การสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์

น.ส.พิมพร บุญอินทร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Formal Modeling of Multi-Server Queuing Network using Stochastic Petri Nets

Miss Pimporn Boon-in

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Software Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์
โดย	น.ส.พิมพร บุญอินทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมซอฟต์แวร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล)

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

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.เดชานุชิต กตัญญูทวีทิพย์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พิมพร บุญอินทร์ : การสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์. (Formal Modeling of Multi-Server Queuing Network using Stochastic Petri Nets) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ

ระบบเครือข่ายแถวคอยเชิงรูปนัยครอบคลุมแบบจำลองระดับสูง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของความพร้อมใช้งานของลูกค้าที่เข้ามารับบริการ และทรัพยากรที่ให้บริการ ผู้ออกแบบกระบวนการทางธุรกิจสามารถปรับการสร้างเครือข่ายแถวคอยเพื่อรับมือกับข้อจำกัดด้านเวลาในลักษณะแบบสุ่ม ผู้วิจัยตั้งเป้าหมายที่จะจัดทำสโตแคสติกแถวคอยเชิงรูปนัยแบบหลายหน่วยบริการในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อรองรับระบบเครือข่ายแถวคอยที่ซับซ้อนแบบหลายหน่วยบริการ พฤติกรรมการให้บริการแบบสุ่มจะถูกพิจารณาและแปลงเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ชุดของกฎการจับคู่ถูกกำหนดเพื่อแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ อีกทั้งผู้วิจัยได้สาธิตการสร้างกราฟมาร์คอฟพร้อมการแจกแจงความน่าจะเป็นของเครือข่ายแถวคอย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิศวกรรมซอฟต์แวร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2562 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6071020921 : MAJOR SOFTWARE ENGINEERING

KEYWORD: Formal Model, Multi-Server Queuing Network, Stochastic Petri Nets

Pimporn Boon-in : Formal Modeling of Multi-Server Queuing Network using Stochastic Petri Nets. Advisor: Assoc. Prof. WIWAT VATANAWOOD, Ph.D.

Queuing network systems formally provide an extensive high-level model to assist in analyzing performance of incoming customer availability and service resources. The business process designer could adjust the queuing network constructs to cope with the time constraints in random manners. The stochastic queues with multiple servers are formalized in this thesis and constructed into a complex multi-server queuing network system. Service time random behaviors are considered and transformed into Stochastic Petri Nets. A set of mapping rules are defined to transform a given multi-server queuing network into Stochastic Petri Nets. The construction of the isomorphic Markovian graph with the probability distribution of the queuing network would be demonstrated.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Software Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ เป็นอย่างสูงที่เมตตารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง การทำวิทยานิพนธ์ที่ดี ใส่ใจทุกรายละเอียดในการจัดทำวิทยานิพนธ์และผลงานทางวิชาการ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. พรศิริ หมื่นไชยศรี และ ดร. เดชานุชิต กตัญญูทวีทิพย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาแนะนำแนวทาง รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยอบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนถ่ายทอดประสบการณ์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ น้องณัฐปภัสร์ กวาวพิวงศ์ ที่ชักชวนมาเรียนที่สาขาวิชานี้ อีกทั้งยังคอยแนะนำและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ รุ่นพี่เกศิณี สุมนาตย์ วรรณวิศา ภาคบัว สุพัตรา แก้วอบเชย เกตุแก้ว สงวนเผ่า และพี่ๆเพื่อนๆน้องๆ หลักสูตรวิศวกรรมซอฟต์แวร์ สำหรับกำลังใจและคำแนะนำดีๆในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รเณศ ปราบไพรี สำหรับคำแนะนำ ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือเรื่องการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณมารดาและพี่ชายทั้งสอง และขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ กัลยาณมิตรที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทั้งเรื่องงานและการศึกษาด้วยดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พิมพร บุญอินทร์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย 3

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยเกี่ยวข้อง 4

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1.1 เครือข่ายแถวคอย (Queuing Network) 4

2.1.2 เพทริเน็ตส์ (Petri Nets) 6

2.1.3 สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ (Stochastic Petri Nets) 9

2.1.4 ห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains) 12

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

2.2.1 งานวิจัย “Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic 17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Petri Nets” โดย K. Soomanat and W. Vatanawood ปี ค.ศ. 2018 [2] 17

