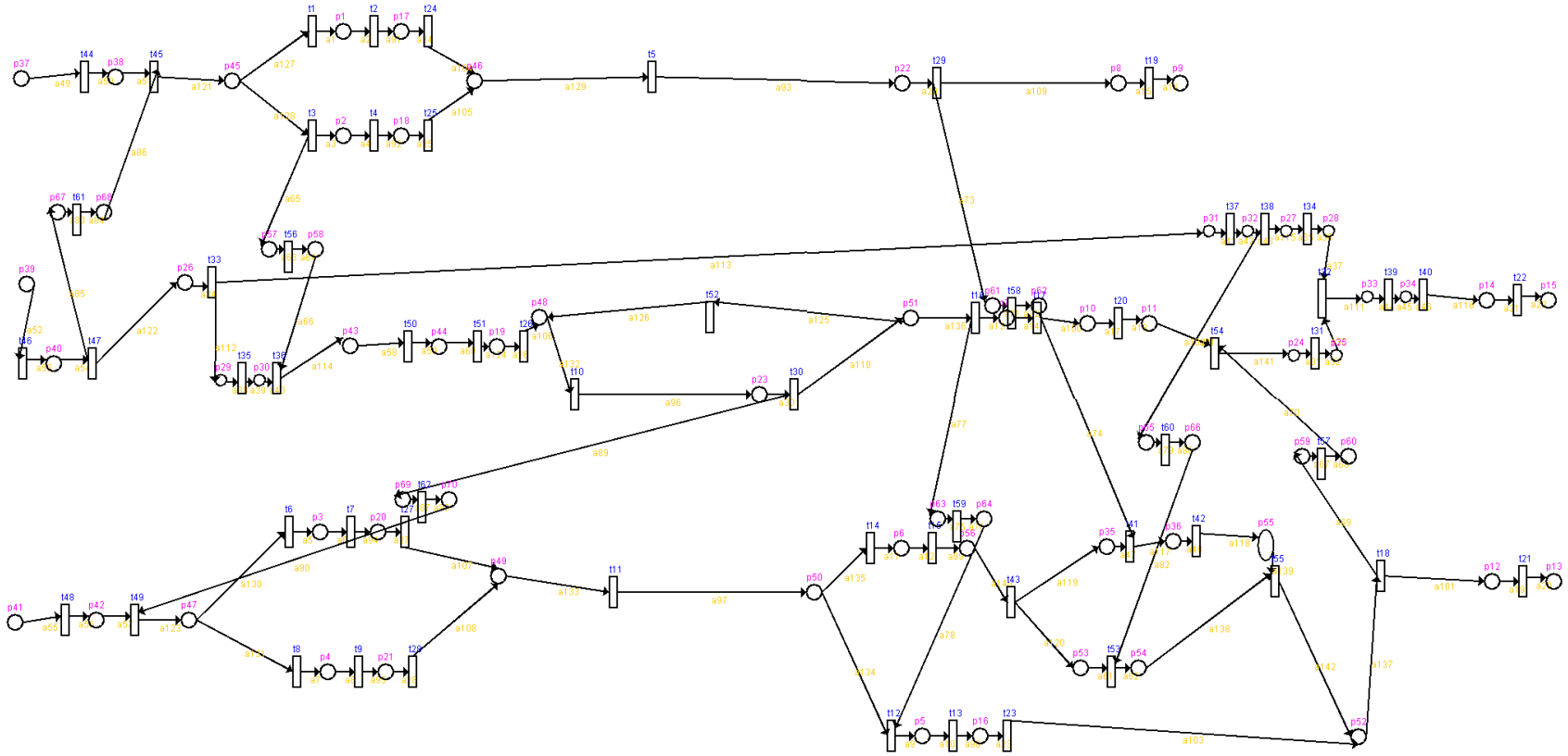
รูปที่ 6-9 ข้อมูลประวัติการแบ่งพาร์ทิชันของระบบค้าปลีก



รูปที่ 6-10 โมเดลบีพีเอ็มเอ็นของระบบค้าปลีก



รูปที่ 6-11 โมเดลย่อยของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบค้าปลีกที่ได้จากการแบ่งด้วยเครื่องมือ



รูปที่ 6-12 โมเดลซีพีเอ็นของระบบค้าปลีก

จากโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ 6-12 การสร้างปริภูมิสถานะสร้างจากการกำหนดค่ามาร์คกิงเริ่มต้นที่เพลส p39 ซึ่งเป็นเพลสเริ่มต้นของโมเดล โดยจำนวนและค่าโทเค็นที่กำหนดมีดังนี้

มาร์คกิงที่ 1: 1^("CAS1","CUS-1","mem-1","IS-01","20180501", "D", 0, 2, “-”, “H-0”);

มาร์คกิงที่ 2: 1^("CAS1","CUS-1","mem-1","IS-01","20180501", "D", 0, 2, “-”, “H-0”);

1^("CAS2","CUS-2","mem-2","IS-02","20180501", "D", 0, 1, “-”, “H-1”);

ตารางที่ 6-11 ข้อมูลปริภูมิสถานะที่สร้างจากโมเดลซีพีเอ็นระบบค้าปลีก

ลำดับที่	จำนวนมาร์คกิงเริ่มต้น	ค่าขอบเขตของเพลส	สับเน็ต		การสร้างปริภูมิสถานะ	
			สับเน็ตที่เลือกมาสร้างปริภูมิสถานะ	สับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นซิชันทดแทน	จำนวนสถานะ	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง:นาที)
1	2	1	ทุกสับเน็ต	ไม่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทน	1,230,363	7.46
2	2	1	ทุกสับเน็ต	PL0202	577,445	3.50
3	2	1	ทุกสับเน็ต	PL0101, PL0202	373,968	2.27
4	2	1	ทุกสับเน็ต	PL0101, PL0202, PL0303	242,458	1.47
5	2	2	ทุกสับเน็ต	ไม่กำหนดทรานซิชันทดแทน	ไม่สามารถสร้างปริภูมิสถานะได้	
6	2	2	ทุกสับเน็ต	PL0202	2,215,670	13.43
7	2	2	ทุกสับเน็ต	PL0101, PL0202	1,142,440	6.54
8	2	2	ทุกสับเน็ต	PL0101, PL0202, PL0303	577,809	3.50

ข้อมูลที่ปรากฏในตารางได้จากการทดสอบการสร้างปริภูมิสถานะบนเครื่องคอมพิวเตอร์ซีพียูขนาด 2.4 กิกะเฮิร์ทซและหน่วยความจำ 8 กิกะไบต์

จากการทดลองสร้างปริภูมิสถานะลำดับที่ 5 ไม่สามารถทำการสร้างปริภูมิสถานะได้เนื่องจากขนาดของปริภูมิสถานะมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะเก็บข้อมูลในหน่วยความจำขณะคำนวณปริภูมิสถานะบนหน่วยความจำขนาด 8 กิกะไบต์ จึงได้มีการกำหนดสับเน็ตให้เป็นทรานซิชันทดแทนก่อนสร้างปริภูมิสถานะ

หลังจากสร้างปริภูมิสถานะแล้วผู้วิจัยได้ทวนสอบโมเดลด้วยคำค้นปริภูมิสถานะจำนวน 7 คำค้นเพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบว่าปริภูมิสถานะที่สร้างถูกต้องตามโมเดลบีพีเอ็มเอ็นนำเข้าและปริภูมิสถานะเป็นไปตามความต้องการ ตารางที่ 6-12 แสดงรายการคำค้นและผลการทวนสอบที่ได้จากปริภูมิลำดับ 5 และ 8 ในตารางที่ 6-11

ตารางที่ 6-12 ตัวอย่างการทวนสอบโมเดลระบบค้าปลีกด้วยคำค้นปริภูมิสถานะ

ลำดับที่	คุณสมบัติที่ทวนสอบ	คำค้นปริภูมิสถานะที่ใช้	ผลการทวนสอบ
1	ทุกทาสก์ของโมเดลสามารถถูกดำเนินการ	UNREACH()	ผ่าน
2	การของแต่ละใบเสร็จสามารถขายสินค้าได้มากกว่า 1 รายการเพื่อรองรับการขายที่มีของแถม	EF_ AND_IMPLY((10, t10)	ผ่าน
3	แต่ละใบเสร็จสามารถคำนวณยอดส่วนลดซ้ำซ้อนร่วมกับบัตรเครดิตได้	Watch(“MaxLimit>=100 000”)	ผ่าน
4	การขายใดๆ ก็ตามที่แคชเชียร์ได้เปิดใบเสร็จแล้วระบบต้องสามารถจบการทำงานการออกใบเสร็จได้	AG_ AND_EF(t50, t40)	ผ่าน
5	เมื่อมีการยกเลิกใบเสร็จ ระบบต้องคืนสวัสดิการให้ลูกค้ากรณีที่ลูกค้าเป็นพนักงานของบริษัทในเครือ	AG_ AND_EF(t38, t53)	ผ่าน
6	จำนวนสินค้าคงคลังทั้งที่เป็นสินค้าหลักและสินค้าโปรโมชันต้องไม่น้อยกว่า 0 หน่วย	Watch(“StockBal>=0”)	ไม่ผ่าน
7	ใบเสร็จการขายต้องใช้รหัสหัวบัญชีเพื่อใช้ในการจบการขายจึงจะสามารถสิ้นสุดกระบวนการได้	AG_AND_EF (t35, t22)	ผ่าน

จากการทดสอบระบบที่แสดงในตารางที่ 6-12 สามารถอภิปรายผลการทดลองในกรณีผลการทดสอบ “ไม่ผ่าน” คำค้นลำดับที่ 6 เนื่องจากโมเดลไม่มีการตรวจสอบจำนวนสินค้าก่อนทำการบันทึกทรานแซกชันการขาย ต้องแก้ไขโดยเพิ่มเกตเวย์เอ็กซ์ครูซีฟก่อนทาสก์ Insert Saletran และยังพบปัญหาว่ารายการขายสินค้าทุกรายการถูกยกเลิกเนื่องจากเกตเวย์ G3 และ G4 เป็นเกตเวย์แบบขนาน ต้องแก้เป็นเกตเวย์เอ็กซ์ครูซีฟ

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นด้วยโมเดลเช็คกิงโดยใช้ซีพีเอ็นอธิบายโมเดลนามธรรมและนำโมเดลซีพีเอ็นที่ได้ไปสร้างและค้นปริภูมิสถานะ งานวิจัยได้เสนอวิธีการจัดการปัญหาการทวนสอบคุณสมบัติความปลอดภัย สมบัติความสมบูรณ์ และการตรวจสอบค่ายืนยงของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีขนาดใหญ่ การแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นออกเป็นโมเดลย่อยและการจัดโครงสร้างโมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้นถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหาปัญหาการระเบิดของปริภูมิสถานะ วิธีการที่เสนอได้ถูกพัฒนาเป็นกรอบงานเพื่อช่วยแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลนามธรรมที่อธิบายซีพีเอ็น และกรอบงานยังสามารถสร้างและค้นปริภูมิสถานะพร้อมทั้งรายงานผลว่าโมเดลที่ทวนสอบมีคุณสมบัติความปลอดภัย สมบัติความสมบูรณ์ และละเมิดค่ายืนยงหรือไม่

จากวิธีทวนสอบที่เสนอและกรอบงานที่ได้พัฒนา การตรวจสอบความถูกต้องและทดสอบการใช้งานระบบใช้วิธีทดสอบกับโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 3 กรณีศึกษาที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบที่ไม่มีพูลและมีพูล การทดสอบเน้นการตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของกรอบงาน 3 ด้านคือ

1) การสกัดโมเดลแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลย่อย
2) การแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น
3) การสร้างและค้นปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการทดสอบพบว่ากรอบงานสามารถแบ่งโมเดลบีพีเอ็มเอ็นออกเป็นโมเดลย่อยด้วยการพิจารณาเงื่อนไขคู่ของเกตเวย์และค่าน้ำหนักได้อย่างถูกต้องตามที่กำหนด ส่วนของการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นได้ผลลัพธ์ตามขอบเขตที่กำหนด การสร้างปริภูมิสถานะรวมถึงการค้นปริภูมิสถานะระบบสามารถตรวจสอบคุณสมบัติความปลอดภัย ความสมบูรณ์ และตรวจสอบการละเมิดค่ายืนยงได้ อย่างไรก็ตาม การทำงานของระบบครอบคลุมเฉพาะสัญลักษณ์พื้นฐานของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ซึ่งยังมีข้อจำกัดในบางสัญลักษณ์และบางพฤติกรรม เพื่อให้การทำงานสะดวกมากขึ้นควรมีการขยายขีดความสามารถของกรอบงานให้ครอบคลุมทุกสัญลักษณ์ของบีพีเอ็มเอ็นและมีเครื่องมือที่สามารถทำการปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็นให้ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้นตามข้อเสนอแนะในหัวข้อ 7.3

7.2. ข้อจำกัด

ระบบมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้อิลีเมนต์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นบางกลุ่ม ซึ่งไม่รองรับการใช้อิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นดังต่อไปนี้

1) ไม่รองรับโมเดลที่ใช้สัญลักษณ์ สวิมเลนส์, เกตเวย์ซับซ้อน (Complex gateway), เกตเวย์แบบอิงเหตุการณ์แบบเอ็กซ์ครูซีฟ (Exclusive event based gateway), กลุ่ม (group)
2) ไม่รองรับกรณีที่ทาสก์มีการกำหนดมาร์คเกอร์ (Markers) ที่ประกอบด้วย ลูป (Loop) มัลติอินสแตนซ์ (multiple instances) และชดเชย (Compensation) เนื่องจากมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็นที่ได้ซึ่งการปรับแต่งโมเดลขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละโดเมน
3) ไม่รองรับสัญลักษณ์ ทรานแซกชัน, การเรียกใช้ (Call process), โฟลว์ที่ไม่ปกติ (Exception flows) และโฟลว์ชดเชย (Compensation flows)
4) สัญลักษณ์เหตุการณ์ (Event Symbols) รองรับเพียง เหตุการ์เริ่มต้น, เหตุการณ์สิ้นสุด, เหตุการณ์การส่งข้อความ และเหตุการณ์การรับข้อความเท่านั้น

ข้อจำกัดด้านโมเดลซีพีเอ็นและการสร้างปริภูมิสถานะ

1) อินสคริปชันของอาร์กนำออกอยู่บนสมมติฐานว่าการเขียนอินสคริปชันถูกต้องตามวายสัมพันธ์ของภาษาจาวา
2) ความต้องกันระหว่างโทเค็นคัลเลอร์กับคัลเลอร์เซ็ตของเพลสยังไม่ได้ตรวจสอบ เนื่องจากมีความซับซ้อนของชนิดตัวแปรและอินสคริปชันของอาร์กนำเข้าและนำออก
3) เครื่องมือยังไม่รองรับการทำโอเปอร์เรชันกับโทเค็นคัลเลอร์ของมาร์คกิง
4) กรณีทวนสอบแบบลำดับชั้นที่มีมากกว่า 1 พูลควรใช้เทคนิคการทวนสอบทีละพูล ก่อนหลังจากนั้นจึงทำการรวมพูเข้าด้วยกันภายหลัง
5) ระบบสามารถเก็บข้อมูลขณะคำนวณปริภูมิสถานะได้สูงสุดประมาณ 40 ล้านสถานะ (ขึ้นอยู่กับหน่วยความจำของเครื่องที่ใช้สร้างปริภูมิสถานะ)
6) คำค้นปริภูมิสถานะเป็นรูปแบบตายตัว (Fixed form) และไม่สามารถนำคำสั่งที่มีไปสร้างเป็นปืนคำสั่งประกอบ (Neted commands) ได้
7) จากหลักการพิจารณาสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนและคำค้นปริภูมิสถานะในหัวข้อ 4.5.2 ในบทที่ 5 ซึ่งข้อจำกัดของการทวนสอบแบบลำดับชั้น นักออกแบบจะสามารถทวนสอบสถานะที่เกิดจากทรานซิชันทดแทนเฉพาะสถานะที่เกิดจากตัวแปรกลางเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

7.3. ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

การออกแบบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่มีระดับนามธรรมระดับล่างมักจะมีพฤติกรรมการทำงานที่ซับซ้อน เช่น มีการกำหนดพฤติกรรมเฉพาะบริเวณ (Region) และการทำงานแบบทรานแซกชัน (Transaction) เพื่อให้เครื่องมือรองรับการทำงานดังกล่าวควรมีการขยายขีดความสามารถของเครื่องมือดังนี้

1) กฎการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลซีพีเอ็นควรครอบคลุมสัญลักษณ์ทรานแซกชัน และควรรองรับการกำหนดตัวแปรโกลบอลที่ใช้กับเฉพาะกระบวนการย่อยที่เฉพาะเจาะจง และสามารถทวนสอบการใช้ทรัพยากรร่วมกัน (Shared resources) ของส่วนนั้นๆ ได้
2) โมเดลย่อยที่ได้จากการแบ่งของระบบควรขยายขีดความสามารถให้ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งขนาดของโมเดลย่อยได้
3) การสร้างปริภูมิสถานะใช้เวลาค่อนข้างนาน จึงควรมีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานให้การทำงานให้เร็วขึ้นหรือให้เครื่องมือรองรับการสร้างปริภูมิสถานะแบบขนานได้
4) มัลติไบร์ดิงยังไม่ได้ตรวจสอบการแชร์ตัวแปรกลางที่มีการอ่านตัวแปรโกลบอลพร้อมๆกัน ซึ่งพฤติกรรมนี้เกี่ยวข้องกับเวลา ถ้าขยายขีดความสามารถให้สามารถกำหนดเวลาให้กับแต่ละทาสก์ได้ จะช่วยให้ทวนสอบประสิทธิผล (Performance) ของกระบวนการได้
5) เนื่องจากเครื่องมือยังไม่รองรับการทำโอเปอร์เรชันกับโทเค็นคัลเลอร์ ระบบจึงยังไม่ได้ตรวจสอบความต้องกันระหว่างระหว่างคัลเลอร์เซ็ตของเพลสและค่าโทเค็นคัลเลอร์ ดังนั้นถ้าจะพัฒนาส่วนของการทำโอเปอร์เรชันกับคัลเลอร์เซ็ตจะต้องตรวจสอบความต้องกันระหว่างคัลเลอร์เซ็ตที่เลือกใช้และโทเค็นคัลเลอร์ก่อนนำไปทำโอเปอร์เรชัน แล้วจะสามารถติดตามค่าคัลเลอร์เซ็ตด้วยวิธีเดียวกับการติดตามค่าตัวแปรโกลบอลได้
6) คำสั่งที่ใช้ในการค้นปริภูมิสถานะสามารถพัฒนาให้ครอบคลุมการทวนสอบพฤติกรรมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นเช่น การทวนสอบลูปที่ไม่สิ้นสุด (Infinite loop) ซึ่งจะช่วยให้ลดขนาดของปริภูมิสถานะ อาจใช้วิธีสวิปไลน์แบบติดตามค่าโทเค็นคัลเลอร์
7) คำสั่งที่ใช้ค้นปริภูมิสถานะควรสามารถคำสั่งพื้นฐานมาประกอบกันเพื่อสร้างเป็นคำสั่งประกอบเพื่อเพิ่มความสะดวกในการค้นปริภูมิสถานะ
8) ควรขยายขีดความสามารถให้กำหนดค่าขอบเขตให้กับบริเวณ (Regoin) ที่เฉพาะเจาะจงเพื่อให้รองรับมิวชวลเอ็กซ์คลูชันแบบจำจัดบริเวณได้ ตัวอย่างเช่น กำหนดให้ใน 1 สับเน็ตมีโทเค็นได้มากสุด 1 โทเค็นเท่านั้น
9) จากข้อจำกัดข้อ 7) แนวทางพัฒนาคือให้เขียนคำค้นในรูปแบบเดียวกับการตรวจสอบค่ายืนยง โดยให้เครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะตรวจสอบคุณสมบัติตามคำค้นขณะสร้างปริภูมิสถานะ (On the fly)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
คำอธิบายยูสเคส

ตารางที่ ก-1 คำอธิบายยูสเคสจัดการบัญชีชื่อโครงการ

หมายเลขยูสเคส : UC1	**ชื่อยูสเคส :** จัดการบัญชีชื่อโครงการ
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบสร้างโครงการ ข้อมูลผู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการโดยระบุชื่อโครงการ ไฟล์นำเข้าที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และไฟล์นิยามไอเท็ม	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการสร้างบัญชีชื่อโครงการ ได้แก่ชื่อโครงการ ไฟล์นำเข้าที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และไฟล์นิยามไอเท็ม รวมถึงการแก้ไขสถานะโครงการ	
เงื่อนไขก่อน : ชื่อโครงการต้องไม่ซ้ำกับโครงการที่มีอยู่ในฐานข้อมูลก่อนหน้า	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : Import BPMN model and XSD files Extend : - Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. เลือกสร้างบัญชีชื่อโครงการ 2. ระบบแสดงหน้าจอสำหรับกรอกข้อมูลโครงการ ให้ผู้ใช้ระบุชื่อโครงการ ไฟล์นำเข้าที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และไฟล์นิยามไอเท็ม 3. กรอกข้อมูลรายละเอียดของโครงการ 4. บันทึกข้อมูล	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 1. ค้นข้อมูลโครงการ 2. ระบุชื่อโครงการที่ต้องการค้นหา 3. เลือกชื่อโครงการที่ต้องการ 4. กรอกข้อมูลรายละเอียดที่ต้องการแก้ไข 5. บันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล	
เงื่อนไขหลัง: ข้อมูลโครงการถูกบันทึกเข้าฐานข้อมูล	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-2 คำอธิบายยูสเคสนำเข้าไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นและไฟล์เอ็กซ์เอสดี

หมายเลขยูสเคส : UC2	**ชื่อยูสเคส :** นำเข้าไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นและไฟล์เอ็กซ์เอสดี
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบเลือกไฟล์นำเข้าที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และไฟล์นิยามไอเท็ม	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการไฟล์นำเข้าที่เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็น และไฟล์นิยามไอเท็ม	
เงื่อนไขก่อน : โครงการต้องได้ถูกสร้างเรียบร้อยแล้วและสถานะของโครงการเป็น “เริ่มต้น”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : - Extend : - Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. เลือกไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่เป็นไฟล์นามสกุล .bpm 2. เลือกไฟล์ไฟล์นิยามไอเท็มที่เป็นไฟล์นามสกุล .xsd 3. ระบบแสดงพาร์ทของไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นและไฟล์ไฟล์นิยามไอเท็ม 4. บันทึกข้อมูล	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 1. ยกเลิกการนำเข้าไฟล์โดยการเลือกเมนูยกเลิกการดำเนินการ 2. ระบบยกเลิกโครงการโดยการอัพเดทสถานะเป็น “ร่าง” 3. บันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล	
เงื่อนไขหลัง: 1. ข้อมูลพาร์ทของไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็นและนิยามไอเท็มถูกบันทึกเข้าฐานข้อมูล 2. สถานะโครงการ “ระหว่างดำเนินการ”	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-3 คำอธิบายยูสเคสดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

หมายเลขยูสเคส : UC3	**ชื่อยูสเคส :** ดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ได้นำเข้าจากไฟล์นามสกุล .bpm	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น	
เงื่อนไขก่อน : สถานะของโครงการที่ต้องการดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็นต้องเป็น “ปกติ”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : - Extend : - Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องการดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น 2. เลือกโครงการและเลือก “มุมมองบีพีเอ็มเอ็น” และเลือกประเภทมุมมอง 2.1. เลือกดูแบบขนาดปกติ 2.2. เลือกดูแบบเต็มหน้าจอ	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: -	
เงื่อนไขหลัง: -	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-4 คำอธิบายยูสเคสแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น

หมายเลขยูสเคส : UC4	**ชื่อยูสเคส :** แปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบ	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น	
เงื่อนไขก่อน : 1. สถานะของโครงการต้อง “ปกติ” 2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นต้อง “ผ่าน”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : - Extend : - Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น 2. เลือกโครงการและเลือกเมนู “มุมมองบีพีเอ็มเอ็น” 3. เลือกประเภทมุมมองแบบขนาดปกติ 4a. เลือกเมนูแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น 5. ระบบแสดงข้อความยืนยันการแปลงโมเดล	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 4b. เลือกเมนูแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น ระบบแสดงข้อความกรณีที่มีการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นไปเป็นโมเดลซพีเอ็นแล้ว 4b.1. ยืนยันการล้างข้อมูลโมเดลซีพีเอ็นที่มีอยู่ เพื่อทำการแปลงโมเดลอีกครั้ง	
เงื่อนไขหลัง: 1. สถานะโครงการ “ปกติ” 2. โมเดลซีพีเอ็นมีสถานะ “สมบูรณ์”	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-5 คำอธิบายยูสเคสดูโมเดลซีพีเอ็น