2.2.2 งานวิจัย “MODELLING OF QUEUES BY USING OF PETRI NET 18

SIMULATOR” โดย E. Kamceva ปี ค.ศ. 2011 [13] 18

2.2.3 โปรแกรมจำลอง “Platform Independent Petri net Editor 2” 18

โดย N.J. Dingle ปี ค.ศ. 2009 [14] 18

บทที่ 3 วิธีการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ 19

3.1 นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 20

3.2 ออกแบบกฎการจับคู่ในการจับคู่ชิ้นส่วนองค์ประกอบของเครือข่ายแถวคอยแต่ละชิ้นส่วนมาเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ 22

3.3 พัฒนาโปรแกรมในการอ่านข้อมูลนำเข้าเอกซ์เอ็มแอล 28

3.4 สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ 29

3.5 ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE 30

3.6 สร้างริชอะบิลิตีเซต (Reachability Set) และ ริชอะบิลิตีกราฟ (Reachability Graph) ของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE 30

3.7 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็น 31

3.8 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ 34

บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือ 35

4.1 ภาพรวมการทำงานของเครื่องมือ 35

4.2 การออกแบบเชิงฟังก์ชันการทำงานของเครื่องมือ 36

4.3 การออกแบบเชิงโครงสร้าง 38

4.4 การออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้งานระบบ 42

4.5 เครื่องมือที่ใช้พัฒนาระบบ 44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5 การทดสอบเครื่องมือการสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ 45
5.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ 45
5.2 แนวทางในการทดสอบเครื่องมือ 46
5.3 การทดสอบเครื่องมือและสรุปผลการทดสอบเครื่องมือ 46
5.3.1 การทดสอบโดยใช้รูปแบบแถวคอยทั่วไป ได้แก่ 46
5.3.2 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 59
5.3.3 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร 61
5.3.4 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 63
5.3.5 สรุปผลการทดสอบการทดสอบเครื่องมือ 64
5.4 สร้างริชอะบิลิตีเซต และ ริชอะบิลิตีกราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE 65
5.5 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นจากข้อ 5.4 65
5.6 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟจาก ข้อ 5.4 และ ข้อ 5.5 65
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 70
6.1 สรุปผลการวิจัย 70
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย 70
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานต่อ 70
บรรณานุกรม 2
ภาคผนวก 74
1) ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีกดปุ่ม SUBMIT โดยไม่เลือกแฟ้มข้อมูล 74
2) ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีเลือกแฟ้มข้อมูลที่ไม่ใช่ XML 74
3) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 76
ไม่มีข้อมูลในส่วนของ services 76
5) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 77
ไม่มีข้อมูลในส่วนของ waitingLines 77
6) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 79
7) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร 92
8) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 107
ประวัติผู้เขียน 112

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้า [4] 4

ตารางที่ 2.2 คำอธิบายสัญลักษณ์ของ Kendall [4] 5

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์กราฟิกของเพทริเน็ตส์ [5] 7

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์กราฟิกของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [5] 9

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของแถวคอยและส่วนประกอบเอกซ์เอ็มแอล 21

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Stochastic Queue Node 23

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Queuing Network 25

ตารางที่ 3. 4 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Stochastic Petri Nets of Queue Node 26

ตารางที่ 3. 5 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น 32

ตารางที่ 4.1 แสดงยูสเคสไอดีและยูสเคสทั้งหมดของเครื่องมือที่พัฒนา 36

ตารางที่ 4. 2 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-01 37

ตารางที่ 4. 3 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-02 37

ตารางที่ 4. 4 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-03 38

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น 66

ตารางที่ 5. 2 แสดงตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทางของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแถวคอย [3] 4

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอย [3] 6

รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง เพทริเน็ตส์ที่แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมแบบขนานที่กำหนดไว้ [3] 7

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างก่อนการยิงทรานสิชัน [6] 8

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างหลังการยิงทรานสิชัน [6] 8

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างทั่วไปของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [7] 10

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการยิงทรานสิชันที่ T2 [7] 11

รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการยิงทรานสิชันที่ T3 [7] 11

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการสุ่มเดิน (Random Walk) [10] 13

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรม [11] 14

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างความน่าจะเป็นในรูปแบบเมทริกซ์ [11] 15

รูปที่ 2.12 ทรานสิชันเมทริกซ์ [10] 15

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ 16

รูปที่ 2.14 กระบวนการ Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic Petri Nets [2] 17

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมจำลอง PIPE 18

รูปที่ 3.1 ภาพรวมของวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ 19

รูปที่ 3.2 แผนภาพเค้าโครงร่างเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 20

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 22

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ 23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอย 24

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของ *SPNQN* สำหรับ Queue Node ที่มี 2 หน่วยบริการ 27

รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง Queuing Network ของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 27

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 28

รูปที่ 3.9 การออกแบบ flow การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนา 29

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 29

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์โดยใช้โปรแกรม PIPE 30

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ 31

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ 31

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ 34

รูปที่ 4.1 ภาพรวมการทำงานของเครื่องมือ 35

รูปที่ 4. 2 แผนภาพยูสเคสของเครื่องมือที่พัฒนา 36

รูปที่ 4.3 แผนภาพแพ็กเกจของเครื่องมือที่พัฒนา 38

รูปที่ 4.4 แพ็กเกจ controller ประกอบด้วยคลาส IndexController 39

รูปที่ 4. 5 คลาสในแพ็กเกจ config 39

รูปที่ 4.6 คลาสในแพ็กเกจ validators 39

รูปที่ 4.7 แพ็กเกจ model ประกอบแพ็จเกจ input และแพ็จเกจ output 40

รูปที่ 4.8 คลาสในแพ็กเกจ input 40

รูปที่ 4.9 คลาสในแพ็กเกจ output 41

รูปที่ 4.10 หน้าจอหลัก หน้าจอนำเข้าแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอล 42

รูปที่ 4.11 หน้าจอในการค้นหาแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอล 43

รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.1 แถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ 46
รูปที่ 5.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของการแปลงแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ 47
รูปที่ 5.3 ข้อมูลนำเข้าในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ .. 47
รูปที่ 5. 4 หน้าจอนำเข้าข้อมูลแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการในรูปเอกสาร์เอกซ์เอ็มแอล..... 48
รูปที่ 5.5 หน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 48
รูปที่ 5.6 แฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล..... 51
รูปที่ 5. 7 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE..... 51
รูปที่ 5.8 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว 51
รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว..... 52
รูปที่ 5.10 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว..... 52
รูปที่ 5.11 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ 53
รูปที่ 5.12 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ 53
รูปที่ 5.13 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ..... 54
รูปที่ 5.14 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว..... 54
รูปที่ 5.15 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว..... 55
รูปที่ 5.16 ผลลัพธ์ที่ได้จริงกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว 56
รูปที่ 5.17 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ..... 56
รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ 58
รูปที่ 5.19 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ..... 58
รูปที่ 5.20 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 59
รูปที่ 5.21 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 60
รูปที่ 5.22 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 60
รูปที่ 5.23 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร 61
รูปที่ 5.24 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร..... 62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.25 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร 63

รูปที่ 5.26 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 63

รูปที่ 5.27 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 64

รูปที่ 5.28 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 64

รูปที่ 5.29 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ 65

รูปที่ 5.30 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็น โดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม 65

รูปที่ 5.31 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ 66

รูปที่ ผ- 1 ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีกดปุ่ม SUBMIT โดยไม่เลือกแฟ้มข้อมูล 74

รูปที่ ผ- 2 ตัวอย่าง กรณีเลือกแฟ้มข้อมูลที่ไม่ใช่ XML 74

รูปที่ ผ- 3 ตัวอย่าง ระบบแสดงข้อความแจ้งเตือน “Please select a xml to upload” 74

รูปที่ ผ- 4 ตัวอย่าง กรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 75

รูปที่ ผ- 5 ตัวอย่างระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 76

รูปที่ ผ- 6 ตัวอย่างกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 76

รูปที่ ผ- 7 ตัวอย่างระบบแสดงข้อความแจ้งเตือนกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ services 77

รูปที่ ผ- 8 ตัวอย่างกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ 77

รูปที่ ผ- 9 ตัวอย่างระบบแสดงข้อความแจ้งเตือนกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ waitingLines 78