หมายเลขยูสเคส : UC5	**ชื่อยูสเคส :** ดูโมเดลซีพีเอ็น
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบ	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนการดูโมเดลซีพีเอ็น	
เงื่อนไขก่อน : 1. สถานะของโครงการต้อง “ปกติ” 2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็น “ผ่าน”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : - Extend : - Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องดูโมเดลซีพีเอ็น 2a. เลือกโครงการและเลือกเมนู “มุมมองซีพีเอ็น” 3. เลือกรูปแบบการดูโมเดล 3.1. เลือกแบบดูทั้งโมเดล 3.2. เลือกแบบดูรายสับเน็ต	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 2b. ไม่พบข้อมูลโมเดลซีพีเอ็น ไม่พบมุมมองซีพีเอ็น ซึ่งมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการแปลงโมเดลไม่สมบูรณ์ 2b.1. ยืนยันการล้างข้อมูลโมเดลซีพีเอ็นที่มีอยู่ 2b.2. สร้างโมเดลซีพีเอ็นจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นอีกครั้ง	
เงื่อนไขหลัง: -	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-6 คำอธิบายยูสเคสปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น

หมายเลขยูสเคส : UC6	**ชื่อยูสเคส :** ปรับแต่งโมเดลซีพีเอ็น
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบ	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการปรับแต่งโมเดลประกอบด้วย 1) การแก้ไขคัลเลอร์เซ็ตของเพลส 2) การแก้ไขอินสคริปชันของอาร์กนำเข้า 3) การแก้ไขอินสคริปชันของอาร์กนำออก 4) การแก้ไขเงื่อนไขของทรานซิชัน	
เงื่อนไขก่อน : 1. สถานะของโครงการต้อง “ปกติ” 2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นต้อง “ผ่าน”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Include : View CPN Model ,Extend : - ,Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องการปรับแต่งโมเดล 2. เลือกโครงการและเลือกเมนู “มุมมองบีพีเอ็มเอ็น” 3. เลือกประเภทมุมมองแบบขนาดปกติ หรือแบบดูรายสับเน็ต 4a. คลิกที่อิลีเมนต์เพลสของโมเดลซีพีเอ็น 4a.1. แก้ไขข้อมูลเพลสที่ประกอบด้วย คัลเลอร์เซ็ต ชื่อเพลส ค่าขอบเขต และมาร์คกิงเริ่มต้น 5. บันทึกการแก้ไขข้อมูล	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 4b. คลิกที่อิลีเมนต์อาร์กนำเข้าของโมเดลซีพีเอ็น 4b.1. แก้ไขอินสคริปชันของอาร์กนำเข้า 4c. คลิกที่อิลีเมนต์อาร์กนำออกของโมเดลซีพีเอ็น 4c.1. แก้ไขอินสคริปชันของอาร์กนำออก 4d. คลิกที่อิลีเมนต์ทรานซิชันของโมเดลซีพีเอ็น 4d.1. แก้ไขเงื่อนไขของทรานซิชัน	
เงื่อนไขหลัง: 1. สถานะโครงการ “ปกติ” 2. โมเดลซีพีเอ็นที่มีสถานะ “สมบูรณ์”	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-7 คำอธิบายยูสเคสสร้างปริภูมิสถานะ

หมายเลขยูสเคส : UC7	**ชื่อยูสเคส :** สร้างปริภูมิสถานะ
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบ	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการสร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็น โดยการสร้างปริภูมิสถานะมี 2 แบบคือ สร้างปริภูมิสถานะจากโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและแบบมีลำดับชั้น	
เงื่อนไขก่อน : 1. สถานะของโครงการต้อง “ปกติ” 2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นต้อง “ผ่าน”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Use : - Extend : Search state space Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องการสร้างปริภูมิสถานะ 2. เลือกโครงการและเลือกเมนู “มุมมองซีพีเอ็น” 3. เลือกทุกสับเน็ตเพื่อนำไปสร้างปริภูมิสานะ 4. เลือกโครงสร้างแบบไม่มีลำดับชั้น 5. เลือกเมนูสร้างปริภูมิสถานะ 6. ตั้งชื่อปริภูมิสถานะที่ต้องการ 7. บันทึกข้อมูลปริภูมิสถานะ	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 3b. เลือกบางสับเน็ตเพื่อนำไปสร้างปริภูมิสานะ 4b. กำหนดสับเน็ตที่เลือกเป็นทรานซิชันทดแทนเพื่อให้โครงสร้างโมเดลเป็นแบบลำดับชั้น 5b. เลือกเพิ่มการติดตามการสร้างปริภูมิสถานะ (Add watches)	
เงื่อนไขหลัง: 1. สถานะโครงการ “ปกติ” 2. โมเดลซีพีเอ็นที่มีสถานะ “สมบูรณ์” 3. สถานการณ์สร้างปริภูมิสถานะ “สมบูรณ์”	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-8 คำอธิบายยูสเคสค้นปริภูมิสถานะ

หมายเลขยูสเคส : UC8	**ชื่อยูสเคส :** ค้นปริภูมิสถานะ
ผู้เกี่ยวข้องหลัก : นักออกแบบ	
รายละเอียด : เพื่ออธิบายขั้นตอนในการค้นปริภูมิสถานะจากปริภูมิสถานะที่สร้างไว้	
เงื่อนไขก่อน : 1. สถานะของโครงการต้อง “ปกติ” 2. ผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นต้อง “ผ่าน”	
ความสัมพันธ์ : Association : นักออกแบบ Use : - Extend : Search state space Generalization : -	
กระแสเหตุการณ์ปกติ: 1. ค้นหาโครงการที่ต้องการค้นปริภูมิสถานะ 2. เลือกโครงการและเลือกเมนู “มุมมองทวนสอบ” 3. เลือกชื่อปริภูมิสถานะที่ต้องการค้น 4. พิมพ์คำค้น 5. เลือกค้นปริภูมิสถานะจากคำค้นที่ระบุ 6. ระบบแสดงผลการค้นและตัวอย่างข้อมูลประกอบผลการค้นหา	
กระแสเหตุการณ์ทางเลือก: 4b. ค้นหาชื่อทรานซิชันเพื่อนำไปใช้ในการสร้างคำค้น 4c. ค้นหาชื่อฟังก์ชันเพื่อนำฟังก์ชันมาสร้างคำค้น	
เงื่อนไขหลัง: -	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
การ์ดแสดงความรับผิดชอบและผู้ทำงานร่วม

ในส่วนนี้อธิบายการออกแบบฟังก์ชันงานของระบบทวนสอบโมเดลซีพีเอ็นโดยได้ใช้การ์ดแสดงความรับผิดชอบและผู้ทำงานร่วม หรือที่เรียกว่าการ์ดซีอาร์ซี CRC Card : (Class Responsibilities and Collaborators) รายละเอียดมีดังนี้

ตารางที่ ข-1 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโครงการ

หมายเลขคลาส : CRC-1	**ชื่อคลาส :** Project
รายละเอียด : ข้อมูลโครงการเป็นข้อมูลหลักในการดำเนินการทวนสอบ เป็นข้อมูลที่ใช้กำหนดและควบคุมการดำเนินการ	
ความรับผิดชอบ: 1) Manage project information 2) Provide project information	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL CPN_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - Project_id (char) - Project_Name (varchar) - BPMN_file_path(varchar) - XSD_file_path(varchar) - Updated_date(dateTime) - Project_status(char)	
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL, CPN_MODEL	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC-2	**ชื่อคลาส :** BPMN_MODEL
รายละเอียด : โมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นข้อมูลนำเข้าที่เป็นไฟล์นามสกุลบีพีเอ็ม อิลีเมนต์ของโมเดลจะถูกสกัดและใช้เป็นข้อมูลหลักในการสร้างโมเดลซีพีเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide model information 2) Transform BPMN model into CPN model	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_NODE BPMN_EDGE ITEM_DEFINITION
ลักษณะประจำข้อมูล: - Model_Name(varchar) - NumOf_Pool(int) - NumOf_Edge(int)	 - Model_Type(varchar) - NumOf_Node(int) - Model_status (char)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_NODE, BPMN_EDGE, ITEM_DEFINITION	

ตารางที่ ข-3 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโหนดบีพีเอ็มเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC-3	**ชื่อคลาส :** BPMN_NODE
รายละเอียด : โหนดบีพีเอ็มเอ็นคืออิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในกลุ่มของโฟลว์ออบเจ็กต์ที่สกัดได้จากไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็น	
ความรับผิดชอบ: Provide node information	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL SUB_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - Node_ID(char) - Note_Type(char) - InputObjects(char) - OperationExpression(varchar) - PredecessorsID(char)	 - Node_Name(varchar) - Note_SubType(char) - OutObjects(char) - Position(double) - SuccessorsID(char)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL, SUB_MODEL	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-4 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสเส้นบีพีเอ็มเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC-4	**ชื่อคลาส :** BPMN_EDGE
รายละเอียด : เส้นบีพีเอ็มเอ็นคืออิลีเมนต์ของบีพีเอ็มเอ็นที่ประกอบด้วยโฟลว์ข้อความและโฟลว์ลำดับ	
ความรับผิดชอบ: Provide edge information	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - Edge_ID(char) - Edge_Type(char) - Destination_Node(char)	 - Edge_Name(varchar) - Source_Node(char) - Attached_Message(char)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL	

ตารางที่ ข-5 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสนิยามไอเท็ม

หมายเลขคลาส : CRC-5	**ชื่อคลาส :** ITEM_DEFINITION
รายละเอียด : นิยามไอเท็มคือคำประกาศตัวแปรและชนิดของตัวแปรที่สกัดได้จากไฟล์เอ็กซ์เอสดีที่ถูกแนบมาในโครงการ ข้อมูลนิยามไอเท็มจะนำไปสร้างเป็นคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปรเพื่อใช้ในโมเดลซีพีเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide item definition information 2) Transform into the color sets 3) Transform into the variables	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - Item_ID(char) - Definition_group(char) - Ref_dataType(char) - Max_Value(decimal)	 - Name_Space(varchar) - Is_ComplexType(char) - Min_Value(decimal) - Variable_length
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสอินสริปชัน

หมายเลขคลาส : CRC-6	**ชื่อคลาส :** INSCRIPTION
รายละเอียด : อินสคริปชันที่ใช้ในโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและที่ใช้ในโมเดลซีพีเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide inscription information 2) Manage inscription for CPN model 3) Check the syntax correctness	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - Inscript_ID(char) - Inscription_text(varchar) - Inscription_location(varchar) - Inscription_type(char) - Original_text(varchar) - Updated_date(dateTime)	
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL	

ตารางที่ ข-7 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลย่อย

หมายเลขคลาส : CRC7	**ชื่อคลาส :** SUB_MODEL
รายละเอียด : โมเดลย่อยคือส่วนที่ได้จากการแบ่งจากโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่เป็นโมเดลหลัก ข้อมูลโมเดลย่อยได้จากการพิจารณาเกตเวย์และค่าน้ำหนัก โมเดลย่อยยังเป็นตัวบ่งบอกขอบเขตของสับเน็ตของโมเดลซีพีเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide sub-model information 2) Manage sub-model information 3) Calculate sub-models	**ผู้ทำงานร่วม:** BPMN_MODEL
ลักษณะประจำข้อมูล: - SubModel_ID(char) - SubModel_CodeCPN(varchar) - Weight(decimal) - Updated_date(dateTime) - SubModel_CodeBPMN(varchar) - Weight(decimal) - Partitioning_log(varchar)	
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: BPMN_MODEL, CPN_TRANSITION	

ตารางที่ ข-8 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลซีพีเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC8	**ชื่อคลาส :** CPN_MODEL
รายละเอียด : เป็นโมเดลซีพีเอ็นที่ได้จากการแปลงอิลีเมนต์ของโมเดลซีพีเอ็น ทุกอิลีเมนต์ของโมเดลซีพีเอ็นจะมีข้อมูลอ้างอิงถึงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide CPN model information 2) View CPN model	**ผู้ทำงานร่วม:** PROJECT , CPN_TRANSITION CPN_PLACE, CPN_ARC
ลักษณะประจำข้อมูล: - Model_ID(char) - NumOf_place(int) - NumOf_arc(int) - Updated_date(dateTime)	 - Model_Name(varchar) - NumOf_Transition(int) - Status (char)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: PROJECT, CPN_PLACE, CPN_TRANSITION, CPN_ARC	

ตารางที่ ข-9 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสเพลสซีพีเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC9	**ชื่อคลาส :** CPN_PLACE
รายละเอียด : ข้อมูลเพลสเป็นส่วนหนึ่งของโมเดลซีพีเอ็น ทุกเพลสของโมเดลซีพีเอ็นสามารถตั้งค่าคุณสมบัติเพื่อกำหนดพฤติกรรมให้กับโมเดลซีพีเอ็น	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide place information 2) Config place properties 3) Initialize the initial marking	**ผู้ทำงานร่วม:** CPN_MODEL COLOR_SET_VAR CPN_ARC
ลักษณะประจำข้อมูล: - Place_ID(char) - Boundary_value(int) - NumOf_Incomming(int) - Updated_date(dateTime)	 - Place_Name(varchar) - Colored_set(char) - NumOf_Outgoing(int)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: CPN_MODEL,CPN_TRANSITION, CPN_ARC	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-10 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสทรานซิชันของโมเดลซีพีเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC10	**ชื่อคลาส :** CPN_TRANSITION
รายละเอียด : ข้อมูลทราชิชันเป็นส่วนหนึ่งของโมเดลซีพีเอ็น ที่มีไว้แสดงการกระทำของกิจกรรมหนึ่งๆ ที่แสดงด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม หรืออาจเป็นทรานซิชันทดแทนที่เป็นตัวแทนของสับเน็ต	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide transition information 2) Config transition properties 3) Manage the guard condition	**ผู้ทำงานร่วม:** CPN_MODEL SUB_MODEL INSCRIPTION CPN_ARC
ลักษณะประจำข้อมูล: - Transition_ID(char) - NumOf_Incomming(int) - Guard_condition(varchar) - Updated_date(dateTime)	 - Transition_Name(varchar) - NumOf_Outgoing(int) - Is_ SubstitutedTrans (char)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: CPN_MODEL, SUB_MODEL, INSCRIPTION, CPN_ARC	

ตารางที่ ข-11 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสอาร์กซีพีเอ็น

หมายเลขคลาส : CRC11	**ชื่อคลาส :** CPN_ARC
รายละเอียด : ข้อมูลอาร์กเป็นส่วนหนึ่งของโมเดลซีพีเอ็น ที่มีไว้แสดงการเปลี่ยนสถานะของระบบ อาร์กคือเส้นเชื่อมต่อระหว่างเพลสและทรานซิชัน พฤติกรรมที่อธิบายบนอาร์กคือ อินสคริปชัน	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide arc information 2) Manage the arc inscription	**ผู้ทำงานร่วม:** CPN_MODEL, CPN_PLAE INSCRIPTION, CPN_TRANSITION
ลักษณะประจำข้อมูล: - Arc_ID(char) - Ref_Inscription(char) - Destination_Node(char)	 - Arc_Name(varchar) - Source_Node(char) - Inscription_text(vachar)
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - CPN_PLACE, CPN_TRANSITION Other associations: CPN_MODEL, INSCRIPTION,	

ตารางที่ ข-12 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปร

หมายเลขคลาส : CRC12	**ชื่อคลาส :** CORLOR_SET_VAR
รายละเอียด : ข้อมูลคัลเลอร์เซ็ตและตัวแปรได้จากการแปลงนิยามไอเท็มของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ข้อมูลจะใช้ในการอธิบายโมเดลซีพีเอ็นในส่วนของอินสคริปชันที่อยู่บนอาร์กและใช้ในการอิบายเงื่อนไขของทรานซิชัน และใช้กำหนดคัลเลอร์เซ็ตให้กับเพลส	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide color set or variable information 2) Manage coor sets or variables	**ผู้ทำงานร่วม:** ITEM_DEFINITION INSCRIPTION CPN_PLACE
ลักษณะประจำข้อมูล: - ID(char) - Type(char(“C”/ “V”)) - Min(int) - Lenght(int) - Name(varchar) - Ref_dataType(char) - Max(int) - Updated_date(dateTime)	
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: ITEM_DEFINITION, INSCRIPTION, CPN_PLACE	

ตารางที่ ข-13 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสโมเดลซีพีเอ็นเพื่อการสร้างปริภูมิสถานะ

หมายเลขคลาส : CRC13	**ชื่อคลาส :** CPN_4GEN_STATE_SPACE
รายละเอียด : ข้อมูลโมเดลซีพีเอ็นที่ใช้สร้างปริภูมิสถานะ	
ความรับผิดชอบ: 1) Provide CPN model information 2) Select sub-net for generating a state space 3) Generate a state space	**ผู้ทำงานร่วม:** CPN_MODEL SUB_MODEL STATE_SPACE
ลักษณะประจำข้อมูล: - MODEL_ID(char) - ListOf_SubNet(varchar) - Model_Name(varchar) - Watch(varchar)	
ความสัมพันธ์: Generalizations: - Aggregations: - Other associations: CPN_MODEL, SUB_MODEL, STATE_SPACE	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

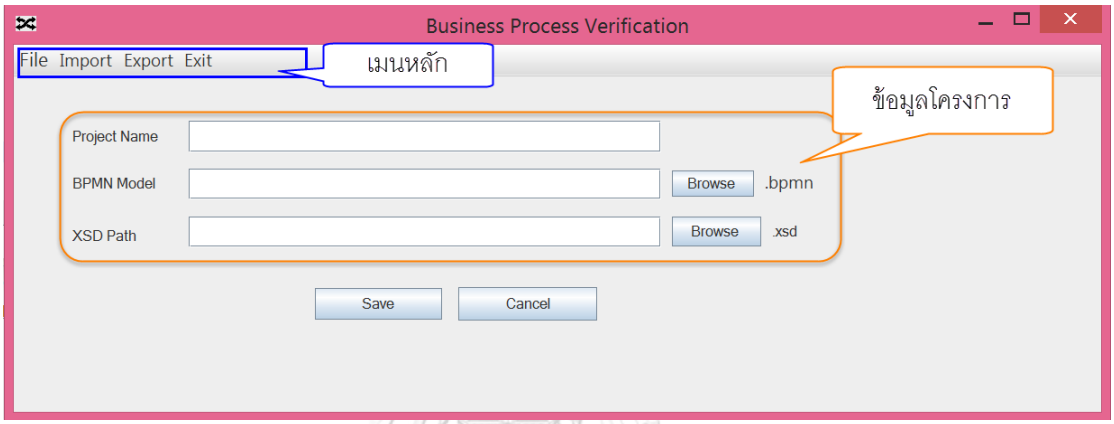
ตารางที่ ข-14 การ์ดซีอาร์ซีของคลาสปริภูมิสถานะ

<table>
<tr><td colspan="2">หมายเลขคลาส : CRC14</td><td>ชื่อคลาส : STATE_SPACE</td></tr>
<tr><td colspan="3">รายละเอียด : ปริภูมิสถานะเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างปริภูมิสถานะ ข้อมูลมีไว้สำหรับทวนสอบว่าพฤติกรรมที่อยู่ในปริภูมิสถานะต้องกันกับความต้องการหรือไม่</td></tr>
<tr><td colspan="2">ความรับผิดชอบ:
1) Provide state space information
2) Search state space
3) Show a counter example</td><td>ผู้ทำงานร่วม:
CPN_4GEN_STATE_SPACE</td></tr>
<tr><td colspan="3">ลักษณะประจำข้อมูล:
- StateSpace_ID (char)
- StateSpace_Name(varchar)
- StateSpace_Size(varchar)
- WatchStatus(char)
- TimeUsed(minutes)</td></tr>
<tr><td colspan="3">ความสัมพันธ์:
Generalizations: -
Aggregations: -
Other associations: CPN_4GEN_STATE_SPACE</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค
การใช้งานระบบ

เมื่อเรียกใช้เครื่องมือทวนสอบโมเดลบีพีเอ็มเอ็นระบบจะแสดงหน้าจอตั้งค่าโครงการเป็นหน้าจอแรก การตั้งค่าโครงการต้องการข้อมูล 3 ส่วนคือ 1) ชื่อโครงการ 2) ไฟล์โมเดลบีพีเอ็มเอ็น และ 3) ไฟล์เอ็กซ์เอสดีที่เป็นนิยามไอเท็ม ผู้ใช้งานจำเป็นต้องระบุข้อมูลให้ครบและคลิกปุ่มบันทึกข้อมูล หน้าจอตั้งค่าโครงการแสดงในรูปที่ ค-1



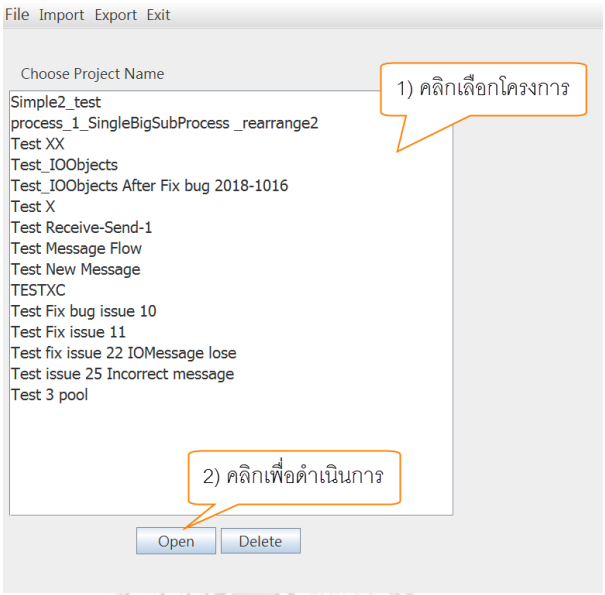
รูปที่ ค-1 หน้าจอตั้งค่าโครงการ

ในกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการตรวจสอบโครงการที่เคยสร้างไว้ ผู้ใช้งานสามารถค้นหาข้อมูลโครงการด้วยเมนู File เลือก Open Project ระบบจะแสดงรายการโครงการที่มีสถานะโครงการเป็น “ปกติ” ทางด้านซ้ายของหน้าจอ ให้ผู้ใช้งานคลิกเลือกโครงการที่ต้องการดำเนินการและคลิกปุ่ม “Open” หน้าจอจะแสดงรายการโครงการ ตัวอย่างหน้าจอแสดงในรูปที่ ค-2 ถ้าผู้ใช้งานต้องการยกเลิกโครงการให้คลิกปุ่ม Delete ซึ่งระบบจะทำการอัพเดทสถานะโครงการเป็น Deleted หลังจากนั้นผู้ใช้งานจะไม่สามารถค้นโครงการที่มีสถานะ Deleted ได้อีก

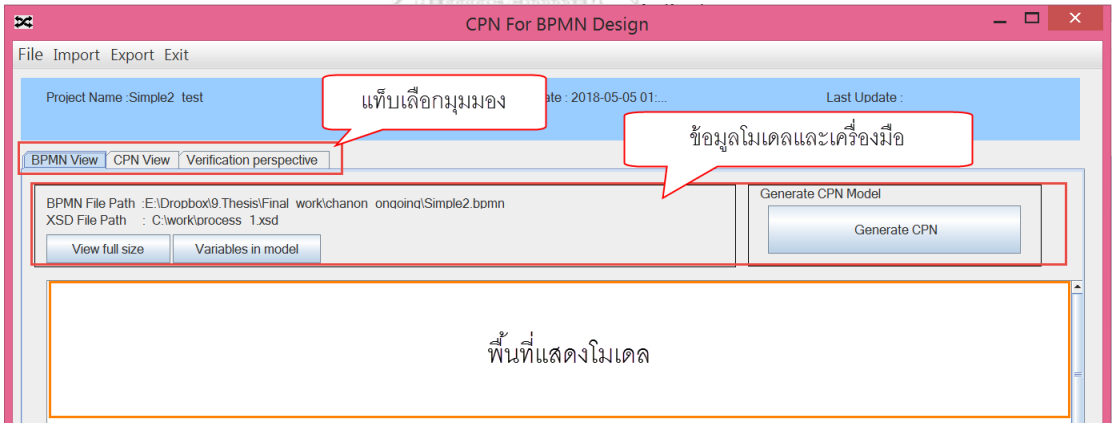
กรณีที่ผู้ใช้คลิกปุ่ม Open ระบบแสดงหน้าจอหลักของโครงการที่เลือก ผังหน้าจอหลักของโครงการแสดงในรูปที่ ค-3 โดยผังหน้าจอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่

1) ส่วนการเลือกดูมุมมองของโมเดล มีไว้สำหรับเลือกดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็น โมเดลซีพีเอ็น และหน้าจอสำหรับค้นปริภูมิสถานะ
2) ส่วนแสดงข้อมูลโมเดลและเครื่องมือ เป็นส่วนที่อธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับโมเดล เช่นไฟล์ที่เป็นโมเดลนำเข้า ข้อมูลตัวแปร และเครื่องมือดำเนินการสำหรับจัดการโมเดล
3) ส่วนพื้นที่แสดงโมเดล ใช้สำหรับแสดงโมเดลบนหน้าจอ ถ้าเป็นหน้าจอมุมมองของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นส่วนนี้ไว้ใช้แสดงโมเดลเท่านั้น ผู้ใช้งานจะไม่สามารถแก้ไขโมเดลบีพีเอ็มเอ็นได้ ใน

กรณีที่เป็นโมเดลซีพีเอ็นผู้ใช้งานสามารถคลิกที่อิลีเมนต์ของซีพีเอ็นเพื่อทำการแก้ไขข้อมูลโมเดลได้



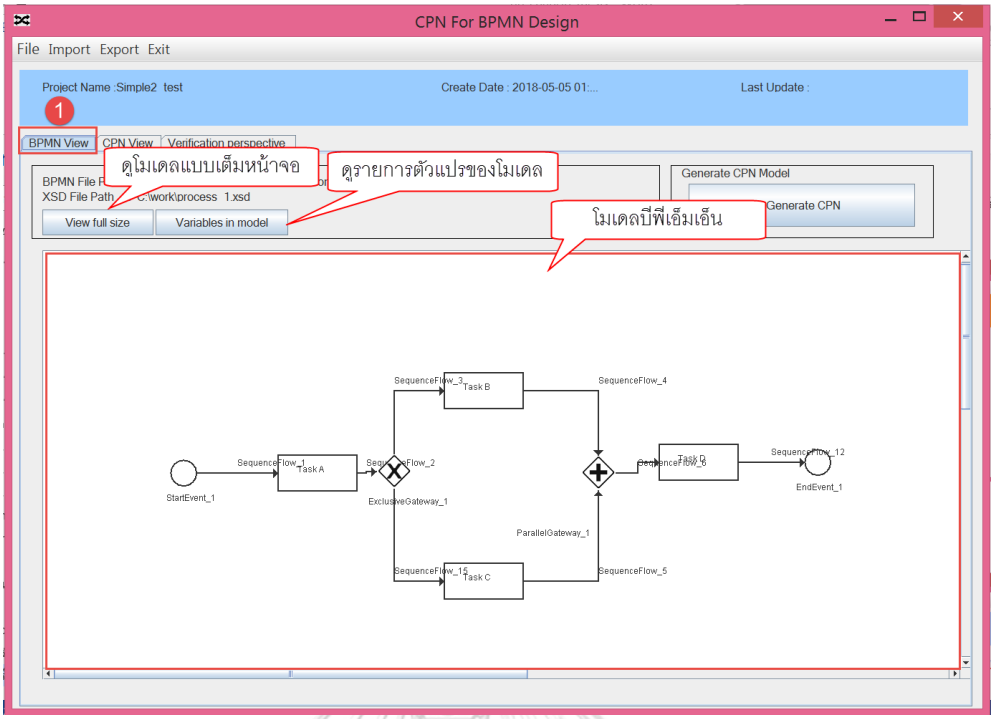
รูปที่ ค-2 หน้าจอแสดงรายการโครงการ



รูปที่ ค-3 ผังหน้าจอหลักของโครงการ

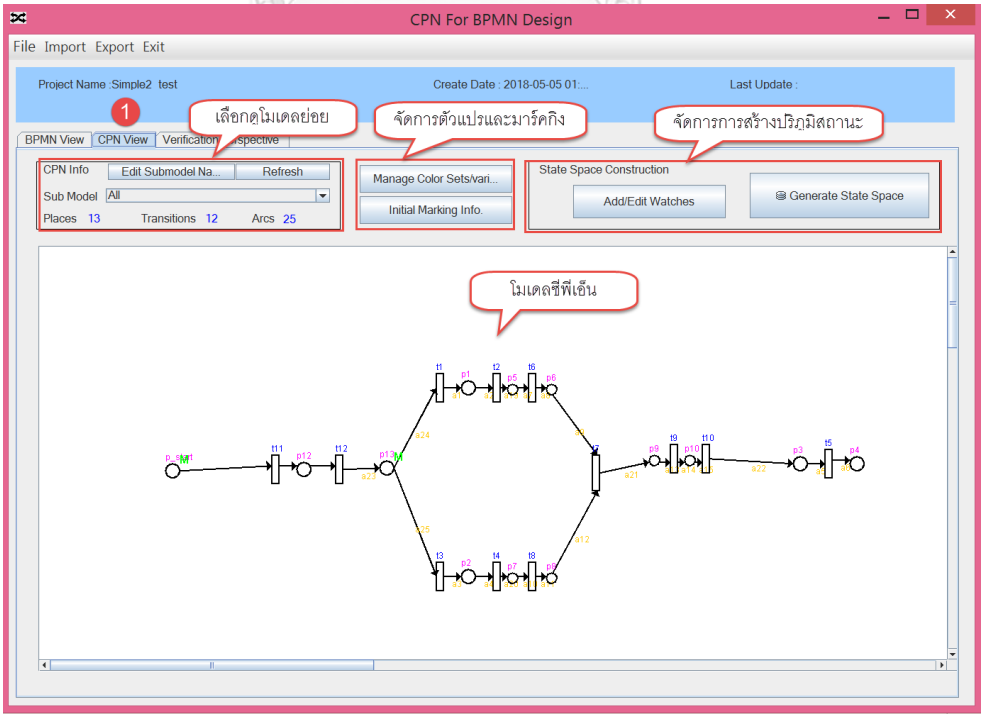
ที่แท็บ BPMN View ระบบแสดงหน้าจอข้อมูลโมเดลบีพีเอ็มเอ็น ตัวอย่างหน้าจอข้อมูลโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแสดงในรูปที่ ค-4 ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ 3 ฟังก์ชันหลักคือ

1) View Full Size ใช้สำหรับดูโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบเต็มหน้าจอ
2) Variables in model ใช้สำหรับดูรายการตัวแปรทั้งหมดของโมเดลบีพีเอ็มเอ็น
3) Generate CPN model เป็นฟังก์ชันที่ใช้แปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น



รูปที่ ค-4 หน้าจอข้อมูลโมเดลบีพีเอ็มเอ็น

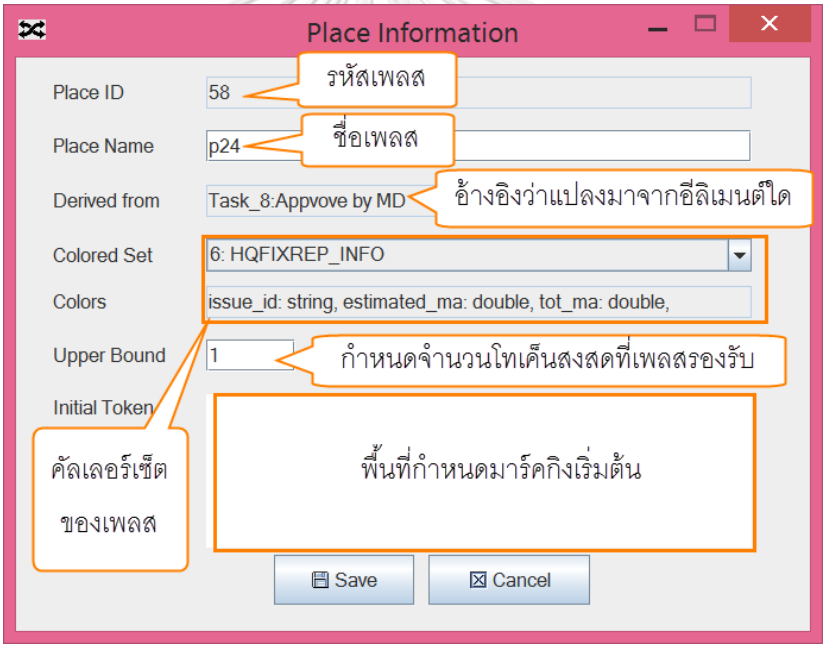
เมื่อโมเดลบีพีเอ็มเอ็นถูกแปลงเป็นโมเดลซีพีเอ็นแล้ว แท็บมุมมองโมเดลซีพีเอ็นจะถูกเปิดใช้งาน รูปที่ ค-5 แสดงหน้าจอในมุมมองของโมเดลซีพีเอ็นและเครื่องมือที่ใช้ในการจัดการโมเดลซีพีเอ็น



รูปที่ ค-5 หน้าจอจัดการโมเดลซีพีเอ็น

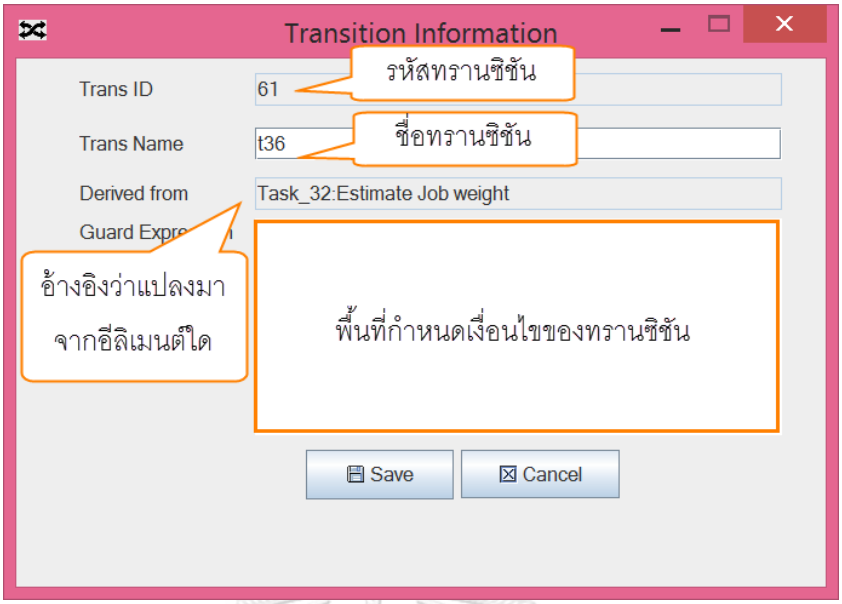
จากรูปที่ ค-5 ฟังก์ชันการทำงานของหน้าจอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ 1) การเลือกดูสับเน็ตของโมเดลซีพีเอ็น สับเน็ตที่ได้ถูกแบ่งอัตโนมัติโดยระบบซึ่งจะไม่สามารถแก้ไขขนาดของสับเน็ตได้ 2) ส่วนของการจัดการตัวแปรและมาร์คกิงเริ่มต้น เพื่อดูตัวแปรทั้งหมดของโมเดลรวมทั้งผู้ใช้งานสามารถเพิ่มตัวแปรเพื่อใช้งานในโมเดลได้ 3) การจัดการการสร้างปริภูมิสถานะมีไว้สำหรับเลือกสับเน็ตเพื่อนำไปสร้างปริภูมิสถานะและเกี่ยวข้องกับการกำหนดเพรดิเคดเพื่อใช้ในการทวนสอบค่ายืนยงระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ

ที่ส่วนแสดงโมเดลซีพีเอ็น เมื่อผู้ใช้งานคลิกที่เพลส ระบบจะแสดงหน้าจอแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับเพลส รหัสเพลสและชื่อเพลสถูกสร้างอัตโนมัติ ผู้ใช้งานจะไม่สามารถเปลี่ยนรหัสเพลสและอ้างอิงอิลีเมนต์ได้ จะสามารถปรับปรุงข้อมูลได้เฉพาะชื่อเพลส กำหนดคัลเลอร์เซ็ตให้กับเพลส กำหนดจำนวนโทเค็นมากสุดที่เพลสรองรับ และกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นให้กับเพลสนั้นๆ รูปที่ ค-6 แสดงหน้าจอจัดการข้อมูลเพลส



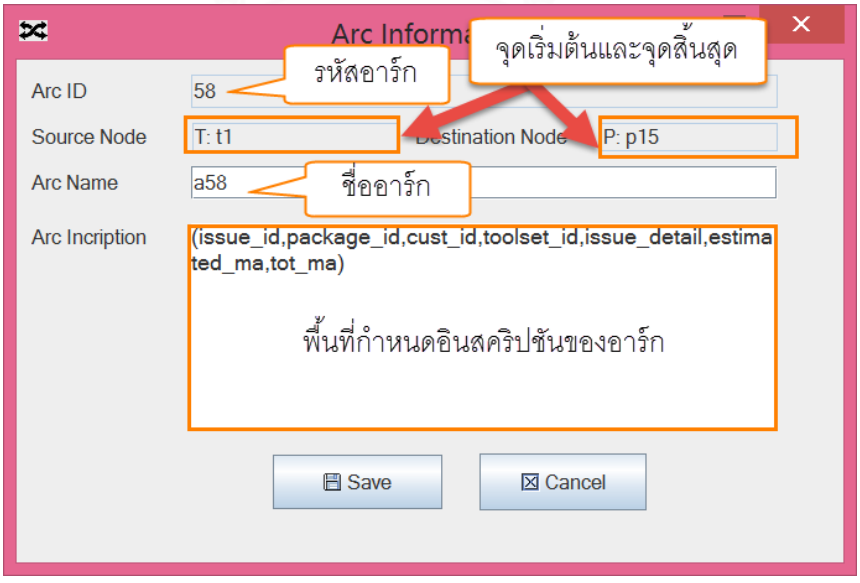
รูปที่ ค-6 หน้าจอจัดการข้อมูลเพลส

เมื่อผู้ใช้งานคลิกที่ทรานซิชันระบบจะแสดงหน้าจอจัดการข้อมูลทรานซิชัน โดยรหัสทรานซิชันและชื่อทรานซิชันถูกสร้างอัตโนมัติตั้งแต่ขั้นตอนการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น ผู้ใช้งานสามารถปรับปรุงชื่อทรานซิชันและเงื่อนไขของทรานซิชันได้ แต่ผู้ใช้งานจะไม่สามารถแก้ไขรหัสอ้างอิงอิลีเมนต์ รูปที่ ค-7 แสดงหน้าจอจัดการข้อมูลทรานซิชัน



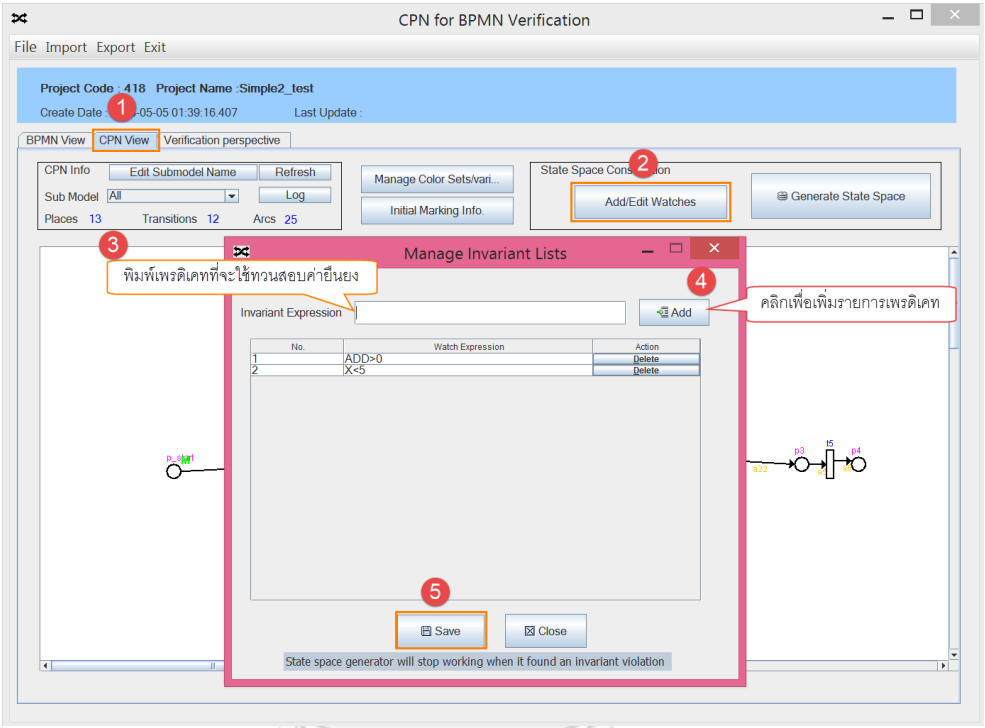
รูปที่ ค-7 หน้าจอจัดการข้อมูลทรานซิชัน

เมื่อผู้ใช้งานคลิกที่อาร์กระบบจะแสดงหน้าจอจัดการข้อมูลอาร์ก รหัสและชื่อของอาร์กถูกสร้างอัตโนมัติตั้งแต่ขั้นตอนการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น ระบบบอกจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของอาร์ก ผู้ใช้งานสามารถปรับปรุงชื่ออาร์กและนสคริปชันของอาร์กได้ แต่ผู้ใช้งานจะไม่สามารถแก้ไขอ้างอิงอิลีเมนต์ ตัวแปรที่ใช้ในอินสคริปชันของอาร์กต้องมีการประกาศตัวแปรก่อนนำมาใช้เสมอ รูปที่ ค-8 แสดงหน้าจอจัดการข้อมูลอาร์ก



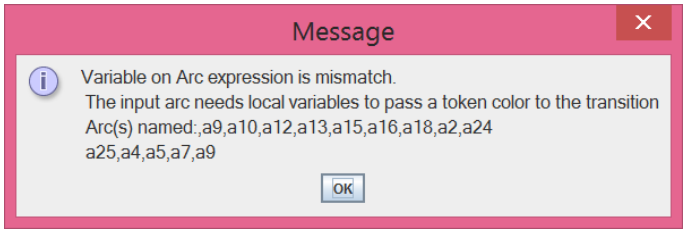
รูปที่ ค-8 หน้าจอจัดการข้อมูลอาร์ก

ถ้าผู้ใช้งานต้องการกำหนดเพรดิเคทสำหรับใช้ตรวจสอบเงื่อนไขค่ายืนยงขณะที่กำลังสร้างปริภูมิสถานะ ผู้ใช้งานคลิกปุ่ม “Add/Edit Invariant” หลังจากนั้นระบบจะแสดงหน้าจอให้พิมพ์เพรดิเคทที่ต้องการและให้คลิกปุ่ม “Add” เพื่อเพิ่มเพรดิเคทนั้นๆ เข้าไปในรายการ และให้คลิกปุ่ม “Save” อีกครั้งเพื่อทำการบันทึกรายการเพรดิเคท หน้าจอการการกำหนดเพรดิเคทเพื่อทวนสอบค่ายืนยงแสดงในรูปที่ ค-9



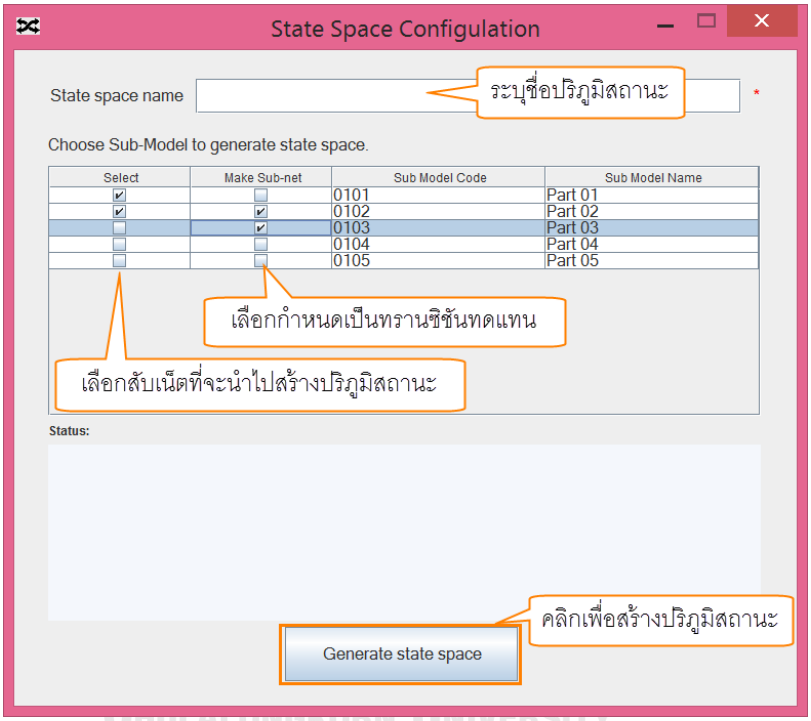
รูปที่ ค-9 หน้าจอการกำหนดเพรดิเคทเพื่อทวนสอบค่ายืนยงระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ

ถ้าต้องการนำโมเดลซีพีเอ็นไปสร้างปริภูมิสถานะให้คลิกที่ปุ่ม “Generate State space” ระบบจะตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดล หากโมเดลไม่พร้อมที่จะนำไปสร้างปริภูมิสถานะ ระบบจะแสดงข้อความผิดพลาดที่พบ ตัวอย่างความผิดพลาดที่ระบบตรวจพบแสดงในรูปที่ ค-10 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นว่ามีอาร์กที่ยังไม่ได้กำหนดอินสคริปชัน



รูปที่ ค-10 ตัวอย่างข้อความแสดงความไม่สมบูรณ์ของโมเดลซีพีเอ็นที่ไม่พร้อมนำไปสร้างปริภูมิสถานะ

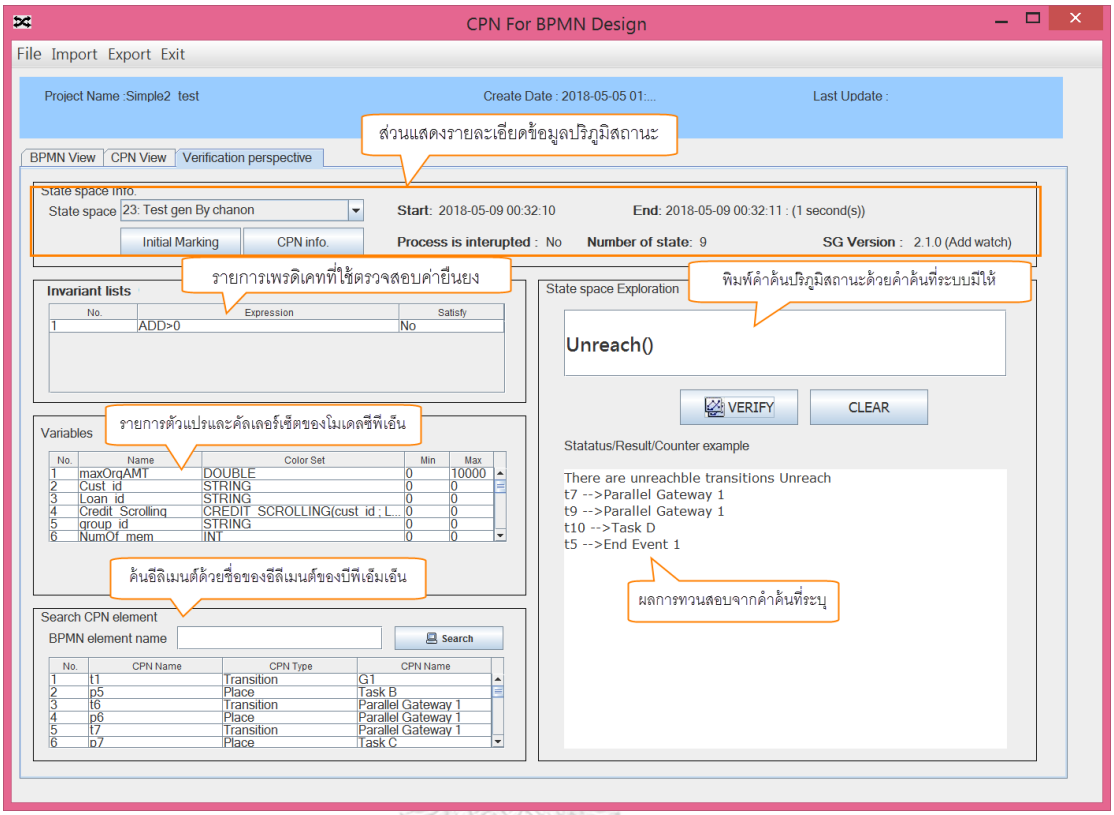
ถ้าโมเดลซีพีเอ็นมีความสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปสร้างปริภูมิสถานะ ระบบจะแสดงหน้าจอให้โดยผู้ใช้งานต้องระบุชื่อปริภูมิสถานะ และเลือกสับเน็ตที่ต้องการนำไปสร้างปริภูมิสถานะโดยคลิกเครื่องหมาย √ ที่ “Select” ของสับเนตที่ต้องการ และคลิกเพื่อทำเครื่องหมาย √ ที่ “Make Sub-net” เพื่อกำหนดให้สับเน็ตนั้นๆ เป็นทรานซิชันทดแทน เมื่อได้สับเน็ตและกำหนดทรานซิชันทดแทนเรียบร้อยแล้วให้คลิกปุ่ม “Generate state space” เพื่อให้เครื่องมือสร้างปริภูมิสถานะจากสับเน็ตที่เลือก การสร้างปริภูมิสถานะอาจใช้เวลาหลายนาทีขึ้นอยู่กับขนาดของโมเดล, การกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นและการกำหนดทรานซิชันทดแทน รูปที่ ค-11 แสดงตัวอย่างหน้าจอการเลือกสับเน็ตและการกำหนดทรานซิชันทดแทนของโมเดลซีพีเอ็นที่จะนำไปสร้างปริภูมิสถานะ