รูปที่ ผ- 10 ตัวอย่างผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา 92

รูปที่ ผ- 11 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร 107

รูปที่ ผ- 12 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส 111

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเข้าแถวคอยเป็นสิ่งที่เราพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น การเข้าแถวคอยเพื่อรอรถไฟฟ้า การเข้าแถวคอยเพื่อสั่งอาหาร หรือเพื่อจ่ายเงินตามร้านสะดวกซื้อ การเข้าแถวคอยเพื่อรอซื้อตั๋วภาพยนตร์ การเข้าแถวคอยเพื่อรอขึ้นเครื่องที่สนามบิน การเข้าแถวคอยเพื่อรอเข้าชมสถานที่ต่างๆ การเข้าแถวคอยเพื่อรอรับการรักษาที่โรงพยาบาล เป็นต้น

แถวคอยที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีสาเหตุมาจากหลายองค์ประกอบ เช่น จำนวนของผู้มารับบริการไม่สมดุลกับจำนวนผู้ให้บริการ หรือ รูปแบบแถวคอย หรือ เกณฑ์การให้บริการ เป็นต้น ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของผู้มารับบริการ ที่อาจนำไปสู่ความเสียหายทางด้านการสูญเสียลูกค้าได้ ในทางกลับกันถ้าจำนวนผู้ให้บริการมีมากเกินไป ทางด้านผู้ประกอบการให้บริการจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากเกินความจำเป็น ซึ่งเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

การสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของแถวคอยได้รับการยอมรับว่าต้องใช้กระบวนการสโตแคสติก [1] อธิบายการมาถึงของลูกค้า และตัวแปรสุ่มอธิบายถึงเวลาการให้บริการลูกค้า มีงานวิจัย [2] บางส่วนได้สร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของแถวคอยทั่วไปด้วยสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ซึ่งเป็นแบบจำลอง ที่สามารถจำลองการเข้าแถวคอยของผู้มารับบริการ ผู้ให้บริการ และลักษณะของแถวคอยได้ สโตแคสติกเพทริเน็ตส์นั้นสามารถวิเคราะห์การเข้าแถวคอยเชิงปริมาณได้ อีกทั้งยังช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของการเข้าแถวคอยที่ได้จำลองเอาไว้ได้ แต่ถ้าระบบประกอบด้วยเครือข่ายแถวคอยที่ซับซ้อนแล้ว งานวิจัยนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่คือ สามารถรองรับหน่วยให้บริการเพียงหนึ่งหน่วยบริการเท่านั้น ซึ่งในชีวิตประจำวันเราอาจจะพบเจอระบบแถวคอยที่มีความซับซ้อนที่มีหลายหน่วยบริการ เช่น ขั้นตอนการเข้ารับบริการของระบบโรงพยาบาลซึ่งมีหลายขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนอาจจะมีเจ้าหน้าที่ให้รับบริการมากกว่าหนึ่งคน เช่น ในส่วนของการคัดกรองผู้ป่วยก่อนพบแพทย์ ซึ่งเจ้าหน้าที่เวชระเบียนที่ให้รับบริการอาจจะมีมากกว่าหนึ่งคน หรือหลังพบแพทย์เสร็จแล้ว ผู้ป่วยต้องไปติดต่อชำระค่าบริการที่การเงินและรับยา ซึ่งอาจจะมีเจ้าหน้าที่ให้บริการมากกว่าหนึ่งคน เช่นเดียวกัน

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการสร้างแบบจำลองเครือข่ายแถวคอยเชิงรูปนัยโดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ที่รองรับหลายหน่วยบริการ เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการเข้าแถวคอยที่ได้จำลองเอาไว้ได้ง่ายขึ้น ซึ่งผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยที่สามารถรองรับหน่วยให้บริการที่มีหลายหน่วยบริการ โดยการหาค่าความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้มารับบริการที่หน่วยให้บริการจะสามารถแล้วเสร็จ ภายในระยะเวลาที่กำหนดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์

1) ออกแบบกฎการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
2) พัฒนาเครื่องมือการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ออกแบบกฎการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
2) เครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการจะมีคุณสมบัติ ต่อไปนี้
   - เกณฑ์ในการให้บริการลูกค้าเป็นแบบ Service in random order เท่านั้น
   - รูปแบบแถวคอยเป็นแบบ *M/M/m/SIRO*
3) กำหนดข้อมูลนำเข้าของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการให้อยู่ในรูปแบบของภาษาเอกซ์เอ็มแอล
4) กำหนดแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล
5) พัฒนาเครื่องมือสำหรับการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ซึ่งมีความสามารถดังนี้
   - นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 1 รูปได้
   - สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล จากการนำเข้ามา แล้วใช้กฎการจับคู่ที่ได้ออกแบบไว้ได้
6) ทดสอบความถูกต้องของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ผลลัพธ์โดยใช้โปรแกรมจำลอง
7) ใช้กรณีศึกษาระบบงานแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ อย่างน้อย 3 ระบบงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
   - ศึกษาระบบแถวคอย
   - ศึกษารูปแบบสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
2) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3) ศึกษาเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง
4) กำหนดแนวคิดและขอบเขต
5) ออกแบบกฎ และเครื่องมือสนับสนุน
6) พัฒนาเครื่องมือในการแปลงเครือข่ายแถวคอยไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
7) ทดสอบและปรับปรุงเครื่องมือที่ได้พัฒนา

8) ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ และประเมินผลการทดสอบ
9) สรุปผลการวิจัย
10) จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอบทความทางวิชาการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) จะได้กฎการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
2) เครื่องมือการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์
3) ผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยที่สามารถรองรับหน่วยให้บริการที่มีหลายหน่วยบริการ โดยการคำนวณค่าความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้มารับบริการที่หน่วยให้บริการจะสามารถแล้วเสร็จ ภายในระยะเวลาที่กำหนดได้หรือไม่ เพื่อหาจำนวนหน่วยให้บริการหรือผู้ให้บริการที่เหมาะสมกับผู้เข้ารับบริการได้

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความวิชาการ ในหัวข้อเรื่อง " Formal Modeling of Multi-Server Queuing Network using Stochastic Petri Nets" โดย นางสาวพิมพร บุญอินทร์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ ในงานประชุมวิชาการ 2019 The 3rd International Conference on Software and e-Business (ICSEB 2019) จัดโดย Faculty of Science and Engineering, Waseda University เมื่อวันที่ 9-11 ธันวาคม 2562 ณ กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

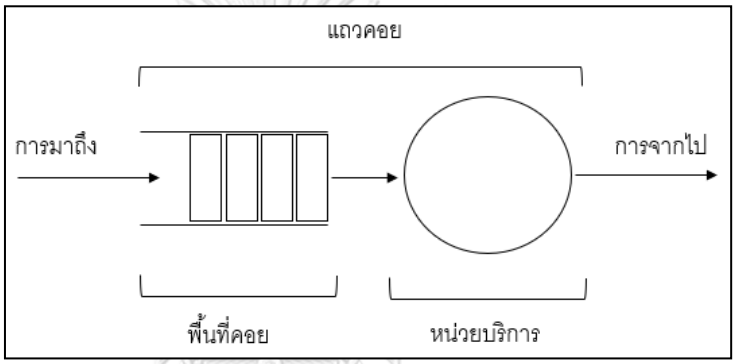
บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยเกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 เครือข่ายแถวคอย (Queuing Network)

เครือข่ายแถวคอย [3] แสดงให้เห็นถึงระบบโดยชุดของแถวคอยที่เชื่อมต่อระหว่างกัน แต่ละแถวคอยประกอบด้วยพื้นที่คอย และหน่วยบริการที่ประมวลผลจากพื้นที่คอย ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแถวคอย [3]

แถวคอยแสดงสถานีบริการที่ประมวลผลจาก คำขอการมาถึงของผู้รับบริการ เกณฑ์ในการให้บริการของแถวคอยจะกำหนดลำดับการประมวลผลคำขอ ตัวอย่างสำหรับเกณฑ์ในการให้บริการ มีดังตารางที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้า [4]

เกณฑ์ในการให้บริการ	คำอธิบาย
First-Come-First-Served (*FCFS*)	มาก่อนได้รับบริการก่อน
Last-Come-First-Served (*LCFS*)	มาหลังได้รับบริการก่อน
Priority Scheduling (*PRIO*)	คำขอจะดำเนินการตามลำดับความสำคัญ
Service-in-random-order (*SIRO*)	คำขอการมาถึงจะได้รับการประมวลผลแบบสุ่ม