รูปที่ ค-11 หน้าจอการเลือกสับเน็ตและการกำหนดทรานซิชันทดแทนของโมเดลซีพีเอ็นเพื่อนำไปสร้างปริภูมิสถานะ

เมื่อเครื่องมือได้สร้างปริภูมิสถานะเรียบร้อยแล้ว แท็บ “Verifiaction perspective” หรือ “หน้าจอค้นปริภูมิสถานะ” จะถูกเปิดให้ใช้งาน รูปที่ ค-12 แสดงตัวอย่างหน้าจอสำหรับค้นปริภูมิสถานะ ที่ด้านบนสุดของหน้าจอแสดงรายละเอียดของปริภูมิสถานะที่สร้าง ในโครงการหนึ่งอาจมีการสร้างปริภูมิสถานะหลายครั้งด้วยการตั้งค่าโมเดลซีพีเอ็นที่แตกต่างกัน ผู้ใช้งานสามารถเลือกค้นปริภูมิสถานะตามปริภูมิสถานะที่ได้กำหนดไว้ ที่ด้านซ้ายของหน้าจอแสดงรายการเพรดิเคทที่ตรวจสอบระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ รายการตัวแปรของโมเดลและมีหน้าจอสำหรับค้นอิลีเมนต์ ด้านขวาของหน้าจอมีกล่องข้อความ “State space exploration” สำหรับรับคำค้นจากผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้งาน

พิมพ์คำค้นเรียบร้อยแล้วให้คลิกปุ่ม “Verify” ระบบจะทวนสอบปริภูมิสถานะตามคำค้นที่ระบุและรายงานผลการทวนสอบ



รูปที่ ค-12 หน้าจอสำหรับค้นปริภูมิสถานะ

จากคำค้นที่ผู้ใช้งานระบุเพื่อค้นสถานะเป้าหมายที่อยู่ในปริภูมิสถานะ ระบบจะแม็ปคำค้นกับฟังก์ชันที่พัฒนาเพื่อค้นสถานะที่เก็บอยู่ในฐานข้อมูล รายการคำค้นและฟังก์ชันที่เรียกใช้แสดงในตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 รายการคำค้นปริภูมิสถานะและฟังก์ชันที่เรียกใช้

ลำดับที่	พฤติกรรมที่ต้องการค้น	คำค้น	ฟังก์ชันที่เรียกใช้
1	แสดงทรานซิชันที่ไม่ถูกเอ็กซ์ซิคิว	UNREACH()	command_unreach @projectID,@spaceID
2	แสดงมาร์คกิงตายของโมเดล	DEADMARK()	GetDeadMarking @projectID,@spaceID
3	แสดงมาร์คกิงและโทเค็นคัลเลอร์	MARKING(@stateID)	GetStateSpaceInfo_4command @projectID, @spaceID,@p1, @stateID

ลำดับที่	พฤติกรรมที่ต้องการค้น	คำค้น	ฟังก์ชันที่เรียกใช้
4	แสดงตัวอย่างข้อมูลของการเกิดสถานะ	SQ_STATE(@stateID)	GetStateSpacePath_4command @projectID, @spaceID, @stateID
5	ตรวจสอบเพรดิเคทที่ใช้ในการควบคุมการสร้างปริภูมิสถานะ	WATCH()	command_check_watch @projectID,@spaceID
6	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้น	EF(@tran)	command_finally_forsome @projectID,@spaceID,@t, @tran
7	เป็นไปไม่ได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้น	-EF(@tran)	command_finally_forsome_neg @projectID, @spaceID,@t ,@tran
8	สถานะ ρ จะเกิดขึ้นไปสถานะถัดไปเสมอ	AX(@tran1, @tran2)	command_next_forall @projectID,@spaceID, @spaceID, @t, @tran1, @tran2
9	เป็นไปได้ที่สถานะ ρ จะเกิดขึ้นเป็นสถานะถัดไป	EX(@tran1, @tran2)	command_next_forsome @projectID, @spaceID, @t, @tran1, @tran2
10*	มีสักครั้งที่สถานะ ρ เกิดขึ้นหลังจากนั้นเป็นไปได้ที่จะเกิด φ ตามมา	EF_IMPLY_EF (@tran1, @tran2)	command_forsome_imply_forsome @projectID,@spaceID,@t, @tran1, @tran2
11	ทุกครั้งที่สถานะ ρ เกิดขึ้นหลังจากนั้นเป็นไปได้ที่จะเกิด φ ตามมา	AG_IMPLY_EF (@tran1, @tran2)	command_always_imply_forsome @projectID,@spaceID,@t, @tran1, @tran2
12	เป็นไปไม่ได้ที่สถานะ ρ เกิดขึ้นและอาจมีสถานะ φ เกิดขึ้นพร้อมกัน ณ ขณะนั้น	EF_AND_EF (@tran1, @tran2)	command_forsome_forsome @projectID,@spaceID,@t, @tran1, @tran2
13	สถานะ ρ เป็นจริงเสมอ	เป็นคำสั่งที่ใช้ในขั้นตอนสร้างปริภูมสถานะ โดยที่ ρ คือเพรดิเคทที่ใช้ตรวจสอบเงื่อนไขค่ายืนที่หน้าจอกำหนดเพรดิเคทเพื่อทวนสอบค่ายืนยงระหว่างสร้างปริภูมิสถานะ	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	พฤติกรรมที่ต้องการค้น	คำค้น	ฟังก์ชันที่เรียกใช้
14*	หลังจากกระบวนการจบการทำงานแล้วจะไม่มีทาสก์ใดยังทำงานอยู่	GARBAGE()	command_garbage @projectID, @spaceID, @stateID

คำค้นลำดับที่ 10 และ 14 เป็นคำค้นที่พัฒนาเพิ่มเพื่อใช้คลอบคลุมการทวนสอบคุณสมบัติโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่ดี

คำค้นลำดับที่ 10, 11 และ 12 เป็นคำค้นแบบสองพารามิเตอร์และมีการทำโอปอร์เรชันระหว่างพารามิเตอร์นำเข้า เพื่อความเข้าใจคำค้นพฤติกรรมที่เป็นผลลัพธ์ของคำสั่ง สามารถอธิบายด้วยตารางค่าความจริงดังนี้

1) คำค้นที่มีโอเปอร์เรชัน “ถ้าแล้ว” (Imply)

จากคำค้นปริภูมิสถานะในตารางที่ ค-1 คำค้นลำดับที่ 10 EF_IMPLY_EF (@tran1, @tran2) มาจากตรรศาสตร์ EF($\rho \longrightarrow$ EF(φ)) และคำค้นลำดับที่ 11 AG_IMPLY_EF (@tran1, @tran2) มาจากตรรศาสตร์ AG($\rho \longrightarrow$ EF(φ)) เมื่อพิจาราณาเงื่อนไขที่อยู่ในวงเล็บจะพบว่ามีเงื่อนไขเหมือนกัน คือ $\rho \longrightarrow$ EF(φ) เมื่อแจกแจงเงื่อนไขด้วยตารางค่าความจริง ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ค-2

ตารางที่ ค-2 ตารางค่าความจริงของ $\rho \longrightarrow$ EF(φ)

time	t0	t1	t2	t3	t4
ρ	T	T	F	F	T
φ	T	F	T	F	F
EF(φ)	T	T	T	F	F
$\rho \longrightarrow$EF(φ)	T	T	T	T	F

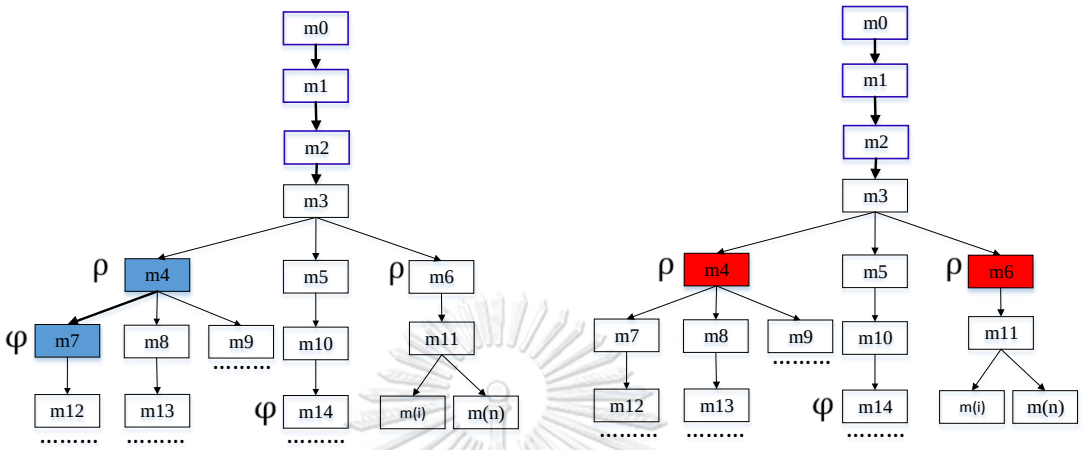
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางค่าความจริงในตาราง ค-2 หมายถึงสถานะ ρ เป็นสถานะอิสระที่สามารถเกิดขึ้นหรือไม่เกิดขึ้นก็ได้ ณ เวลาที่ t0 สถานะ ρ เกิดขึ้นจนถึงเวลา t2 สถานะ ρ ไม่ได้เกิดขึ้น ในขณะที่สถานะ φ เกิดอย่างอิสระเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณา EF(φ) จะพบว่า ณ เวลาที่ t0 ถึง t2 มีค่าเป็นจริง (เพราะสถาน φ ณ เวลา t2 เป็นจริง) ในขณะที่ EF(φ) ณ เวลาที่ t3 ถึง t4 เป็นเท็จ (เพราะสถาน φ หลังจากเวลา t3 ไม่พบสถานะที่เป็นจิงเลย) จากการแจกแจงค่าความจริง เมื่อพิจารณา $\rho \longrightarrow$EF(φ) จะพบว่า ณ เวลาที่ t0 ถึง t3 เป็นกรณีที่คุณสมบัติตามคำค้นเพราะมีค่าความจริงเป็น “จริง” ในขณะที่ ณ เวลาที่ t4 มีค่าเป็น “เท็จ” นั่นหมายความว่าจะต้องมีสถานะ φ เกิดขึ้นในท้ายที่สุด (ณ เวลาที่ t4) จึงจะทำให้ $\rho \longrightarrow$EF(φ) มีค่าเป็น จริงในทุกๆ เวลาตั้งแต่ t0 ถึง t4 จึงจะทำให้ปริภูมิที่ค้นมีคุณสมบัติตามคำค้น

จากตารางค่าความจริงและคำอธิบายข้างต้นสามารถสรุปพฤติกรรมจากคำค้นได้ว่า “เมื่อใดก็ตามที่มีเหตุการณ์ ρ เกิดขึ้นจะมีเหตุการณ์ φ เกิดขึ้นตามมาในที่สุด” แต่เหตุการณ์ φ สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีเหตุการณ์ φ เกิดก่อนขึ้นก็ได้ หลังจากนั้นพิจารณาโอเปอร์เรชัน EF และ AG ที่อยู่นอกวงเล็บตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ ค-13 และ ค-14 ตามลำดับ

Query: EF(*Gp_1* → *EF*(*Request_Assessment*))

**Gp_1* is transition's name(ρ)
**Request_Assessment* is transition's name(φ)



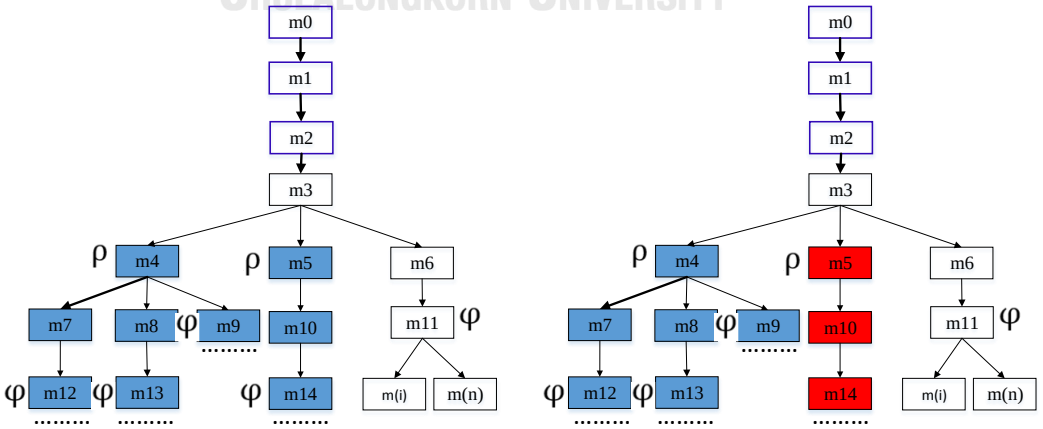
(a) Satisfied state space (b)Unsatisfied state space

รูปที่ ค-13 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น EF($\rho \longrightarrow$ EF(φ))

จากรูปที่ ค-13 (a) ระบบจะค้นหาสถานะ ρ ก่อนเป็นขั้นตอนแรก หลังจากนั้นค้นหาสถานะ φ ที่อยู่ในลำดับเทรซเดียวกันเพียงสถานะเดียวก็เพียงพอที่จะสรุปได้แล้วโมเดลมีพฤติกรรมตรงตามคำค้น EF(ρ ⟶ EF(φ)) รูปที่ ค-13 (b) คือกรณีที่ปริภูมิสถานะไม่เป็นไปตามคำค้นเพราะ เมื่อค้นหาสถานะ ρ แล้วไม่พบสถานะ φ เกิดขึ้นในเทรซใดๆ เลย

Query: AG(*Gp_1* → *EF*(*Request_Assessment*))

**Gp_1* is transition's name(ρ)
**Request_Assessment* is transition's name(φ)



(a) Satisfied state space (b)Unsatisfied state space

รูปที่ ค-14 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น AG($\rho \longrightarrow$ EF(φ))

จากรูปที่ ค-14 ระบบจะค้นหาสถานะ ρ ทั้งหมดที่มีอยู่ในเทรซ หลังจากนั้นค้นหาสถานะ φ ที่อยู่ในลำดับเทรซเดียวกัน หากทุกเทรซที่มีการเกิดสถานะ ρ และตามมาด้วยสถานะ φ สรุปได้แล้วโมเดลมีพฤติกรรมตรงตามคำค้น AG(ρ ⟶ EF(φ)) แต่ถ้าค้นหาสถานะ ρ แล้วไม่พบสถานะ φ เกิดขึ้นในเทรซนั้นจะสรุปทันทีว่าโมเดลไม่มีคุณสมบัติตามคำค้น

2) คำค้นที่มีโอเปอร์เรชัน “และ” (and)

จากคำค้นปริภูมิสถานะในตารางที่ ค-1 คำค้นลำดับที่ 10 AG_AND_EF (@tran1, @tran2) มาจากตรรศาสตร์ AG(ρ ∧ EF(φ)) เมื่อพิจาราณาเงื่อนไขที่อยู่ในวงเล็บจะพบว่ามีเงื่อนไขเหมือนกัน คือ ρ ∧ EF(φ) เมื่อแจกแจงเงื่อนไขด้วยตารางค่าความจริง ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ค-3

ตารางที่ ค-3 ตารางค่าความจริงของ ρ ∧ EF(φ)

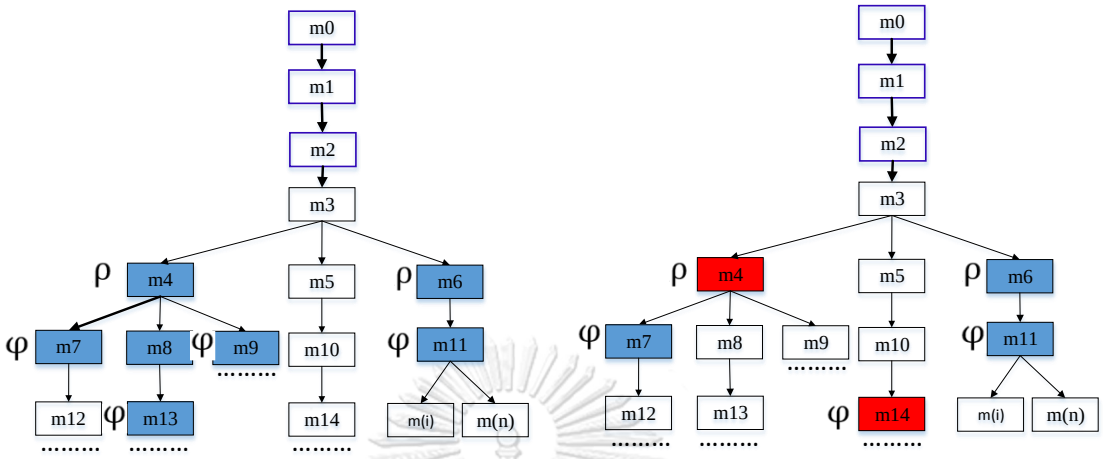
time	t0	t1	t2	t3	t4
ρ	T	T	F	F	T
φ	T	F	T	F	F
EF(φ)	T	T	T	F	F
ρ ∧ EF(φ)	T	T	F	F	F

จากตารางค่าความจริงในตาราง ค-3 ค่าความจริงของสถานะ ρ , φ และ EF(φ) มีลักษณะเดียวกันกับข้อมูลในตาราง ค-2 แต่ค่าความจริงของ ρ ∧ EF(φ) จะต่างออกไป จากตัวอย่างข้อมูลถึงแม้ว่า ณ เวลาที่ t4 ของ φ จะเปลี่ยนจากค่า “เท็จ” เป็นค่า “จริง” ก็ไม่ทำให้เวลาที่ t2 และ t3 ของ ρ ∧ EF(φ) มีค่าเป็นจริงได้ จากตารางค่าความจริงและคำอธิบายข้างต้นสามารถสรุปพฤติกรรมจากคำค้นได้ว่า “เมื่อใดก็ตามที่มีเหตุการณ์ ρ เกิดขึ้นจะมีเหตุการณ์ φ เกิดขึ้นตามมาเสมอ” โดยสองสถานะมีความสัมพันธ์แบบความสัมพันธ์เชิงเหตุ หลังจากนั้นพิจารณาโอเปอร์เรชัน AG ที่อยู่นอกวงเล็บยิ่งเป็นการรับประกันว่าทุกครั้งสถานะ ρ เกิดขึ้นจะมีสถานะ φ เกิดขึ้นตามมาเสมอ

รูปที่ ค-15 (a) ระบบจะค้นหาทุกสถานะ ρ และสถานะ φ แล้วหาความสัมพันธ์ของทั้งสองสถานะที่อยู่ในลำดับเทรซเดียวกัน ถ้าทุกสถานะ ρ สามารถระบุความสัมพันธ์กับสถานะ φ ได้จะสามารถสรุปได้ว่าโมเดลมีพฤติกรรมตรงตามคำค้น AG(ρ ∧ EF(φ)) รูปที่ ค-15 (b) คือกรณีที่ปริภูมิสถานะไม่เป็นไปตามคำค้นเพราะมีสถานะ ρ และสถานะ φ ที่โหนดสถานะที่ 4 และ 14 ที่ไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ได้ ในการทำงานของระบบเมื่อไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ได้เพียงเทรซเดียวก็สามารถสรุปได้แล้วว่าปริภูมิสถานะนั้นไม่เป็นไปตามคำค้น

Query: AG(*Gp_1* ∧ *EF*(*Request_Assessment*))

**Gp_1* is transition's name(ρ)
**Request_Assessment* is transition's name(φ)



(a) Satisfied state space

(b)Unsatisfied state space

รูปที่ ค-15 ตัวอย่างแผนภูมิปริภูมิสถานะของคำค้น AG($\rho \wedge$ EF(φ))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง
นิยามการความสัมพันธ์เชิงรูปนัยของการแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็น

จากนิยามที่เกี่ยวข้องกับการแปลงโมเดลที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.1 ของบทที่ 3 การแปลงโมเดลบีพีเอ็มเอ็นเป็นโมเดลซีพีเอ็นอาศัยหลักการแปลงอิลีเมนต์ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของอิลีเมนต์และเงื่อนไขข้อบังคับที่อธิบายในรูปแบบของการจับคู่เชิงรูปนัยดังนี้

ให้ $\mathcal{C}$= ($\mathcal{Q}$, PL, fPM, MG, fVI, MF) คือ โพรเซสโมเดลบีพีเอ็มเอ็นแบบคอลาโบเรชันโมเดล เมื่อ $B \in \mathcal{Q}$ และ B เป็นโมเดลบีพีเอ็มเอ็นที่อยู่ในรูปแบบที่ดีตามนิยามที่ 3.1.5, X_B หมายถึงอิลีเมนต์ของ X ที่อยู่ในโพรเซสโมเดลบีพีเอ็มเอ็น B จากข้อกำหนดดังกล่าวสามารถแปลงโมเดล $\mathcal{C}$ ไปเป็นโมเดลซีพีเอ็น $\mathcal{CM}$ = (PP, TT, AA, **Σ**, VV, fCC, fGG, fEA, fII) ด้วยเงื่อนไขและความสัมพันธ์ดังนี้

$PP = \bigcup_{B \in \mathcal{Q}} (\{p_s \mid s \in ES_B\} \cup$ *//start event*

$\{p_e \mid e \in EE_B\} \cup$ *// end event*

$\{p_n \mid n \in A_B \cup EI_B\} \cup$ *// task and intermediate event*

$\{p_{(x,y)} \mid (x,y) \in F_B \wedge (x,y) \wedge (x \in GW) \wedge fGT(x) \in \{exclusive\} \wedge fGD(x) \in \{divergent\}\} \cup$

// sequence flow outgoing inclusive gateway

$\{p_{ex} \mid ex \in EB_B\} \cup$ *// exception handling*

$\{p_a \mid a \in A_B \wedge a.TMarker=loop\})$ *// task with loop marker*

$TT = \bigcup_{B \in \mathcal{Q}} (\{t_{(x,y)} \mid x \in ES_B \wedge y \in A_B \cup EI_B \wedge y= suc(x)\} \cup$ *// start event*

$\{t_{(y,x)} \mid x \in EE_B\ y \in A_B \cup EI_B \wedge y= anc(x)\}$ *//end event*

$\{t_x \mid x \in MF\} \cup$ *// message flow*

$\{t_x \mid x \in F\} \cup$ *// sequence flow*

$\{t_x \mid x \in (A_B \cup EI_B) \wedge inset(x) \neq \emptyset\} \cup$

$\{t_x \mid x \in (A_B \cup EI_B) \wedge outset(x) \neq \emptyset\} \cup$ *// task, intermediate event*

$\{t_{(x,y)} \mid x \in GW_B \wedge y=suc(x) \wedge (x, y) \in F_B \wedge fGD(x) \in \{divergent\}$

$\wedge fGT(x) \in \{exclusive\} \wedge fGL(x,y) \neq null\} \cup$ *//divergent exclusive gateway*

$\{t_x \mid x \in GW_B \wedge fGD(x) \in \{divergent, convergent\} \wedge fGT(x) \in \{parallel\}\} \cup$

//parallel gateway and task with multi instance marker (parallel)

$\{t_{(x,y)} \mid x \in GW_B \wedge y=suc(x) \wedge (x, y) \in F_B \wedge fGD(x) \in \{divergent\} \wedge fGT(x) \in \{inclusive\} \wedge fGL(x,y) \neq null\} \cup \{t_{((x,y),z)} \mid x \in GW_B \wedge y=anc(z) \wedge z \in GW_B \wedge (x, y) \in F_B \wedge fGD(x) \in \{divergent\} \wedge fGT(x) \in \{inclusive\} \wedge fGD(z) \in \{convergent\} \wedge fGT(z) \in \{inclusive\} \wedge x=pair(z)\} \cup$

//divergent inclusive gateway

$\{t_{(x,y)} \mid y \in GW_B \wedge x =inset(y) \wedge fGD(y) \in \{convergent\} \wedge fGT(y) \in \{inclusive\}\} \cup$

//convergent inclusive gateway

$\{(t_{(x,y)}, y) \mid x \in A_B \wedge y \in EB_B \wedge inset(x) \neq \emptyset \wedge fEL(y)=x\} \cup$

$\{(t_{(x,y)}, x) \mid x \in A_B \wedge y \in EB_B \wedge outset(x) \neq \emptyset \wedge fEL(y)=x\} \cup$ *// exception handling of a task*

$\{t_{((x,cl),y)} \mid x \in A_B \wedge y \in suc(x) \wedge x.TMarker=loop \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge Type(cl)=true\} \cup$

$\{t_{((x,cl),x)} \mid x \in A_B \wedge x.TMarker=loop \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge Type(cl)=true\})$

//task with loop marker

$AA = \bigcup_{B \in \mathcal{Q}} (\{(p_s, t_s) \mid s \in ES_B\} \cup \{(t_s, p_{(s,y)}) \mid s \in ES_B \wedge y \in suc(s)\} \cup$ *// start event*

$\{(p_{(x,e)}, t_e) \mid e \in EE_B \wedge x \in anc(e)\} \cup \{(t_e, p_e) \mid e \in EN_B\} \cup$ *// end event*

$\{\{(p_{(x,y)}, t_y)\} \cup \{(t_y, p_{(y,z)})\} \mid (x,z) \in F_B\ x=anc(z) \wedge z=suc(x)\} \cup$ *// sequence flow*

$\{\{(p_{(x,y)}, t_y)\} \cup \{(t_y, p_{(y,z)})\} \mid (x,z) \in MF_B\} \cup$ *// message flow*

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid x \in GW_B \wedge (x, y) \in F_B \wedge y \in suc(x) \wedge fGT(x) \in \{exclusive\}\} \cup$

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge x \in anc(y) \wedge fAT(y) \notin \{sent, receive\} \wedge inset(y) \neq \emptyset\} \cup$

$\{(t_y, p_{y)}) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\}) \wedge inset(y) \neq \emptyset\} \cup$

$\{(p_y, t_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\}) \wedge outset(y) \neq \emptyset\} \cup$

$\{(t_y, p_z) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\})$
$\wedge z \in suc(y) \wedge outset(y) \neq \emptyset\} \cup$ // task, intermediate event

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}) \wedge x \in anc(y)$
$\wedge inset(y) \neq \emptyset\} \cup$

$\{(p_{(m,y)}, t_{(m,y)}) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\} \wedge inset(y) \neq \emptyset)\} \wedge$
$m \in (A_{Q\backslash B} \cup EI_{Q\backslash B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{send\} \vee fET(m) \in \{throw\})\} \cup$

$\{(t_{(m,y)}, p_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}) \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge$
$m \in (A_{Q\backslash B} \cup EI_{Q\backslash B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{send\} \vee fET(m) \in \{throw\})\} \cup$

$\{(p_y, t_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}) \wedge outset(y) \neq \emptyset\} \cup$

$\{(t_{(y,z)}, z) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}) \wedge z \in suc(y) \wedge outset(y) \neq \emptyset\} \cup$
// receive task or intermediate message catch

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge \wedge (fAT(y) \in \{send\} \vee fET(y) \in \{throw\}) \wedge x \in anc(y)\} \cup$

$\{(t_y, p_y) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{send\} \vee fET(y) \in \{throw\})\} \cup$

$\{(p_y, t_{(y,m)}) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{send\} \vee fET(y) \in \{throw\}) \wedge$
$m \in (A_{Q\backslash B} \cup EI_{Q\backslash B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{receive\} \vee fET(m) \in \{catch\})\} \cup$

$\{(t_{(y,m)}, p_m) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{send\} \vee fET(y) \in \{throw\}) \wedge$
$m \in (A_{Q\backslash B} \cup EI_{Q\backslash B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{receive\} \vee fET(m) \in \{catch\})\} \cup$

$\{(t_{(y,m)}, p_z) \mid y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{send\} \vee fET(y) \in \{throw\}) \wedge z \in suc(y) \wedge$
$m \in (A_{Q\backslash B} \cup EI_{Q\backslash B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{receive\} \vee fET(m) \in \{catch\})\} \cup$
// send task or intermediate message throw

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid y \in GW_B \wedge x \in anc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\} \wedge fGD(y) \in \{divergent\}\} \cup$

$\{(t_y, p_{(y,z)}) \mid y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\} \wedge fGD(y) \in \{divergent\}\} \cup$

$\{(p_{(x,y)}, t_y) \mid y \in GW_B \wedge x \in anc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\} \wedge fGD(y) \in \{convergent\}\} \cup$

$\{(t_y, p_{(y,z)}) \mid y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\} \wedge fGD(y) \in \{convergent\}\} \cup$
// parallel, event-based gateway and task with parallel marker

$\{(p_{(x,(xr,y))}, t_{(xr,y)}) \mid y \in EB_B \wedge x \in A_B \wedge x \in fEL(y) \wedge xr\text{=reading error}\} \cup$

$\{(p_{(x,(xw,y))}, t_{(xw,y)}) \mid y \in EB_B \wedge x \in A_B \wedge x \in fEL(y) \wedge xw\text{=writing error}\} \cup$

$\{(t_{(xr,y)}, p_y) \mid y \in EB_B \wedge xr\text{=reading error}\} \cup$

$\{(t_{(xw,y)}, p_y) \mid y \in EB_B \wedge xw\text{=writing error}\} \cup$ //exception handling

$\{(p_{((a,cl),y)}, t_{((a,cl),y)}) \mid a \in A_B \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge type(cl)\text{=flase} \wedge y \in suc(a) \wedge$
$a.TMarker\text{=loop}\} \cup$

$\{(t_{((a,cl),y)}, p_y) \mid a \in A_B \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge type(cl)\text{=flase} \wedge y \in suc(a) \wedge a.TMarker\text{=loop}\} \cup$

$\{(p_{((a,cl),a)}, t_{((a,cl),a)}) \mid a \in A_B \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge type(cl)\text{=true} \wedge a.TMarker\text{=loop }\} \cup$

$\{(t_{((a,cl),a)}, p_a) \mid a \in A_B \wedge cl \text{ is loop condition} \wedge type(cl)\text{=true} \wedge a.TMarker\text{=loop}\} \cup$

$\{(p_a, t_{(x,a)}) \mid a \in A_B \wedge x \in anc(a) \wedge inset(a) \neq \emptyset \wedge a.TMarker\text{=loop }\} \cup$

$\{(t_{(x,a)}, p_x) \mid a \in A_B \wedge x \in anc(a) \wedge a.TMarker\text{=loop }\})$ // task with loop marker

$\Sigma = \bigcup_{B \in Q} (\{Type(\sigma_i) \mid i \in ID_B\} \cup$ // item definition

$\{Type(\sigma_d) \mid d \in (DI_B \cup DO_B)\} \cup$ // input and output data

$\{Type(\sigma_m) \mid m \in MG_B\} \cup$ // message

$\{Type(\sigma_{(i,a)}) \mid a \in A_B \cup EI_B \wedge inset(a)\} \cup$ // input set of task or event

$\{Type(\sigma_{(o,a)}) \mid a \in A_B \cup EI_B \wedge outset(a)\})$ // output set of task or event

$VV = \bigcup_{B \in Q} (\{v_i \mid i \in ID_B\})$ // item definition

$fCC = function: p \longrightarrow \sigma \mid p \in PP \wedge \sigma \in \Sigma' =$

$\bigcup_{B \in Q} (\{(p_x, \sigma_y) \mid x \in ES_B \wedge y\text{=suc}(x) \wedge \sigma_y = Type(inset(x))\} \cup$ // start event

$\{(p_x, \sigma_y) \mid x \in EE_B \wedge y\text{=anc}(x) \wedge \sigma_y = Type(outset(y))\} \cup$ //end event

$\{(p_x, \sigma_x) \mid x \in A_B \cup EI_B \wedge \sigma_x = Type(inset(x)) \wedge fAT(y) \notin \{sent, receive, catch, throw\}\} \cup$
// task, intermediate event

$\{(p_x, \sigma_{((y,m),x)}) | x \in A_B \cup EI_B \wedge fAT(y) \in \{send\}$
$\wedge m = fMF((y, x)) \wedge (fAT(x) \in \{receive\} \vee fET(x) \in \{catch\}$
$\wedge \sigma_{((y,m),x)} = (Type(inset(x)) * Type(fMB(m))\} \cup$ // receive task , intermediate message catch
$\{(p_{(x,y)}, \sigma_y) | x = anc(y) \wedge y \in GW \wedge \sigma_y = Type(inset(x))\} \cup$ // divergent inclusive gateway
$\{(p_x, \sigma_{(y,x)}) | x \in EB_B \wedge y \in A_B \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge y = fEL(x)$
$\wedge \sigma_{(y,x)} = Type(inset(x))\} \cup$ //exception handling
$\{(p_x, \sigma_y) | a \in A_B \wedge a.TMarker = loop \wedge \sigma_y = INT\} \cup$ //task with loop marker

$fGG: t \longrightarrow g \mid p \in TT \wedge g \in \{guard\ label\} =$
$\bigcup_{B \in Q} \{(t_x, g_{(x,y)}) | x \in GW_B \wedge y = suc(x) \wedge (x, y) \in F_B$
$\wedge fGD(x) \in \{divergent\} \wedge fGT(x) \in \{exclusive\} \wedge g_{(x,y)} = fGL(x, y)\} \cup$ //exclusive gateway
$\{(t_x, g_{(x,y)}) | x \in GW_B \wedge y = suc(x) \wedge (x, y) \in F_B \wedge fGD(x) \in \{divergent\}$
$\wedge fGT(x) \in \{inclusive\} \wedge g_{(x,y)} = fGL(x, y)\} \cup$ //inclusive gateway (positive)
$\{(t_x, g_{((x,y),Z)}) | x \in GW_B \wedge y = anc(z) \wedge z \in GW_B \wedge (x, y) \in F_B$
$\wedge fGD(x) \in \{divergent\} \wedge fGT(x) \in \{inclusive\} \wedge fGD(z) \in \{convergent\}$
$\wedge fGT(z) \in \{inclusive\} \wedge x = pair(z) \wedge g_{((x,y),Z)} = fGL((x, y),z)\} \cup$ //inclusive gateway (negative)
$\{t_{((x,cl),y)}, g_y | x \in A_B \wedge y \in suc(x) \wedge x.TMarker = loop \wedge cl$ is loop condition $\wedge$
$Type(cl) = false \wedge g_y = cl\} \cup$ // task with loop marker (negative loop condition)
$\{t_{((x,cl),x)}, g_x | x \in A_B \wedge x.TMarker = loop \wedge cl$ is loop condition
$\wedge Type(cl) = true\} \wedge g_x = cl\})$ // task with loop marker (positive loop condition)

$fEA: ac \longrightarrow ex \mid ac \in AA \wedge ex \in \{arc\ expression\} =$
$\bigcup_{B \in Q} (\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_{(x,y)}) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge x \in anc(y) \wedge$
$(fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\}) \wedge ex_{(x,y)} = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_y, p_y), ex_y) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\})$
$\wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{(x,y)} = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_y, t_y), ex_y) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\})$
$\wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{(x,y)} = fVI(outset(y))\} \cup$
$\{((t_y, p_z), ex_{(y,z)}) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \notin \{sent, receive\} \vee fET(y) \notin \{catch, throw\})$
$\wedge z \in suc(y) \wedge ex_{(x,y)} = fVI(outset(y))\} \cup$ // task, intermediate event
$\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_{(x,y)}) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\}$
$\vee fET(y) \in \{catch\}) \wedge x \in anc(y) \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{(x,y)} = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_{(m,y)}, t_{(m,y)}), ex_{(m,y)}) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}$
$\wedge x \in anc(y) \wedge m \in (A_{Q \setminus B} \cup EI_{Q \setminus B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{send\}$
$\vee fET(m) \in \{throw\}) \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{(m,y)} = fVI(fMF((m, y)))\} \cup$
$\{(t_{(m,y)}, p_y), ex_{(m,y)} | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}$
$\wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge m \in (A_{Q \setminus B} \cup EI_{Q \setminus B}) \wedge (m, y) \in MF \wedge (fAT(m) \in \{send\}$
$\vee fET(m) \in \{throw\}) \wedge ex_{(m,y)} = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_y, t_y), ex_y)) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\}$
$\wedge outset(y) \neq \emptyset\} \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_{(y,z)}, z), ex_{(y,z)}) | y \in (A_B \cup EI_B) \wedge (fAT(y) \in \{receive\} \vee fET(y) \in \{catch\})$
$\wedge z \in suc(y) \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{(y,z)} = fVI(outset(y))\} \cup$
// receive task or intermediate message catch
$\{((t_e, p_e), ex_e) | e \in EN_B \wedge outset(e) \neq \emptyset \wedge ex_e = fVI(outset(s))\} \cup$ //end event
$\{\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_{(x,y)})\} \cup \{((t_y, p_{(y,z)}), ex_{(y,z)})\} | (x, z) \in F_B$ $x = anc(z) \wedge z = suc(x)$
$\wedge ex_{(x,y)} = fVI(outset(x)) \wedge ex_{(y,z)} = fVI(outset(x))\} \cup$ // sequence flow
$\{\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_{(x,y)})\} \cup \{((t_y, p_{(y,z)}), ex_{(y,z)})\} | (x, z) \in MF_B$
$\wedge ex_{(x,y)} = fVI(fMF((x, z))) \wedge ex_{(x,y)} = fVI(fMF((x, z)))\} \cup$ // message flow
$\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_x) | x \in GW_B \wedge (x, y) \in F_B \wedge y \in suc(x) \wedge fGT(x) \in \{exclusive\}$
$\wedge inset(x) \neq \emptyset \wedge ex_x = fVI(imset(x))\} \cup$
$\{((t_y, p_{(y,z)}), ex_y) | y \in GW_B \wedge (y, z) \in F_B \wedge z \in suc(y) \wedge fGT(y) \in \{exclusive\}$
$\wedge outset(v) \neq \emptyset \wedge ex_{..} = fVI(outset(v))\} \cup$ // exclusive gateway

$\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_s) |\ y \in GW_B \wedge x \in anc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\}$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_y, p_{(y,z)}), ex_s) |\ y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\}$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(outset(y))\} \cup$
$\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_s) |\ y \in GW_B \wedge x \in anc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\}$
$\wedge fGD(y) \in \{convergent\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_y, p_{(y,z)}), ex_s) |\ y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge fGT(y) \in \{parallel, event\text{-}based\}$
$\wedge fGD(y) \in \{convergent\} \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(outset(y))\} \cup$
// parallel, event-based gateway
$\{((p_{(x,y)}, t_y), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge x \in anc(y) \wedge fGT(y) \in \{inclusive\}$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_y, p_{(y,z)}), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge (y, x) \in F_B \wedge fGT(y) \in \{inclusive\}$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_{(y,z)}, t_{(y,z)}), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge z \in suc(y) \wedge (y, x) \in F_B \wedge fGT(y) \in \{inclusive\}$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_{(y,z)}, p_z), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge z{=}anc(y) \wedge (x, y) \in F_B \wedge fGD(y) \in \{divergent\}$
$\wedge fGT(y) \in \{inclusive\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_{(y,z)}, t_{((y,z),a)}), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge z{=}anc(a) \wedge a \in GW_B \wedge (y, z) \in F_B$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge fGT(y) \in \{inclusive\} \wedge fGT(a) \in \{inclusive\}$
$\wedge fGD(a) \in \{convergent\} \wedge y{=}pair(a) \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_{((y,z),a)}, p_{(z,a)}), ex_y) |\ y \in GW_B \wedge z{=}anc(a) \wedge a \in GW_B \wedge (y, z) \in F_B$
$\wedge fGD(y) \in \{divergent\} \wedge fGT(y) \in \{inclusive\} \wedge fGT(a) \in \{inclusive\}$
$\wedge fGD(a) \in \{convergent\} \wedge y{=}pair(a) \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_{(z,a)}, t_a), ex_y) |\ a \in GW_B \wedge z \in anc(a) \wedge fGT(a) \in \{inclusive\} \wedge fGD(a) \in \{convergent\}$
$\wedge fGD(a) \in \{inclusive\} \wedge fGD(a) \in \{divergent\} \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(outset(y))\} \cup$
$\{((t_a, p_{(a,b)}), ex_a) |\ a \in GW_B \wedge b \in suc(a) \wedge fGT(a) \in \{inclusive\} \wedge fGD(a) \in \{convergent\}$
$\wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = fVI(outset(a))\} \cup$ *// inclusive gateway*
$\{((p_{(x,(xr,y))}, t_{(xr,y)}), ex_y) |\ y \in EB_B \wedge x \in A_B \wedge x \in fEL(y)$
$\wedge xr{=}reading\ error\} \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((p_{(x,(xw,y))}, t_{(xw,y)}), ex_y) |\ y \in EB_B \wedge x \in A_B \wedge x \in fEL(y)$
$\wedge xw{=}writing\ error \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge ex_y = fVI(outset(y))\} \cup$
$\{((t_{(xr,y)}, p_y), ex_{xr}) |\ y \in EB_B \wedge xr{=}reading\ error \wedge inset(y) \neq \emptyset \wedge ex_{xr} = fVI(inset(y))\} \cup$
$\{((t_{(xw,y)}, p_y), ex_{xw}) |\ y \in EB_B \wedge xw{=}writing\ error \wedge outset(y) \neq \emptyset \wedge$
$ex_{xw} = fVI(outset(y))\} \cup$ *//exception handling*
$\{((p_{((a,cl),y)}, t_{((a,cl),y)}), ex_a) |\ a \in A_B \wedge cl\ is\ loop\ condition \wedge type(cl){=}flase$
$\wedge y \in suc(a) \wedge a.TMarker{=}loop \wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = fVI(outset(a))\} \cup$
$\{((t_{((a,cl),y)}, p_y), ex_a) |\ a \in A_B \wedge cl\ is\ loop\ condition \wedge type(cl){=}flase \wedge y \in suc(a)$
$\wedge a.TMarker{=}loop \wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = fVI(outset(a))\} \cup$
$\{((p_{((a,cl),a)}, t_{((a,cl),a)}), ex_a) |\ a \in A_B \wedge cl\ is\ loop\ condition \wedge type(cl){=}true \wedge a.TMarker{=}loop$
$\wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = fVI(outset(a))\} \cup$
$\{((t_{((a,cl),a)}, p_a), ex_a) |\ a \in A_B \wedge cl\ is\ loop\ condition \wedge type(cl){=}true \wedge a.TMarker{=}loop$
$\wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = \text{"if n} < \text{k then n} + 1 \text{ else empty"}\} \cup$
$\{((p_a, t_{(x,a)}), ex_a) |\ a \in A_B \wedge x \in anc(a) \wedge inset(a) \neq \emptyset \wedge a.TMarker{=}loop$
$\wedge outset(a) \neq \emptyset \wedge ex_a = \text{"n"}\} \cup$
$\{((t_{(x,a),} p_x), ex_a) |\ a \in A_B \wedge x \in anc(a) \wedge a.TMarker{=}loop \wedge inset(a) \neq \emptyset$
$\wedge ex_a = \text{if n<k then 1' } + fVI(inset(a)) + \text{"else empty"}\} \cup$ *// task with loop marker*

$fII : p \longrightarrow iex \quad | p \in PP' \wedge iex \in \{init\ expression\}=$
$\bigcup_{B \in Q} (\{(p_{tm}, iex_{tm}) |\ tm \in A_B \wedge tm.TMarker = loop \wedge iex_{tm}{=}\text{'1'1}\})$
// task with loop marker

ภาคผนวก จ
การพิสูจน์กฎการแปลงอิลีเมนต์และการทวนสอบแบบลำดับชั้น

การพิสูจน์การทวนสอบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือส่วนแรกอธิบายเกี่ยวกับนิยามที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งนิยามบางส่วนอ้างอิงนิยามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 และอีกส่วนอธิบายวิธีพิสูจน์ รายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

1. นิยามที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์

การพิสูจน์ความต้องกันระหว่างโมเดลซีพีเอ็นที่มีโครงสร้างปกติและโมเดลซีพีเอ็นที่จัดโครงสร้างแบบมีลำดับชั้นเป็นการพิสูจน์ว่าหลังจากจัดโครงสร้างโมเดลเป็นแบบลำดับชั้นแล้วโมเดลทั้งสองยังมีความต้องกัน วิธีการพิสูจน์วิธีการทวนสอบด้วยการตรวจสอบความสมมูล (Equivalent checking) เพื่อแสดงให้เห็นความสมมูลกันของพฤติกรรมระหว่างโมเดลทั้งสองแบบ การทวนสอบจะสร้างปริภูมิสถานะจากทั้งสองโมเดลแล้วนำเทรซซึ่งเป็นลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแต่ละโมเดลมาเปรียบเทียบกันว่าสมมูลกันหรือไม่ เรียกเทคนิคนี้ว่าการตรวจสอบความสมมูลของเทรซ (Trace equivalences) [68], [69], [70] นิยามที่เกี่ยวข้องกับการพิสูจน์มีดังนี้

นิยาม จ-1: เทรซ

จากนิยามกราฟการเข้าถึงที่อธิบายในหัวข้อ 3.1.8 เมื่อแปลงกราฟการเข้าถึงให้เป็นกราฟต้นไม้จะได้กรณีที่เป็นไปได้ของลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่เรียกว่าเทรซย่อย ให้เทรซของโมเดลซีพีเอ็น $\mathbb{T}$= (Mk, Ts, Vi, Vo, α, fVi, fVo, $\mathbb{Z}$) เมื่อ

Mk เซ็ตของมาร์คกิงหรือสถานะ 1 สถานะของระบบ

Ts เซ็ตของทรานซิชันที่มีการยิงโทเค็น

Vi เซ็ตของข้อมูลนำเข้าของการเอ็กซ์ซิคิว

Vo เซ็ตของข้อมูลนำออกของการเอ็กซ์ซิคิว

α เซ็ตของเส้นเชื่อมระหว่างสถานะหรือข้อมูลการยิงโทเค็นของทรานซิชัน
$\alpha \subseteq$ (Mk x Mk) โดย α_i = (FTran, FBinding) เมื่อ
α_i.FTran ทรานซิชันที่ทำการยิงโทเค็น
α_i.FBinding ข้อมูลไบด์ดิงคัลเลอร์ {(Vi, Vo)}

fVi ข้อมูลนำเข้าของการยิงโทเค็นของทรานซิชัน fMk: $(\alpha) \longrightarrow$ {Vi}

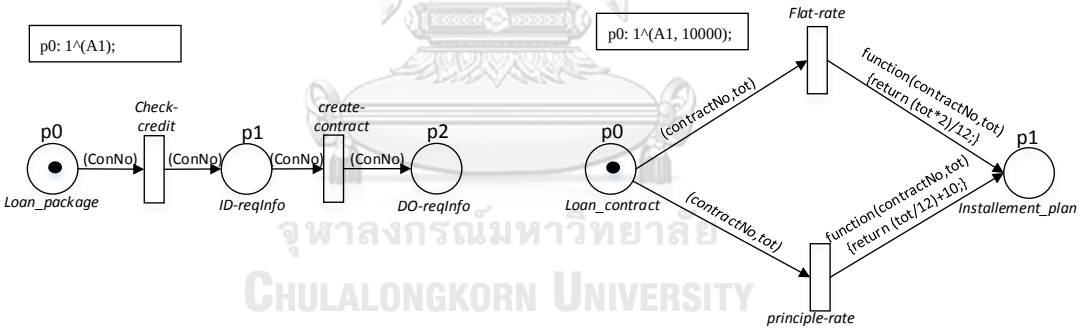
fVo ข้อมูลนำออกของการยิงโทเค็นของทรานซิชัน fMk: $(\alpha) \longrightarrow$ {Vo}