ในทฤษฎีแถวคอย คำอธิบายมาตรฐานสำหรับสถานีบริการ คือสัญลักษณ์ของ Kendall แต่เดิมนั้น ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ ส่วนเวอร์ชันทั่วไปประกอบด้วย 6 พารามิเตอร์ *A / S / m / B / K / SD* ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คำอธิบายสัญลักษณ์ของ Kendall [4]

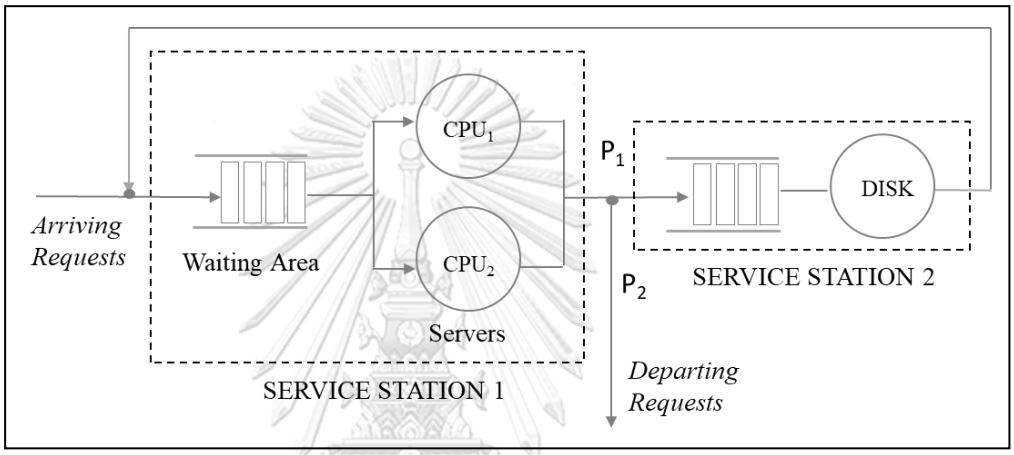
สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	การแจกแจงของเวลาการมาถึง โดยใช้ ตัวอักษร *G* สำหรับการแจกแจงแบบทั่วไป ตัวอักษร *M* สำหรับการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ตัวอักษร *D* สำหรับการแจกแจงแบบมีเวลาที่กำหนด
S	การแจกแจงเวลาให้บริการ โดยใช้ ตัวอักษร *G* สำหรับการแจกแจงแบบทั่วไป ตัวอักษร *M* สำหรับการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ตัวอักษร *D* สำหรับการแจกแจงแบบมีเวลาที่กำหนด
m	จำนวนหน่วยบริการ หากใส่ *m* ไม่ระบุจำนวน จะหมาย ถึง หลายหน่วยบริการ
B	จำนวนการร้องขอที่สามารถจัดแถวคอยได้ หากไม่ได้ระบุค่าเริ่มต้น คือ $B = \infty$
K	จำนวนสูงสุดของคำร้องขอที่สามารถมาถึงในแถวคอย หากไม่ได้ระบุ $K = \infty$
SD	เกณฑ์ในการให้บริการ ดังตารางที่ 2.1 หากไม่ได้ระบุค่า *SD = FCFS*

ตัวอย่างที่ 2.1 หากกำหนดรูปแบบเป็น *M/M*/1 จะสามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้
การแจกแจงของเวลาการมาถึง: การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
การแจกแจงเวลาให้บริการ: การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
จำนวนหน่วยบริการ: 1 หน่วยบริการ
จำนวนการร้องขอที่สามารถจัดแถวคอยได้: ไม่จำกัด
จำนวนสูงสุดของคำร้องขอที่สามารถมาถึงในแถวคอย: ไม่จำกัด
เกณฑ์ในการให้บริการ: มาก่อนได้รับบริการก่อน