$\mathbb{Z}$ เซ็ตของจำนวนเต็มที่ควบคุมลำดับการยิงโทเค็น

เทรซย่อยหรือเอ็กซ์ซิคิวชันพาร์ท t_n คือเซ็ตที่ได้จากลำดับของคู่อันดับ (z, α) ที่แสดงลำดับการเอ็กซ์ซิคิวกิจกรรมหนึ่งๆ ที่มีการรับข้อมูลนำเข้าและให้ข้อมูลนำออก เมื่อ α คือเซ็ตของการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่อยู่ในเอ็กซ์ซิคิวเทรซย่อย t_n

เทรซของซีพีเอ็นโมเดลหรือสับเน็ตใดๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป M ⇓ 𝕋 เมื่อ M คือโมเดลซีพีเอ็นหรือสับเน็ตที่มีการกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้น เทรซเทียบเท่ากับพาร์ทที่อยู่ในกราฟการเข้าถึงที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็น, ข้อมูลการยิงโทเค็นของแต่ละเทรซย่อย t_n ที่เป็นลำดับของการยิงโทเค็นของทรานซิชัน α เช่น m0 $\xrightarrow{Vi,\ Vo}$ m1 หมายถึงมาร์คกิง m0 รับข้อมูลนำเข้าที่มีค่า Vi และสร้างข้อมูลนำออกที่มีค่า Vo ที่มาร์คกิง m1 ตัวอย่างเช่น t=m0(v1, v2) , m1(v2, v3) หมายถึงขณะที่มาร์คกิง m0 รับข้อมูลนำเข้า v1 ทำให้เกิดสถานะ m1 ด้วยค่าข้อมูลนำออก v2, ซึ่ง v2 เป็นทั้งข้อมูลนำออกและยังเป็นข้อมูลนำเข้าสถานะถัดไปที่ทำให้ได้ข้อมูลนำออกมีค่าเป็น v3 เมื่อต้องการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากเอ็กซ์ซิคิวสับเน็ตใดๆ สามารถแสดงด้วย sm(i) ⇓ t , v หมายถึงสับเน็ต sm(i) เมื่อประเมินด้วยเทรซ t แล้วให้ข้อมูลนำออก v

รูปที่ จ-1 (a) แสดงตัวอย่างเทรซของโมเดลที่เป็นเทรซเชิงเดียว คือ t=p0(ConNo, ConNo) , p1(ConNo, ConNo) เมื่อพิจารณาลำดับในเทรซจะพบว่ามีจำนวนลำดับเท่ากับจำนวนทรานซิชัน (2 ทรานซิชัน) ดังนั้นอาจเขียนขั้นตอนในเทรซให้อยู่ในรูป t=Check-credit(p0, ConNo, p1) , create_cont(p1, ConNo ,p2) ได้เช่นกัน เมื่อพิจาณาเทรซของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-1 (b) จะพบว่าเทรซย่อยของโมเดลจะประกอบด้วย 2 เทรซย่อยคือ t1=Flat_rate(p0, **(tot*2)/12**, p1(1666)) และ t2=principle_rate(p0, **(tot/12)+10**, p1(933)) จะเห็นได้ว่าจากทั้งสองเทรซได้มาร์คกิงที่มีโทเค็นอยู่ในเพลส p1 เหมือนกันแต่โทเค็นคัลเลอร์จะต่างกัน



(a) CPN with single execution

(b) CPN with two executions

รูปที่ จ-1 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นที่ใช้ในการสร้างเทรซ

นิยาม จ-2: สถานะแม่และสถานะลูก (Predecessor and successor states)

สำหรับเทรซย่อย t_n ที่เป็นลำดับการเอ็กซ์ซิคิวกิจกรรม (0, α) ถึง (n, α) แสดงด้วย (0, α)... (n, α) เทียบเท่ากับลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน Ts(0), Ts(1), ถึงทรานซิชัน Ts(n) โดยที่ Ts(x) ∈ Ts ดังนั้นเมื่อ 0<= x < n แล้ว (Ts(x), Tr(x+1)) ⊆ t_n การบ่งชี้สถานะแม่และสถานะลูกใช้ฟังก์ชัน Pred(α), Succ(α) เป็นตัวบ่งชี้ โดยที่ฟังก์ชันให้ผลลัพธ์ $\alpha \longrightarrow$ Mk

นิยาม จ-3: เทรซคู่แข่ง (Candidate traces)

ให้โมเดลซีพีเอ็น CPN = (P, Tc, A, Σ, V, C, G, E, I) แล้ว CPN $\Downarrow \mathbb{T}$, ให้เทรซย่อย $t_x, t_y \in \mathbb{T}$ ให้ลำดับการยิงโทเค็นเทรซย่อย t_x = (x(0), α), (x(1), α),... (x(n), α) และเทรซย่อย t_y = (y(0), α), (y(1), α),... (y(n), α) เทรซย่อยทั้งสองเทรซเป็นเทรซคู่แข่งเมื่อ Pred((x(0), α)) = $\alpha_x \wedge$ Pred((x(0), α)) = $\alpha_x \wedge$ Succ((x(n), α)) = Succ((y(n), α))

ซึ่งหมายถึงข้อมูลนำเข้าของทั้งสองเทรซเป็นมาร์คกิงเดียวกันและผลลัพธ์สุดท้ายได้มาร์คกิงเหมือนกันโดยไม่สนใจลำดับการยิงโทเค็นที่เกิดขึ้นระหว่างสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้าย

นิยาม จ-4: สถานะชั่วคราว (Transient states)

จากนิยามโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและแบบมีลำดับชั้นตามหัวข้อ 3.1.6- 3.1.7 ให้โมเดลแบบมีลำดับชั้น CPNM = (CPN, Tsub, Pport, PT, fTsub) สถานะชั่วคราว (ε) คือการยิงโทเค็น $\forall \alpha_x \in \alpha$ ถ้า (z, α_x) $\in t_n \wedge$ α_x.FTran ∈ T $\wedge$ fTsub(α_x.FTran) ∈ Tsub $\wedge$ Outplace(α_x.FTran) $\notin$ Pport แล้ว Succ(α_x) ถือว่าเป็นสถานะชั่วคราว หมายถึงสถานะที่เกิดขึ้นจากการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน มาร์คกิงที่ได้จากการยิงโทเค็นนั้นถือว่าเป็นสถานะชั่วคราว

นิยาม จ-5: เทรซย่อยของสับเน็ตที่มีการกำหนดทรานซิชันทดแทน

ให้โมเดลซีพีเอ็น CPN = (P, Tc, A, Σ, V, C, G, E, I) เมื่อกำหนดให้ CPN เป็นสับเน็ตที่กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนแล้ว ∀tc ∈ Tc แล้ว fTsub(tc) ∈ Tsub เทรซของโมเดลซีพีเอ็น CPN $\Downarrow \mathbb{T}h$, เทรซย่อย $\forall t_h \in \mathbb{T}h$ แล้วสถานะชั่วคราวที่อยู่ใน t_h คือ $\alpha_x \in t_h$ ถ้า α_x.FTran ∈ T $\wedge$ fTsub(α_x.FTran) ∈ Tsub $\wedge$ Outplace(α_x.FTran) $\notin$ Pport แล้วลำดับการยิงโทเค็นที่ก่อให้ผลลัพธ์เป็นสถานะชั่วคราวแล้วจะถูกแทนที่ด้วยการยิงโทเค็นของทรานซิชันทดแทน (0, $\alpha_{x(0)}$), ..., (n, $\alpha_{x(n)}$) = CPN ดังนั้นเทรซย่อยจะแทนที่การยิงโทเค็นของทรานซิชันด้วยสับเน็ต t_h= CPN(Pred((x(n), α_x)), z, Succ((x(n), α_x))) เมื่อ z คือหมายเลขของข้อมูลนำออกแต่ละกรณีของ CPN โดยกรณีที่มีเทรซคู่แข่งจะเลือกเพียงเทรซใดเทรซหนึ่งเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นิยาม จ-6: การสมมูลกันของเทรซ (Trace equivalence)

ให้ $\mathbb{T}1$ และ $\mathbb{T}2$ เป็นเทรซที่แสดงกระบวนการทำงานระบบใดๆ เทรซย่อย $\forall t_n \in \mathbb{T}1$ และ $\forall t_k \in \mathbb{T}2$ เทรซ $\mathbb{T}1$ และ $\mathbb{T}2$ สมมูลกันก็ต่อเมื่อมีลำดับการยิงโทเค็น $t_n \subseteq t_k$ หรือ $t_k \subseteq t_n$ โดยยังคงลำดับ (Order-preserving maps) $\forall \alpha_x \in \alpha$ ของ t_n มีลำดับที่สอดคล้องกับ $\forall \alpha_y \in \alpha$ ของ t_k ดังนั้นเทรซย่อย $t_n \Leftrightarrow t_k$

ตัวอย่างเทรซที่ได้จากโมเดลซีพีเอ็นใดๆ 3 โมเดลมีดังนี้

$\mathbb{T}1$: trace1= {a, b}, trace2= {a, c}

$\mathbb{T}2$: trace1= {a, b}, trace2= {a, b, c}

$\mathbb{T}3$: trace1= {a, b}, trace2= {a, ε, c}

จากเทรซของแต่ละโมเดลจะพบว่าเทรซ $\mathbb{T}1$ ไม่สมมูลกับเทรซ $\mathbb{T}2$ ในขณะที่เทรซ $\mathbb{T}2$ สมมูลกับเทรซ $\mathbb{T}3$ ถึงแม้จะมีสถานะชั่วคราว ε อยู่ในเทรซ จะเห็นได้ยังคงลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน เมื่อสถานะชั่วคราวที่อยู่ในเทรซย่อยคือสถานะที่เกิดจากการยิงโทเค็นของ b

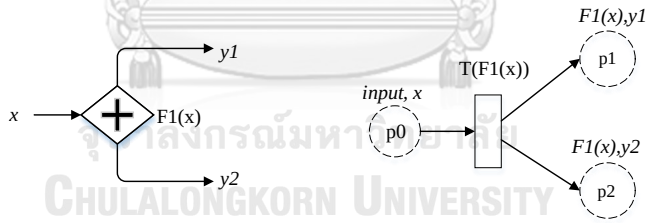
2. ขั้นตอนการพิสูจน์และวิธีพิสูจน์ความถูกต้องของการแปลงโมเดลและการทวนสอบโมเดล

การพิสูจน์ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) พิสูจน์ความถูกต้องของกฎการแปลงอิลีเมนต์บีพีเอ็มเอ็นเป็นซีพีเอ็น และ 2) พิสูจน์ความสมมูลกันระหว่างโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและโมเดลแบบมีลำดับชั้น

2.1. การพิสูจน์ความถูกต้องของกฎการแปลงอิลีเมนต์

เป็นการพิสูจน์ความต้องกันระหว่างอิลีเมนต์ของโมเดลบีพีเอ็มเอ็นและอิลีเมนต์ของซีพีเอ็นมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันความถูกต้องของพฤติกรรมที่ได้หลังจากการแปลงอิลีเมนต์ การพิสูจน์ใช้วิธีพิจาณาจากข้อมูลอินพุทและเอาท์พุทของแต่ละอิลีเมนต์ ซึ่งพฤติกรรมที่จำเป็นต้องพิสูจน์เป็นพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับเกตเวย์เป็นหลัก สาเหตุที่พิสูจน์เฉพาะส่วนของเกตแวย์เพราะเป็นส่วนที่มีการทำงานที่เกี่ยวข้องกับทาสก์ที่มากกว่า 1 ทาสก์ที่มีการแตกกระบวนการ หรือประสานกระบวนการตรวจสอบอ้างอิงกฎการแปลงที่อธิบายในหัวข้อ 3.4 ของบทที่ 3 การพิสูจน์มีดังนี้

1) พิสูจน์พฤติกรรมกรณีการแตกกระบวนการทำงานที่แสดงพฤติกรรมการทำงานแบบขนาน ซึ่งใช้กับกรณีที่เป็นเกตเวย์แบบขนานหรือเกตเวย์แบบอิงเหตุการณ์



(a) CPN divergent parallel gateway (b) CPN divergent parallel gateway

รูปที่ จ-2 พิสูจน์ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของเกตย์เวบ์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ

เมื่อ x คือข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์แบบขนานที่เกตเวย์ไม่ปรากฏเงื่อนไขบนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ ฟังก์ชัน F1() แทนพฤติกรรมการทำงานแบบขนาน และ y1, y2 เป็นข้อมูลนำออกของฟังก์ชัน F1() เมื่อแปลงเกตเวย์ไปเป็นทรานซิชัน T(F1(x)) หมายถึงทรานซิชัน T มีฟังก์ชันที่รับข้อมูลนำเข้า x และเมื่อเขียนในรูปแบบเซ็ตของคู่อันดับได้ {(x, F1())}, {(F1(x), y1)}, {(F1(x), y1)} รูปที่ จ-2 แสดงการไหลของข้อมูลของเกตเวย์แบบขนานที่ใช้แตกกระบวนการ สมมติฐานของเกตเวย์แบบขนานคือ เมื่อเกตเวย์รับข้อมูลนำเข้าเกตเวย์จะให้ข้อมูลนำออกที่เหมือนกันดังนั้นต้องพิสูจน์ว่าข้อมูลนำออกที่ได้จากเพลส p1 เท่ากับ p2

พิสูจน์โดยข้อขัดแย้ง $x \in \{0, 1\}$ แล้ว $y1 \neq y2$

กำหนดให้อินพุท x=1 ที่เพลสนำออก p1 และ p2

p1 ≠ p2

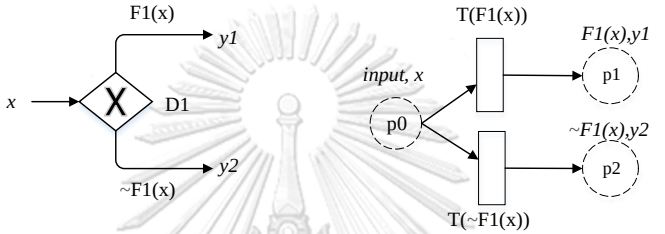
(F1(1), y1) ≠ (F1(1), y2)

(1, y1) ≠ (1, y2)

1 ≠ 1

∴ y1≠ y2 เป็นเท็จ ดังนั้นเป็นไปไม่ได้ที่จะมีค่าใดที่เท่าให้ y1≠ y2

2) พิสูจน์พฤติกรรมกรณีการแตกกระบวนการที่ขัดแย้ง (Conflict) ซึ่งใช้กับกรณีที่เป็นเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ



(a) CPN divergent exclusive gateway

(b) CPN divergent exclusive gateway

รูปที่ จ-3 พิสูจน์ข้อมูลนำเข้าและนำออกของเกตย์เวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ

เมื่อ x คือข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ เงื่อนไขของเกตเวย์ที่อยู่บนเส้นที่ออกจากเกตเวย์ประกอบด้วยเซ็ตของเงื่อนไข F1() และ ~F1() แทนพฤติกรรมการทำงานแบบเอ็กซ์ครูซีฟ และ y1, y2 เป็นค่านำออกของของฟังก์ชัน F1() และ ~F1() ตามลำดับ นิยามของเกตเวย์คือเกตเวย์ให้ค่านำออกเหมือนกัน เมื่อแปลงเกตเวย์ไปเป็นทรานซิชัน T(F1(x)) และ T(~F1(x)) หมายถึงทรานซิชัน T มีฟังก์ชันที่รับข้อมูลนำเข้า x และเมื่อเขียนในรูปแบบเซ็ตของคู่อันดับได้ {(x, F1())}, {(F1(x), y1)}, {(F1(x), y1)} รูปที่ จ-3 แสดงการไหลของข้อมูลของเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้แตกกระบวนการ สมมติฐานของเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟคือ เมื่อเกตเวย์รับข้อมูลนำเข้าเกตเวย์จะให้ข้อมูลนำออกที่ต่างกันดังนั้นต้องพิสูจน์ว่าข้อมูลนำออกที่ได้จากเพลส p1 ไม่เท่ากับ p2

พิสูจน์โดยข้อขัดแย้ง $x \in \{0, 1\}$ แล้ว y1 = y2

กำหนดให้อินพุท x=1 ที่เพลสนำออก p1 และ p2

p1 = p2

(F1(1), y1) = (~F1(1), y2)

(1, y1) = (0, y2)

1 = 0

∴ y1 = y2 เป็นเท็จ ดังนั้นเป็นไปไม่ได้ที่จะมีค่าใดที่เท่าให้ y1 = y2

3) การพิสูจน์พฤติกรรมมิวชวลเอ็กซ์คลูชัน (Mutual Exclusion) และบัฟเฟอร์ (Bounded Buffers)

มิวชวลเอ็กซ์คลูชันเป็นพฤติกรรมที่ไม่สามารถใช้สัญลักษณ์บีพีเอ็มเอ็นกำหนดพฤติกรรมได้ จากกฎการแปลงอิลีเมนต์ข้อที่ 20 เป็นการกำหนดขอบเขตให้เพลส ค่าขอบเขตสามารถใช้กำหนดพฤติกรรมแบบมิวชวลเอ็กซ์คลูชันได้ สามารถพิจารณาพฤติกรรมแบบมิวชวลเอ็กซ์คลูชันได้ดังนี้

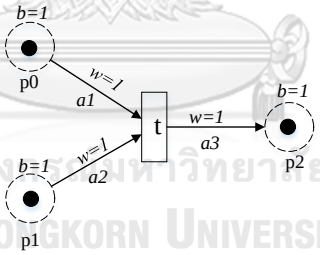
อ้างอิงนิยาม 3.1.6 โมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น และนิยามการเปิดทรานซิชันและการยิงโทเค็นของทรานซิชัน การยิงโทเค็นของทรานซิชันประกอบด้วยเหตุการณ์ 2 เหตุการณ์ที่มีเงื่อนไขดังนี้

ก. เงื่อนไขการเปิดทรานซิชัน t โดย $t \in T$, เมื่อมีมาร์คกิง M ที่ทำให้ทรานซิชันถูกเปิด, สามารถเขียนการเปิดทรานซิชันนั้นๆ ด้วยสัญลักษณ์ $M(t) \rightarrow$, โดยเงื่อนไขการเปิดทรานซิชันคือ

$\forall p \in (p \times t)$: $M(p) \geq W(p, t)$

ข. หลังจากทรานซิชันถูกเปิด ทรานซิชันอาจจะยิงโทเค็นหรือไม่ก็ได้ โดยเงื่อนไขการยิงโทเค็นของทรานซิชันคือ

$\forall p \in P$: $M0(p) = M(p) - W^{-}(p, t) + W^{-}(t, p)$ ก็ต่อเมื่อ $M(p). W^{-}(t, p) + M(p(t, p)) \leq Bound(t, p)$ โดย W^{-} คือ $W^{-}(x, y) := W(x, y)$ สำหรับ $(x, y) \in F$ สร้างมาร์คกิง M0 สามารถเขียนให้อยู่ในรูป $M(t) \rightarrow M0$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ จ-4 พิสูจน์พฤติกรรมมิวชวลเอ็กซ์คลูชัน

จากรูปที่ จ-4 และเงื่อนไขที่ได้อธิบายตามข้อ ก. และ ข. สามารถพิสูจน์พฤติกรรมมิวชวลเอ็กซ์คลูชันได้ดังนี้

พิสูจน์เงื่อนไขการเปิดทรานซิชัน

$\forall p \in (p \times t)$: $M(p) \geq W(p, t)$

$\forall p \in (p \times t) = \{p0, p1\}$

$M(p) = \{p0, p1\}$ จะเห็นได้ว่าจำนวนโทเค็นในเพลส p0 และ p1 เท่ากับ 3 ดังนั้น $M(p)=3$

$W(p, t)=2$ มาจากค่าน้ำหนัก (w=1) ของอาร์ก a1 และ a2

ทำให้เงื่อนไข $M(p) \geq W(p, t)$ เป็นจริง ดังนั้นทรานซิชัน t จึงถูกเปิด

พิสูจน์เงื่อนไขการยิงโทเค็นของทรานซิชัน

$\forall p \in P$: M0 (p) = M(p) – W^{-} (p, t) + W^{-} (t, p) ก็ต่อเมื่อ M(p). W^{-} (t, p) + M(p(t, p)) ≤ Bound(t, p) จากรูปที่ จ-4 สามารถทราบค่าดังนี้

$\forall p \in P$ = {p0, p1, p2}

M(p) = {p0, p1, p2}

W^{-} (p, t) = 2 มาจากค่าน้ำหนัก (w=1) ของอาร์ก a1 และ a2

W^{-} (t, p) = 1 มาจากค่าน้ำหนัก (w=1) ของอาร์ก a3

M(p(t, p)) ={p3} =1 เนื่องจากเพลส p3 มีโทเค็นอยู่ก่อนยิงโทเค็นอยู่ 1 โทเค็น

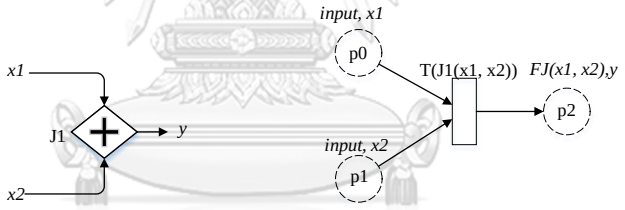
Mp(W^{-} (t, p)) + M(p(t, p)) = 1+1 ==> 2

Bound(t, p) ={p3} =1 (จากค่า b=1)

∴ 2 ≤ 1 เป็นเท็จ

สรุปได้ว่า จากตัวอย่างในรูปที่ จ-4 ถึงแม้ทรานซิชันจะถูกปิด แต่เงื่อนไขการยิงโทเค็น M(p). W^{-} (t, p) + M(p(t, p)) ≤ Bound(t, p) เป็นเท็จ ส่งผลให้ทรานซิชัน t ไม่สามารถยิงโทเค็นไปยังเพลส p3 ได้เนื่องจากเพลส p3 ถูกจำกัดให้บรรจุโทเค็นได้สูงสุด 1 โทเค็น จะเห็นได้ว่าเราสามารถนำคุณสมบัติของการกำหนดค่าขอบเขตของเพลสไปใช้ในการแสดงพฤติกรรมแบบมิวชวลเอ็กซ์คลูชันได้

4) พิสูจน์พฤติกรรมกรณีประสานกระบวนการแบบขนาน



(a) CPN convergent parallel gateway (b) CPN convergent parallel gateway

รูปที่ จ-5 พิสูจน์ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของเกตเวย์ประสานกระบวนการแบบขนาน

ตัวอย่างการไหลของข้อมูลแสดงในรูปที่ จ-5 เมื่อ x1 และ x2 คือข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์ J1 โดย J1 เป็นฟังก์ชันของเกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการ, y เป็นข้อมูลนำออกของฟังก์ชัน J1() สมมติฐานของเกตเวย์แบบแบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการคือ เกตเวย์จะทำงานและสร้างข้อมูลนำออกได้ก็ต่อเมื่อรับข้อมูลนำเข้าครบเท่านั้น ดังนั้นการทำงานของเกตเวย์แบบขนานที่ใช้ประสานกระบวนการเป็นการทำโอเปอร์เรชัน “And” กับข้อมูลนำเข้าที่รับ J1(x1, x2) = x1 ∧ x2

พิสูจน์ x1 ∧ x2 = 0 ถ้าข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์ไม่ครบ

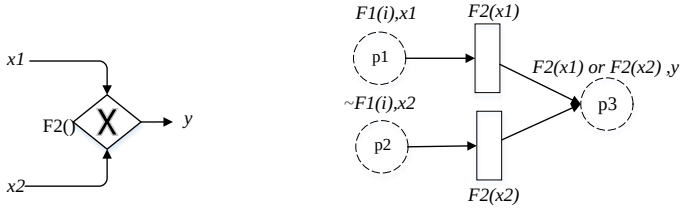
กำหนดให้ x1=1 แทนเหตุการณ์มีข้อมูลนำเข้า, x2=0 แทนเหตุการณ์ไม่มีข้อมูลนำออก

แทนข้อมูลนำเข้า x1 และ x2 ที่เพลสนำเข้า p0 และ p1

1 ∧ 0 = y

∴ 0 = y เป็นจริง ซึ่งหมายถึงเกตเวย์ไม่สร้างเอาท์พุท

5) พิสูจน์พฤติกรรมกรณีประสานกระบวนการแบบเอ็กซ์คลูซีฟ



(a) CPN convergent exclusive gateway (b) CPN convergent exclusive gateway

รูปที่ จ-6 พิสูจน์ข้อมูลนำเข้าและนำออกของเกตเวย์ประสานกระบวนการแบบเอ็กซ์คลูซีฟ

ตัวอย่างการไหลของข้อมูลแสดงในรูปที่ จ-6 เมื่อ i คือเงื่อนไขของเกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟ F1 ที่เป็นตัวแตกกระบวนการ, x1 และ x2 เป็นข้อมูลนำออกของทาส์ก่อนหน้า และเป็นข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์ F2 โดย F2 เป็นฟังก์ชันของเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการ, y เป็นข้อมูลนำออกของฟังก์ชัน F2() สมมติฐานของเกตเวย์แบบแบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการคือ เกตเวย์สามารถทำงานและสร้างข้อมูลนำออกได้ทันทีเมื่อรับข้อมูลนำเข้าเพียงตัวใดตัวหนึ่งก็ได้ ดังนั้นการทำงานของเกตเวย์แบบเอ็กซ์คลูซีฟที่ใช้ประสานกระบวนการเป็นการทำโอเปอร์เรชัน “หรือ” กับข้อมูลนำเข้าที่รับ F2(x1) ∨ F2(x2) = x1 ∨ x2

พิสูจน์ x1 ∨ x2 = 1 ถ้าข้อมูลนำเข้าของเกตเวย์ไม่ครบ แล้ว y = 1

กำหนดให้ x1=1 แทนเหตุการณ์มีข้อมูลนำเข้า, x2=0 แทนเหตุการณ์ไม่มีข้อมูลนำเข้า

แทนข้อมูลนำเข้า x1 และ x2 ที่เพลสนำออก p1 และ p2

1 ∨ 0 = y

∴ 1 = y เป็นจริง ซึ่งหมายถึงเกตเวย์สร้างข้อมูลนำออกถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลนำเข้า x2 ก็ตาม

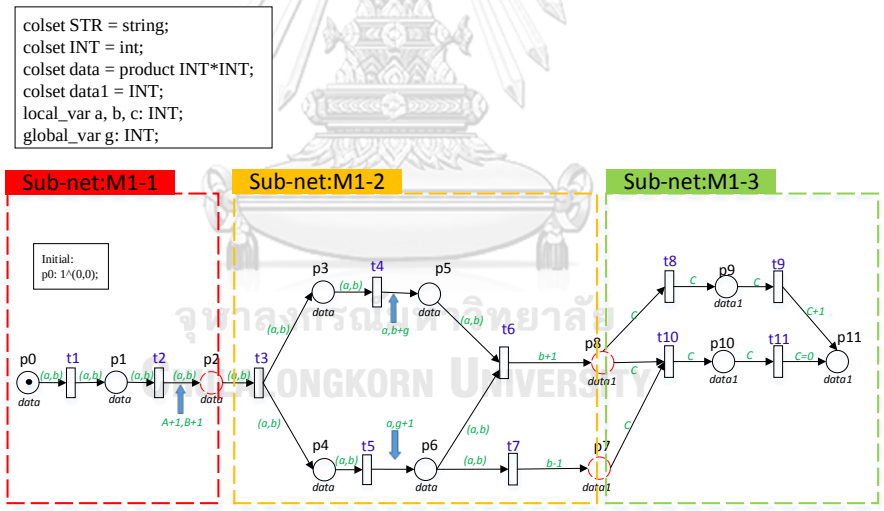
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2. การพิสูจน์ความสมมูลระหว่างโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและแบบมีลำดับชั้น

สมมติให้โมเดล ซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชัน CPN=(P, T, A, Σ, V, C, G, E, I) ที่ประกอบด้วย 3 สับเน็ต sm1, sm2 cและ sm3, และโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชัน CPN’ = (CPN, Tsub, Pport, PT, fTsub) โดยที่กำหนดให้ sm2 เป็นทรานซิชันทดแทน (Tsub={sm2}) เมื่อกำหนดให้ทั้งสองโมเดลมีการกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นแบบเดียวกันและนำโมเดลไปสร้างปริภูมิสถานะจะได้กราฟการเข้าถึง และได้เทรซ CPN $\Downarrow \mathbb{T}$ ของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและ CPN’ $\Downarrow \mathbb{T}h$ เป็นเทรซของโมเดลแบบมีลำดับชั้น จากสมมติฐานสามารถระบุชนิดของทรานซิชันของโมเดลว่าทรานซิชัน $\forall$tr ∈ T ถ้า fTsub(tr) ∈ Tsub แสดงว่าทรานซิชันนั้นอยู่ในส่วนของสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน ในขณะที่ fTsub(tr) ∉ Tsub คือทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ตที่ไม่ได้กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน จากนิยามเทรซจะเห็นได้ชัดว่า การลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน $\forall\alpha_x \in \alpha$ ของเทรซย่อย $t_n \in \mathbb{T}$ จะได้จากการยิงโทเค็นของทรานซิชัน α_x.FTran ∈ T ในขณะที่การลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชัน $\forall\alpha_y \in \alpha h$ ของเทรซย่อย $t_h \in \mathbb{T}h$ จะได้จากการยิงโทเค็นของทราน

ชิชัน α_y.FTran ∈ T ∧ fTsub(α_y.FTran) ∉ Tsub) ดังนั้นลำดับการยิงโทเค็นในเทรซย่อย $t_h \subseteq t_n$ การพิสูจน์โดยข้อขัดแย้งโดยพิจารณา α_y.FTran ที่เป็นทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ตที่กำหนดเป็นทรานซิชันทดแทนจะได้ α_y.FTran ∈ T ∧ fTsub(α_y.FTran) ∈ Tsub) จากนิยาม จ-5 จะเห็นว่าเป็นไปไม่ได้ที่ α_y จะเกิดจากการยิงโทเค็นของทรานซิชันอยู่ในสับเน็ตที่ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน เพราะ fTsub(α_y.FTran) ∈ Tsub เป็นสถานะชั่วคราวที่ไม่ได้อยู่ใน t_h และจากนิยาม จ-6 จะเห็นได้ว่าลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่ไม่ก่อให้เกิดสถานะชั่วคราวยังคงลำดับการยิงโทเค็นอยู่ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า CPN ⟺ CPN'

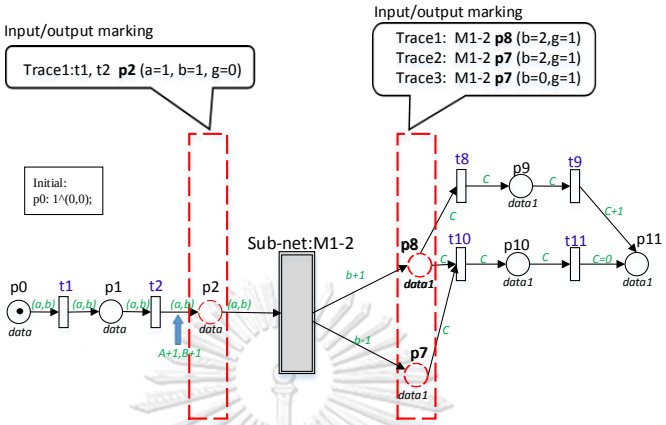
อีกวิธีหนึ่งของการพิสูจน์ความสมมูลกันระหว่างโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและแบบมีลำดับชั้นคือการแสดงด้วยตัวอย่างข้อมูล การพิสูจน์แสดงให้เห็นคุณสมบัติของโมเดลซีพีเอ็นที่มีการตรวจสอบข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของโมเดล การตรวจสอบข้อมูลนำเข้าและนำออกเป็นส่วนหนึ่งการตรวจสอบเงื่อนไขก่อน (Precondition) และตรวจสอบเงื่อนไขหลัง (Postcondition) จากคุณสมบัติของการโมเดลซีพีเอ็นคือสามารถกำหนดคัลเลอร์เซ็ตให้กับแต่ละเพลสได้ ซึ่งคัลเลอร์เซ็ตของเพลสที่กำหนดจะเป็นทำหน้าที่ตรวจสอบประเภทข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของการเอ็กซ์ซิคิวโมเดลหรือแต่ละสับเน็ต



รูปที่ จ-7 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นแบบหลายสับเน็ตที่ใช้สร้างเทรซ

รูปที่ จ-7 แสดงตัวอย่างซีพีเอ็นโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นที่ประกอบด้วย 3 สับเน็ต M:={M1-1, M1-2, M1-3} เพลสที่แสดงด้วยเส้นประสีแดงคือเพลสที่เป็นพอร์ทนำเข้าหรือนำออกของโมเดล เช่นเพลส p2 เป็นพอร์ทนำออกของสับเน็ต M1-1 และเป็นพอร์ทนำเข้าของสับเน็ต M1-2 จากนิยามเทรซสามารถเขียนเทรซใดๆ ของสับเน็ต M1-1 คือ M1-1 ⇓ t1 , v; ค่า v คือโทเค็นคัลเลอร์ของมาร์คกิงที่โทเค็นที่อยู่ในเพลส p2, สมมติให้ค่าของ v ในขณะนั้นคือ (1, 1) นั่นหมายความว่าค่าดังกล่าวจะถูกนำไปเป็นข้อมูลนำเข้าของสับเน็ต M1-2 ต่อไป จากนิยามซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นในหัวข้อ 3.1.6 เงื่อนไขข้อบังคับของมาร์คกิงใดๆ คือ Type[m(p)] = C(p)MS หมายถึงโทเค็นที่อยู่ใน

เพลส p2 จะต้องมีโทเค็นคัลเลอร์ตรงตามประเภทของคัลเลอร์เซ็ต Data (int, int) ซึ่งเงื่อนไขข้อบังคับเกี่ยวกับชนิดตัวแปรของมาร์คกิงเปรียบเสมือนเงื่อนไขก่อนและเงื่อนไขหลังของการเอ็กซ์ซิคิวสับเน็ต จากโมเดลที่แสดงในรูปที่ จ-7 เทรซของแต่ละการเอ็กซ์ซิคิวของสับเน็ตแสดงในตารางที่ จ-1

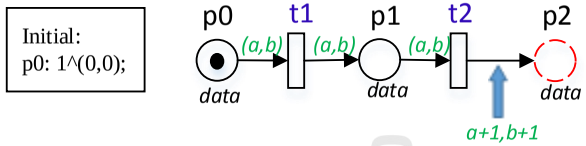
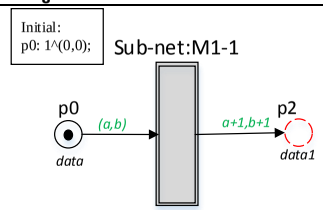
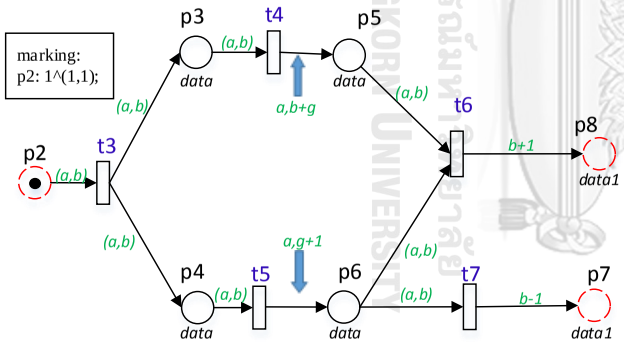
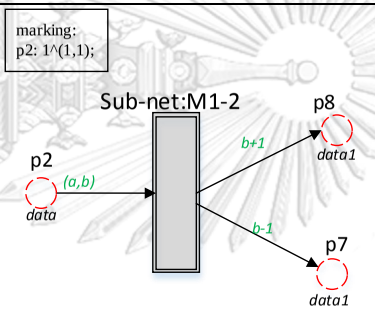


รูปที่ จ-8 ตัวอย่างโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7 ที่จัดโครงสร้างแบบลำดับชั้นโดยกำหนดให้สับเน็ต M1-2 เป็นทรานซิชันทดแทน

พิจาณาข้อมูลเทรซที่แสดงในตารางที่ จ-1 เมื่อเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นสับเน็ต M1-1 จนกระทั่งถึงสับเน็ต M1-3 มาร์คกิงสุดท้ายของโมเดลคือมีโทเค็นอยู่ที่เพลส p11 ด้วยโทเค็นคัลเลอร์ p11: 1^(3) และค่าตัวแปรโกลบอล g = 1 ดังนั้นเมื่อแสดงเทรซของโมเดล M1 แบบไม่มีลำดับชั้นคือ M1 ⇓ 𝕋, {3, 1} โดยค่า 3 คือค่าของโทเค็นที่อยู่ที่เพลสและค่า 1 คือค่าของตัวแปรกลาง g และเมื่อพิจารณาเทรซที่ได้จากแต่ละสับเน็ตจะพบว่าได้ข้อมูลนำออกที่เหมือนกัน ตัวอย่างข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของสับเน็ต M1-2 แสดงในรูปที่ จ-8 และรายละเอียดของแต่ละเทรซแสดงในตารางที่ จ-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลสับเน็ตและเทรซของการเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7

สับเน็ต	โมเดลแบบซีพีเอ็นไม่มีลำดับชั้น	ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน	เทรซ
M1-1			เทรซของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้น trace: t1, t2 → **p2** (a=1, b=1, g=0) เทรซของโมเดลที่ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน trace: M1-1 → **p2** (a=1, b=1, g=0)
M1-2			เทรซของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้น Trace1: t3, t4, t5, t6→ **p8** (b=2,g=1) Trace2: t3, t4, t5, t7→ **p7** (b=2,g=1) Trace3: t3, t5, t4, t6→ **p8** (b=∞,g=1) Trace4: t3, t5, t4, t7→ **p7** (b=0,g=1) Trace5: t3, t5, t7, t4→ **p7** (b=0,g=1) เทรซของโมเดลที่ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน

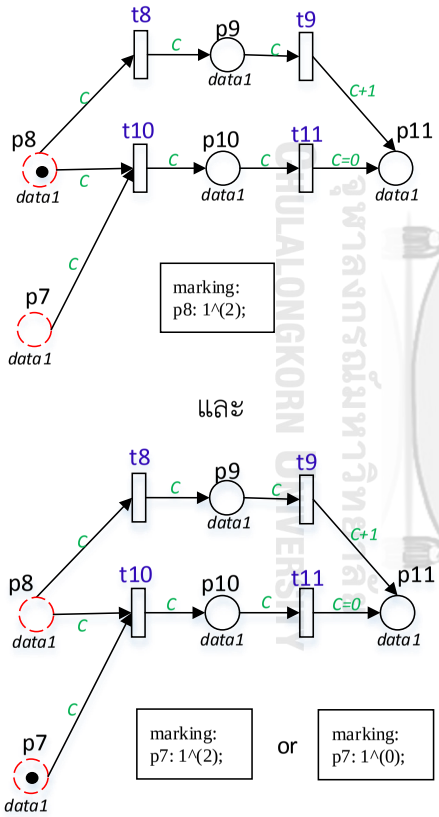
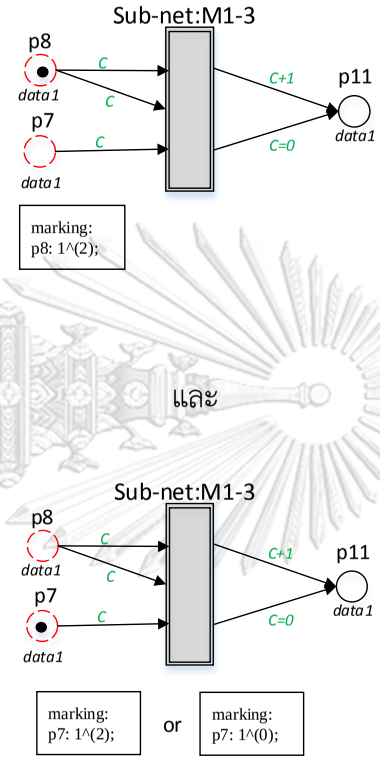
CHULALONGKORN UNIVERSITY จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลสับเน็ตและเทรซของการเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7 (ต่อ)

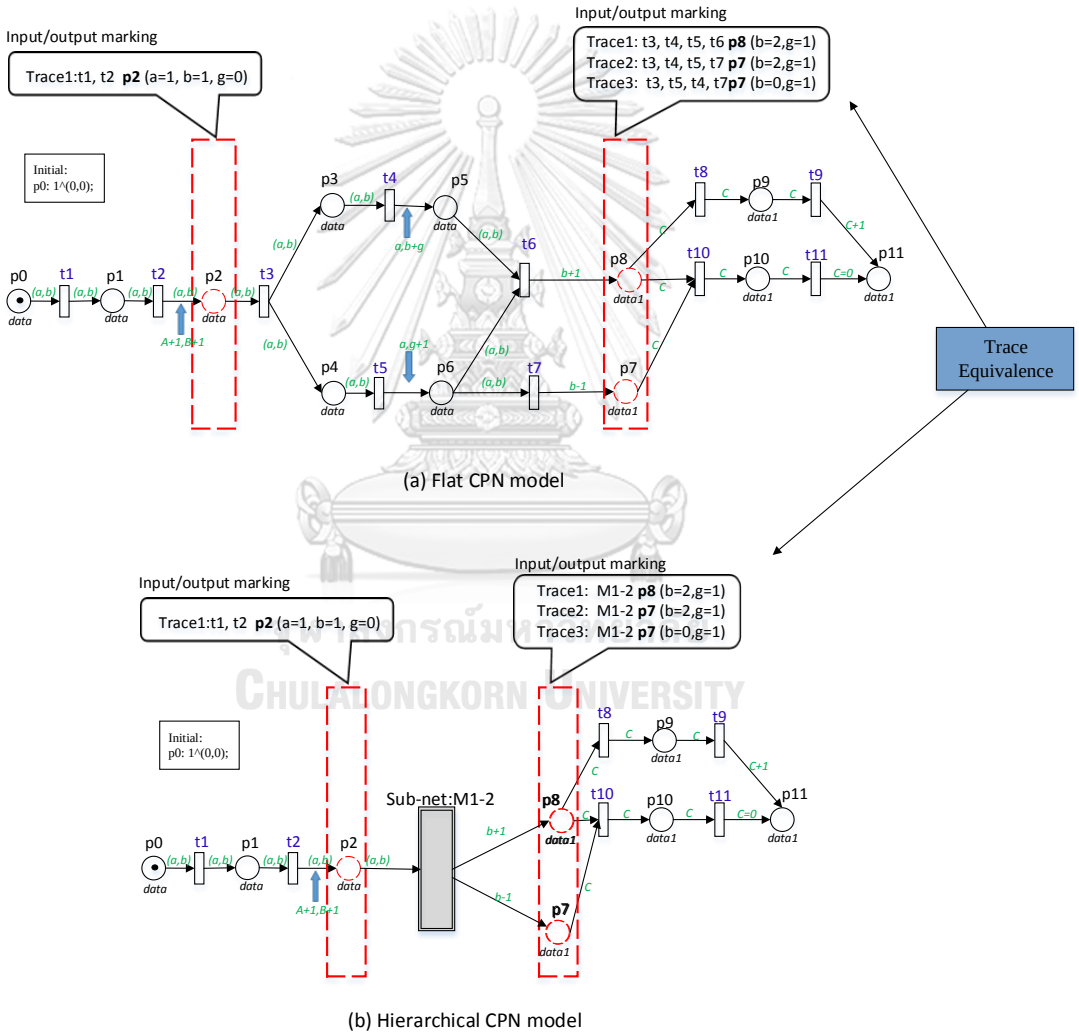
สับเน็ต	โมเดลแบบซีพีเอ็นไม่มีลำดับชั้น	ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน	เทรซ
M1-2			เทรซของโมเดลที่ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน Trace1: M1-2→ **p8** (b=2,g=1) Trace2: M1-2→ **p7** (b=2,g=1) ~~Trace3: M1-2→ **p8** (b=∞,g=1)~~ Trace4: M1-2→ **p7** (b=0,g=1) ~~Trace5: M1-2→ **p7** (b=0,g=1)~~ * ข้อมูลนำออกของเทรซที่ 1, 2 และ 4 จะถูกนำไปเป็นข้อมูลนำเข้าของสับเน็ต M1-3 ไม่เอาข้อมูลนำออกของเทรซที่ 3 เพราะเป็นกรณีที่ไม่ทราบข้อมูลนำออกและไม่เอาข้อมูลของเทรซที่ 5 เนื่องจากเป็นเทรซคู่แข่งกับเทรซที่ 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลสับเน็ตและเทรซของการเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7 (ต่อ)

สับเน็ต	โมเดลแบบซีพีเอ็นไม่มีลำดับชั้น	ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน	เทรซ
M1-3			เทรซของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้น Trace1: t8, t9→ **p11** (c=3,g=1) เทรซของโมเดลที่ลดรูปเป็นทรานซิชันทดแทน Trace1: M1-3→ **p11** (c=3,g=1) จากข้อมูลนำออกของสับเน็ต M1-2 ข้อมูลนำออกของเทรซ Trace2 และ Trace4 เมื่อนำมาเป็นข้อมูลนำเข้าของสับเน็ต M1-3 พบว่าเป็นมาร์คกิงตาย ดังนั้นมูลนำออกของเทรซ Trace2 และ Trace4 ของสับเน็ต M1-2 ไม่มีเทรซเกิดขึ้น

เมื่อพิจาณาข้อมูลเทรซที่แสดงในตารางที่ จ-1 จะเห็นได้ว่าเทรซของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นและของโมเดลที่มีการลดเป็นทรานซิชันทดแทนให้ข้อมูลนำออกที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการเก็บข้อมูลปริภูมิสถานะด้วยวิธีสวิปไลน์กับทรานซิชันทดแทนตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.3. ทำให้เมื่อเอ็กซ์ซิคิวโมเดลซีพีเอ็นที่มีการจัดโครงสร้างที่แตกต่างกันด้วยมาร์คกิงเดียวกันจะได้ผลลัพธ์ที่เป็นมาร์คกิงสุดท้ายสมมูลกันเสมอไม่ว่าจะจัดโครงโครงโมเดลให้มีทรานซิชันทดแทนมากกว่ามากกว่า 1 ทรานซิชันก็ตาม รูปที่ จ-9 แสดงการเปรียบเทียบเทรซของโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและโมเดลซีพีเอ็นที่มีลำดับชั้นของโมเดลซีพีเอ็นในรูปที่ จ-7



รูปที่ จ-9 เปรียบเทียบเทรซของโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้นและโมเดลซีพีเอ็นที่มีลำดับชั้น

ทฤษฎีบท 1: ถ้าสามารถตรวจสอบพบการละเมิดค่ายืนยงในการทวนสอบโมเดลแบบลำดับชั้นแล้วจะสามารถตรวจสอบการละเมิดค่ายืนยงในการทวนสอบโมเดลแบบไม่ลำดับชั้นด้วยเช่นกัน

พิสูจน์ทฤษฎีบท 1

จากสับเน็ต M1-1, M1-2 และ M1-3 ในตารางที่ จ-1 สมมติให้โมเดล CPN เป็นโมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น และ CPN' เป็นโมเดลซีพีเอ็นแบบมีลำดับชั้นโดยที่สับเน็ต M1-2 ถูกกำหนดเป็นทรานซิชันทดแทน ถ้ามีการกำหนดมาร์คกิงเริ่มต้นให้ทั้งสองโมเดล ด้วยมาร์คกิงแบบเดียวกันแล้วนำโมเดลทั้งสองไปสร้างปริภูมิสถานะ จะได้เทรซ $\mathbb{T}$ ของโมเดล CPN และเทรซ $\mathbb{T}\boldsymbol{h}$ ของโมเดล CPN' โดยเทรซย่อยของ $\mathbb{T}\boldsymbol{h}$ จะเป็นสับเซ็ตของเทรซย่อยของ $\mathbb{T}$ ที่ยังคงลำดับการยิงโทเค็น

กรณีทวนสอบค่ายืนยงของโมเดล CPN' ทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ต M1-2, (t3, t4, t5, t6, t7) แล้ว fTsub(tr) ∈ Tsub แล้วอินสคริปชัน E(tr) จะเป็นอินสริปชันที่อยู่บนอาร์ก ถ้าทรานซิชันนั้นๆ ถูกเปิดและยิงโทเค็นแล้วตัวแปรกลาง b และ g ที่อยู่ในอินสริปชันจะถูกปรับปรุงค่าข้อมูล เมื่อจบการทำงานของทรานซิชันทดแทนแล้ว ผลลัพธ์ของค่าตัวแปรกลางจะขึ้นอยู่กับลำดับการยิงโทเค็นของทรานซิชันที่อยู่ใน Tsub ของแต่ละกรณี จากรูปที่ จ-9 (b) เทรซย่อยที่เกิดจากทรานซิชันทดแทนประกอบด้วย 3 เทรซย่อย คือ trace1 ที่มีค่าตัวแปรกลาง b=2 และ g=1, trace2 มีค่าตัวแปรกลาง b=2 และ g=1 และ trace3 มีค่าตัวแปรกลาง b=0 และ g=1 สมมติมีการกำหนดค่ายืนยง INV ด้วยเพลดิเคท "b<=0" จะเห็นได้ว่า trace1 และ trace2 ละเมิดค่ายืนยง

กรณีทวนสอบยืนยงของโมเดลแบบไม่มีลำดับชั้นที่กระทำกับเทรซ $\mathbb{T}$ ซึ่งเทรซย่อยใดๆ ที่เกิดจาก t3, t4, t5, t6, t7 ที่เป็นทรานซิชันที่เป็นสมาชิกของสับเน็ต M1-2 ถ้ามีเทรซใดที่มีมาร์คกิงที่เกิดจากการยิงโทเค็นของทรานซิชัน t4, t5, t6, t7 จะมีการปรับปรุงค่าของตัวแปรกลางเสมอ ดังนั้นถ้ามีการกำหนดค่ายืนยง INV ด้วยเพลดิเคท "b<=0" จะเห็นได้ว่ายังมีการทวนสอบการละเมิดค่ายืนยงทุกๆ การยิงโทเค็นของทรานซิชันที่อยู่ในสับเน็ต M1-2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดโครงสร้างโมเดลไม่มีผลต่อการทวนสอบการละเมิดค่ายืนยง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ฉ
อภิธานศัพท์

เกตเวย์	Gateways
เกตเวย์เอ็กซ์คลูซีฟ	Exclusive gateways
เกตเวย์แบบไดเวอร์เจนท์	Divergent gateways
เกตเวย์แบบคอนเวอร์เจนท์	Convergent gateways
เกตเวย์แบบพาราเรล	Parallel gateways
เกตเวย์แบบอินคลูซีฟ	Inclusive gateways
เกตเวย์แบบอีเวนท์เบส	Event-based gateways
เครื่องมือตรวจสอบโมเดล	Model checking tools
เครื่องมือออกแบบบีเพล	BPEL Designer
เค้าโครง	Skeleton
เงื่อนไขการ์ด	Guard conditions
เซ็ตนำเข้า	Input set
เซ็ตนำออก	Output set
เทคนิคการตรวจสอบความเท่ากัน	Equivalence checking
เทรซของการเอ็กซ์ซิคิว	Execution traces
เปิด, เปิดใช้งาน (ทรานซิชัน)	Enable
เพลส	Place
เพลสนำเข้า	Input places
เพลสนำออก	Output places
เพลสพอร์ท	Port places
เวอร์ชัน	Version
เส้นสถานะ	State edges
แบบรูปเชิงผลลัพธ์	Consequence pattern
แบบรูปเชิงยืนยง	Invariant pattern
แบบรูปเชิงลำดับ	Sequential pattern
แบบรูปเชิงสมภพหรือเชิงยกเว้น	Occurrence /Exclusion pattern
แบบรูปของโฟลว์	Flow patterns
แบบรูปของคุณสมบัติ	Property patterns
แผนภาพกระบวนการ	Process diagram
แผนภาพคลาส	Class diagram
แผนภาพคอลลาโบเรชัน	Collaboration diagram
แผนภาพยูสเคส	Use case diagram
แม็ปปิงข้อมูลนำเข้า	Input data mapping

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แม็ปปิงข้อมูลนำออก	Output data mapping
แหล่งเก็บข้อมูล	Data store
แอสโซชิเอชันข้อมูล	Data association
โครงสร้างแบบลำดับชั้น	Hierarchical structure
โทเค็น	Token
โพรเซสย่อย	Sub process
โฟลว์ข้อความ	Message flow
โฟลว์ลำดับ	Sequence flow
โมเดลเช็คกิง	Model checking
โมเดลเลอร์บีพีเอ็มเอ็นของอีคลิปส์	Eclipse BPMN modeler
โมเดลซีพีเอ็นแบบไม่มีลำดับชั้น	Non-hierarchical CPN Model
โมเดลซีพีเอ็นแบบลำดับชั้น	Hierarchical CPN Model
โมเดลนามธรรม	Abstract model
โมเดลนามธรรม	Abstract models
โหนด	Node
โหนดแม่	Ancestor nodes
โหนดแยก	Divergent node
โหนดประสาน	Convergent node
โหนดฟังก์ชัน	Function node
โหนดลูก	Succor nodes
โหนดสถานะ	State nodes
โอเปอร์เรชัน	Operations
โอเอ็มจี	Object Management Group: OMG
ไทม์เพทริเน็ต	Time petri net: TPN
ไบล์ดิงอิลีเมนต์	Binding elements
กรอบงาน	Framework
กระบวนการทางธุรกิจ	Business process
กราฟการเข้าถึง	Reachability graph
กราฟที่เข้าถึง	Reachable graph
กล่องดำ	Black box
การ, เอ็กซ์ซิคิว	Execute
การ, ติดตาย	Deadlock
การเขียนคุณสมบัติรูปนัย	Formalizing Properties
การเปลี่ยนสถานะ	State change
การแปรผล	Interpret results
การละเมิดค่ายืนยง	Invariant violation

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การแวะผ่านกราฟการเข้าถึง	Reachable graph traversal
การ์ดซีอาร์ซี	Class Responsibilities and Collaborators
การติดตาม	Observe
การทวนสอบแบบลำดับชั้น	Hierarchical verification
ระบบขนาน	Parallel system
การยิงโทเค็นของทรานซิชัน	Transition firing
การระเบิดของปริภูมิสถานะ	State space explosion
การลดปริภูมิสถานะ	State space reduction
การวิเคราะห์ปริภูมิสถานะ	State space analysis
การสร้างโมเดล	Model Construction
กิจกรรม	Activities
ข้อกำหนดต้องการ	Requirements specification
ข้อความ	Message
ข้อมูลตัวอย่าง	Counterexample
ข้อมูลนำเข้า	Input data
ข้อมูลนำออก	Output data
ความขึ้นต่อกันของข้อมูล	Data dependencies
ความขึ้นต่อกันของคอนโทรลโฟลว์	Control flow dependencies
ความสัมพันธ์เชิงเหตุ	Causal relation
ความสัมพันธ์เชิงลำดับ	Ordering relation
คอมไพล์ภาษาจาวา	Java complier
คอลลาโบเรชัน	Collaboration
คัลเลอร์เซ็ต	Colored set
คัลเลอร์เพทริเนตหรือซีพีเอ็น	Colored Petri Net: CPN
คำค้น	Query
คำอธิบายโมเดล	Meta-model
คุณสมบัติไลน์เนส	Liveness properties
คุณสมบัติการเข้าถึง	Reachability properties
คุณสมบัติความปลอดภัย	Safe properties
คุณสมบัติความสมบูรณ์	Sound properties
คุณสมบัติที่พึงประสงค์	Desirable Properties
ซิงเกิลไบล์ดิงอิลีเมนต์	Single binding element
ดัชนี	Index
ตรรกศาสตร์เวลา	Temporal Logic
ตรรกศาสตร์เวลาแบบเชิงเส้น	Linear Temporal Logic : LTL
ตรรกศาสตร์ต้นไม้แบบคณนา	Computation Tree Logic : CTL

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวแปรโกลบอล	Global variables
ตัวแปรโลคอล	Local variables
ตัวบ่งปริมาณ	Quantifier
ตัวสร้างปริภูมิสถานะ	State space generator
ตัวอย่างเหตุการณ์	Counter example
ตามสถาปัตยกรรมเชิงบริการหรือเอสโอเอ	Service-Oriented Architecture: SOA
ทรานซิชัน	Transition
ทรานซิชันทดแทน	Substitute transitions
ทากส์รับ	Receive task
ทาสก์	Task
ทาสก์เซอร์วิส	Service task
ทาสก์แมนนวล	Manual task
ทาสก์ที่ไปไม่ถึง หรือทาสก์ที่ไม่ถูกเอ็กซ์ซิคิว	Unreachable Task
ทาสก์บิสิเนสรูล	Business rule task
ทาสก์ยูเซอร์	User task
ทาสก์สคริป	Script task
ทาสก์ส่ง	Send task
ทิศทางเกตเวย์	Gateway direction
นิยามไอเท็ม	Item Definition
นิยามไอเท็ม	Item definitions
บีพีเอ็มเอ็น	Business Process Model and Notation : BPMN
บีพีเอ็มไอ	Business Process Management Initiative: BPMI
ปริภูมิสถานะ	State space
ผู้เข้าร่วม	Participants
พฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์	Undesirable properties
พอร์ทนำเข้า	Input port
พอร์ทนำออก	Output port
พาเซอร์เอ็กซ์เอ็มแอล	XML parser
พูล	Pools
ภาษาโปรแกรม	Programing language
ภาษาธรรมชาติ	Natural languages
ภาษารูปนัย	Formal languages
มัลติไบล์ดิงอิลีเมนต์	Multi binding elements
มาร์คกิง	Marking
มาร์คกิงตาย	Dead markings
ยูเอ็มแอล	Unified Modeling Language: UML

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ระบบกระจาย	Distributed system
ระบบการทำงานแบบพ้องกัน	Concurrent system
รายละเอียดของสถานะ	State information
ลักษณะของลูป	Loop characteristics
วากยสัมพันธ์	Syntax
วิธีการค้นหาแนวลึก	Depth-first search
วิธีสวิปไลน์	Sweep-line method
สกัด	Extract
สถานะเป้าหมาย	Goal State
สถานะชั่วคราว	Transient states
สับเน็ต	Sub-net
สับเน็ตที่อยู่ติดกัน	Neighboring sub-nets
หลักการแบ่งกระบวนการ	Process decomposition
อรรถศาสตร์	Semantics
อ็อบเจกต์เชื่อมต่อ	Connecting Objects
อ็อบเจกต์โฟลว์	Flow Objects
อ็อบเจกต์ข้อมูลนำเข้า	Data Input objects
อ็อบเจกต์ข้อมูลนำออก	Data output objects
ออร์โตมาตา	Automata
อะตอมมิค	Atomic
อาร์ก	Arc
อาร์กนำเข้า	Input arcs
อาร์กนำออก	Output arcs
อาร์ทิแฟคท์	Artifacts
อินสคริปชัน	Inscription
อีเวนท์เริ่มต้น	Start event
อีเวนท์สิ้นสุด	End event
อีเวนท์อินเทอร์มีเดียท	Intermediate event

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Group, O.M., *Model, Business Process Notation (BPMN) version 2.0*, O. specification, Editor. 2011: Massachusetts. p. 508.
2. Katoen, C.B.a.J.-P., *Principles of Model Checking*. 2008: MIT Press.
3. Clarke, E.M., O. Grumberg, and D. Peled, *Model checking*. 1999: MIT press.
4. Edmund M. Clarke, W.K., Miloš Nováček, Paolo Zuliani, *Model Checking and the State Explosion Problem.* Lecture Notes in Computer Science, 2012.
5. Nikola Tr˘cka, W.v.d.A., and Natalia Sidorova, *Analyzing Control-Flow and Data-Flow in Workflow Processes in a Unified Way*. 2008, Technische Universiteit Eindhove: Eindhoven.
6. Meyer, A., et al., *Modeling and enacting complex data dependencies in business processes*, in *Business process management*. 2013, Springer. p. 171-186.
7. Huber, P., K. Jensen, and R.M. Shapiro. *Hierarchies in coloured Petri nets*. in *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*. 1989. Springer.
8. Yang, Y., Q. Tan, and Y. Xiao. *Verifying web services composition based on hierarchical colored petri nets*. in *Proceedings of the first international workshop on Interoperability of heterogeneous information systems*. 2005. ACM.
9. Johnson, K., R. Calinescu, and S. Kikuchi. *An incremental verification framework for component-based software systems*. in *Proceedings of the 16th International ACM Sigsoft symposium on Component-based software engineering*. 2013. ACM.
10. Ahmed Kheldouna, K.B.a.M.I., *Formal verification of complex business processes based on high-level Petri nets.* In Info. Sci. j., 2017. **385–386**: p. 39-54.
11. Ajay Krishna, P.P.a.G.S. *VBPMN: Automated Verification of BPMN Processes (Tool Paper)*. in *International Conference on Integrated Formal Methods*. 2017. Springer, Cham.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

12. Ivo Raedts , M.P., Yaroslav S. Usenko , Jan Martijn Van Der Werf , Jan Friso Groote , Lou Somers, *Transformation of BPMN models for behaviour analysis*, in *MSVVEIS-2007, In conjunction with ICEIS 2007*. 2007: Portugal. p. 126–137.
13. Mendoza Morales, L.E., *Business Process Verification: The Application of Model Checking and Timed Automata.* CLEI Electron. J., 2014. **17**: p. 3.
14. Remco M. Dijkman, M.D.a.C.O., *Formal Semantics and Analysis of BPMN Process Models using Petri Nets.* Tech. Rep, Queensland Uni.of Tech., 2007.
15. Sun, W., *Design and Implementation of a BPMN to PROMELA Translator*, in *School of Computing Science*. 2012, Newcastle University.
16. Jensen, K., L.M. Kristensen, and T. Mailund, *The sweep-line state space exploration method.* Theoretical Computer Science, 2012. **429**: p. 169-179.
17. Kristensen, L.M., *State Space Methods for Coloured Petri Nets*, in *Department of Computer Science*. 2000, University of Aarhus: Denmark.
18. Dechsupa, C., W. Vatanawood, and A. Thongtak, *Hierarchical Verification for the BPMN Design Model Using State Space Analysis.* IEEE Access, 2018.
19. Dechsupa, C., W. Vatanawood, and A. Thongtak, *Transformation of the BPMN Design Model into a Colored Petri Net Using the Partitioning Approach.* IEEE Access, 2018. **6**: p. 38421 - 38436.
20. Dechsupa, C., W. Vatanawood, and A. Thongtak. *Formal Verification of Web Service Orchestration Using Colored Petri Net*. in *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists* 2016. Hongkong: International Association of Engineers (IAENG).
21. Group, R.S.a.t.O.S.S., *Model driven architecture*, in *OMG white paper*. 2000.
22. Group, O.M., *OMG Unified Modeling Language TM (OMG UML) Version 2.5*. 2015.
23. Group, J.S. *Retail solutions*. 2018 [cited 2018 15 April]; Available from: https://jda.com/.
24. Aalst, W.M.P.v.d., *Workflow Verification: Finding Control-Flow Errors Using Petri-Net-Based Techniques.* Business Process Management, 2000: p. 161-183.
25. Groefsema, H. and D. Bucur. *A survey of formal business process verification: From soundness to variability*. in *International Symposium on Business Modeling and Software Design*. 2013.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

26. Van Der Aalst, W.M., et al., *Soundness of workflow nets: classification, decidability, and analysis.* Formal Aspects of Computing, 2011. **23**(3): p. 333-363.
27. Eclipse, *Bpmn2 modeler*. 2017, Eclipse.
28. Bérard, B., et al., *Systems and software verification: model-checking techniques and tools*. 2013: Springer Science & Business Media.
29. Katoen, J.-P., *Concepts, algorithms, and tools for model checking*. 1999: IMMD Erlangen.
30. Fisher, M., *An introduction to practical formal methods using temporal logic*. 2011: John Wiley & Sons.
31. Jong, P.T.M.D.R.R.M.A.T.F.H.d., *Temporal logic patterns for querying dynamic models of cellular interaction networks.* Bioinformatics, 2008. **24**(16).
32. Mazurkiewicz, A. *Trace theory*. in *Advanced course on Petri nets*. 1986. Springer.
33. Jensen, K., *An Introduction to the Theoretical Aspects of Coloured Petri Nets Petri net*, in *the book series Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*. 2005. p. 230-272.
34. Kurt Jensen, L.M.K., *Coloured Petri Nets. Modelling and Validation of Concurrent Systems*. 2009, University of Aarhus.
35. Chun Ou-Yang and , Y.D.L., *BPMN-based business process model feasibility analysis: a petri net approach.* IJ.of Production Research, 2008. **46**(14): p. 3763-3781.
36. Ibrahim, M.M., *Formal Semantics of BPMN Process Models Using CPN.* IREIT. J, 2017. **5**(3).
37. Mohamed Ramadan, H.G.E.a.R.H., *BPMN Formalisation using Coloured Petri Nets.* GSTF-DL. J.
38. Anass Rachdi, A.E.-N., Mohamed Dahchour, *Liveness and Reachability Analysis of BPMN Process Models.* J. of Com. and Info. Tech., 2016. **24**(2): p. 195–207.
39. Silvia von Stackelberg, S.P., Jutta Mülle, Klemens Böhm, *Detecting Data-Flow Errors in BPMN 2.0.* OJIS, 2014. **1**(2): p. 1-19.
40. Lohmann, A.A.D., *Diagnosing and Repairing Data Anomalies in Process Models.* LNBIP, 2010. **43**: p. 5-16.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

41. Sihem Malleka, N.D., Vincent Chapurlata and Bruno Vallespirb, *Enabling model checking for collaborative process analysis: from BPMN to 'Network of Timed Automata'.* Enterprise Information Systems, 2015. **9**(3): p. 279–299.
42. Riad Boussetoua, H.B., Allaoua Chaoui, Khalfaoui Khaled and Elhillali Kerkouche, *A Automatic Approach to Transform BPMN Models to Pi-Calculus.* AICCSA, 2015.
43. Matthias Gudemann, P.P., Gwen Salaun, and Lina Ye *VerChor: A Framework for the Design and Verification of Choreographies.* IEEE TSC 2016. **9**(4): p. 647-660.
44. *VerChor Framework*. Available from: https://pascalpoizat.github.io/verchor-web/.
45. G. D´ıaz, M.E.C., J. J. Pardo, V. Valero and F. Cuartero, *Model Checking Techniques applied to the design of Web Services.* CLEI Electronic Journal, 2007. **10**: p. 2-14.
46. P. Zhang, B.L., H. Muccini, Y. Zhou and M. Sun. *Data-Enriched Modeling and Verification of WS-CDL Based on UML Models*. in *IEEE International Conference on Web Services*. 2008.
47. Geguang Pu, J.S., Zheng Wang, Lu Jin, Jing Liu, and Jifeng He. *The Validation and Verification of WSCDL*. in *Asia-Pacific Software Engineering Conference*. 2007.
48. Gero Decker, J.M.Z.a.M.D., *Pattern-based Evaluation of Let's Danc*. 2008.
49. E. Caliz, K.U., A. J. Sánchez-Ruíz, and S. A. Elfayoumy. *Analyzing Web Service Choreography Specifications Using Colored Petri Nets*. in *International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology*. 2011.
50. H. Foster, S.U., J. Magee and J. Kramer. *Model-Based Analysis of Obligations in Web Service Choreography*. in *IEEE International Conference on Internet & Web Applications and Services*. 2006.
51. M. S. Benabdelhafid, B.B.a.M.B. *Analyzing Behavioral Compatibility for Web Service Choreography Using Colored Petri Nets and ASK-CTL*. in *International Conference on Advances in Soft Computing*. 2014.
52. V. Valero, M.E.C., G. Díaz and H. Macià, *A Petri net approach for the design and analysis of Web Services Choreographies.* The Journal of Logic and Algebraic Programming, 2009: p. 359-380.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

53. M. E. Cambronero, G.D., V. Valero and E. Martínez, *Validation and verification of Web services choreographies by using timed automata.* The Journal of Logic and Algebraic Programming, 2011. **80**: p. 25-49.

54. S. Rebai, H.H.K., M. Karaa, S. E. Pomares and A. H. Kacem, *CDLVT: A Formal Verification Tool of NonFunctional Properties for WS-CDL specification*, in *IEEE 24th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*. 2015. p. 191-196.

55. X. Deng1, Z.L., W. Cheng1, R. Xiao , L. Li and L. Fang. *Modeling and Verifying Web Service Composition Using Colored Petri Nets Based On WSCI*. in *Industrial Engineering and Engineering Management, 2007 IEEE International Conference* 2008.

56. Ouyang, C., et al., *Formal semantics and analysis of control flow in WS-BPEL.* Science of Computer Programming. **67**: p. 162-198.

57. W.M.P. van der Aalst, M.D., C. Ouyang, A. Rozinat, and H.M.W. Verbeek. *Choreography Conformance Checking: An Approach based on BPEL and Petri Nets*. 2006. Eindhoven : BPM Center org.

58. Benatallah, R.H.B., *A Petri Net-based Model for Web Service Composition*. 2003, Conferences in Research and Practice in Information Technology.

59. Z. Zhang, F.H.a.H.X., *A colored Petri Net-based Model for Web Service Composition.* The journal of Shanghai University, 2008. **12**(4): p. 323–329.

60. NAKAJIMA, S., *Model-Checking Behavioral Specification of BPEL Applications.* Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2006: p. 89–105.

61. Arbab, N.K.a.F., *Formal Design and Verification of Long-Running Transactions with Extensible Coordination Tools.* IEEE transaction on services computing, 2013. **6**: p. 168-200.

62. D. Nagamouttou, I.E., M. Krishnan and P. Narasingam, *A verification strategy for web services composition using enhanced stacked automata model.* SpringerPlus a SpringerOpen Journa, 2015.

63. H. H. Kacem, W.S.a.A.H.K. *A formal approach for the validation of web service orchestrations*. in *Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WET ICE)*. 2012.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

64. Chiola, G., et al., *On well-formed coloured nets and their symbolic reachability graph*, in *High-level Petri nets*. 1991, Springer. p. 373-396.

65. Jensen, K., *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.* DAIMI Report Series, 2008. **37**(588).

66. Ward Jaradat, A.D., Adam Barker, *Workflow Partitioning and Deployment on the Cloud using Orchestra.* 2014 IEEE/ACM 7th UCC 2014, 2014.

67. Søren Christensen, L.M.K.a.T.M., *A Sweep-Line Method for State Space Exploration.* Lecture Notes in CS., 2001: p. 450–464.

68. Tarasyuk, I.V. *Petri net equivalences for design of concurrent systems*. in *Proceedings of 5th Workshop on Concurrency*. 1996.

69. Bandyopadhyay, S., *Path based equivalence checking of Petri net representation of programs for translation validation*. 2016, IIT, Kharagpur.

70. Cheval, V., H. Comon-Lundh, and S. Delaune. *Trace equivalence decision: Negative tests and non-determinism*. in *Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security*. 2011. ACM.

71 Oracle, Sun's Java Implementation, Available from: https://docs.oracle.com/javaee/5/tutorial/doc/bnbfi.html

72 Arakhne.org, NetEditor: Java Library to Edit Diagrams, Available from: http://www.arakhne.org/neteditor/

73 Microsoft, Microsoft SQL Server Technical Overview, Available from: https://www.microsoft.com/en-us/sql-server

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชานนท์ เดชสุภา
วัน เดือน ปี เกิด	2 พฤษภาคม 2528
สถานที่เกิด	ปราจีนบุรี
วุฒิการศึกษา	วท.บ. สาขาวิชาระบบสารสนเทศคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อปี พ.ศ. 2550 วท.ม. สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาในหลักสูตร วศ.ด. สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2558
ที่อยู่ปัจจุบัน	614/435 ถนน อโศก-ดินแดง แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพ 10400
รางวัลที่ได้รับ	1. ทุนสนับสนุนการศึกษาหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต 100 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2. ทุนสนับสนุนงานวิจัย ทุน 90 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 37 ปีการศึกษา 2560 3. ทุนสนับสนุนนิสิตระดับปริญญาเอกไปทำวิจัยในต่างประเทศตามโครงการบันทึกความเข้าใจระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและ National Institute of Informatics ประเทศญี่ปุ่น เป็นระยะเวลา 6 เดือน ระหว่างวันที่ 20 เมษายน 2560 ถึงวันที่ 13 ตุลาคม 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University