ตัวอย่างที่ 2.2 หากกำหนดรูปแบบเป็น *M/M/m* จะสามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้
การแจกแจงของเวลาการมาถึง: การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
การแจกแจงเวลาให้บริการ: การแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
จำนวนหน่วยบริการ: หลายหน่วยบริการ
จำนวนการร้องขอที่สามารถจัดแถวคอยได้: ไม่จำกัด
จำนวนสูงสุดของคำร้องขอที่สามารถมาถึงในแถวคอย: ไม่จำกัด
เกณฑ์ในการให้บริการ: มาก่อนได้รับบริการก่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สามารถอธิบายการเชื่อมต่อเครือข่ายของสถานีบริการได้โดยใช้ตัวอย่าง รูปที่ 2.2 แสดงเครือข่ายที่มีสถานีบริการสองแห่งซึ่งแสดงให้เห็นถึง CPU แบบ dual-core CPU และอุปกรณ์ดิสก์ (DISK) คำขอการมาถึงที่ สถานีบริการที่ 1 แสดงถึง CPU จากนั้นคำขอจะได้รับบริการโดย 1 ในหน่วยบริการ หลังจากนั้นคำขอจะถูกย้ายด้วยความน่าจะเป็น P_1 ไปยังสถานีบริการที่ 2 แสดงถึงอุปกรณ์ดิสก์ หรือ ออกจากระบบด้วยความน่าจะเป็น P_2 จากสถานีบริการที่ 2 คำขอย้ายกลับไปที่สถานีบริการที่ 1 โดยทั่วไปวิธีที่กระบวนการร้องขอผ่านเครือข่ายถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นของการกำหนดเส้นทาง



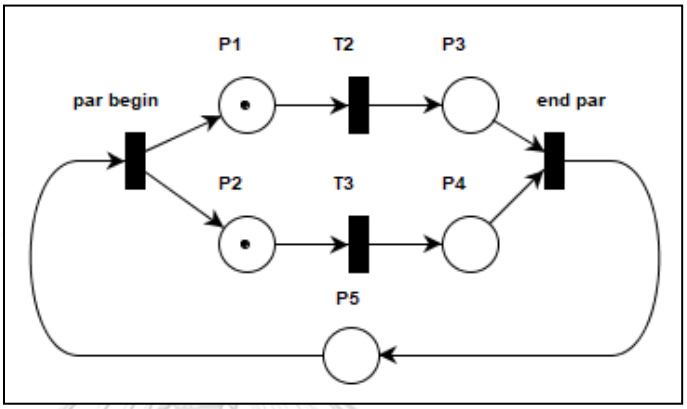
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอย [3]

2.1.2 เพทริเน็ตส์ (Petri Nets)

เพทริเน็ตส์ [3] หรือเรียกอีกอย่างว่า เพลส-ทรานสิชัน เน็ต (Place-Transition Net) เป็นแบบจำลองรูปนัยทั่วไปที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่เกิดขึ้นพร้อมกัน (Concurrent systems) ได้ Carl Adam Petri เปิดตัวรูปนัยนิยมในปี ค.ศ. 1962 โดยเริ่มต้นด้วยการนำเสนอภาพกราฟิกร่วมกับการนิยามรูปนัย จากนั้นอธิบายคุณสมบัติเชิงพฤติกรรมของเพทริเน็ตส์ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ โดยใช้การนิยามพื้นฐานสำหรับเพทริเน็ตส์ และส่วนขยายเพทริเน็ตส์

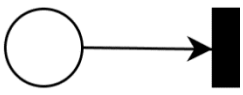
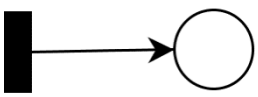
ในแง่คณิตศาสตร์ เพทริเน็ตส์เป็นกราฟที่มีสองชนิดของโหนดที่แตกต่างกันชื่อเพลส (Place) และ ทรานสิชัน (Transition) เพลสแสดงให้เห็นถึงสถานะของระบบ เพลสสามารถมีจำนวนของ โทเคน/มาร์กได้ โทเคน (Token) มีไว้สำหรับความพร้อมของทรัพยากร งานที่จะดำเนินการ การไหลของการควบคุมหรือเงื่อนไขการซิงโครไนซ์ มาร์กกิงแรกเริ่ม (Initial marking) สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการยิงของ ทรานสิชัน (Firing of transition) ทรานสิชันจะเชื่อมต่อกับอินพุตเพลส (Input place) และเอาต์พุตเพลส (Output place) ด้วย

ฟังก์ชันการส่งต่อ (Forward) และย้อนกลับ (Backward) การยิงทรานสิชันจะเปลี่ยนสถานะของระบบโดยการลบโทเคนหนึ่งอันจากแต่ละอินพุตเพลสและเพิ่มโทเคนหนึ่งอันลงในแต่ละเอาต์พุตเพลส รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างเพทริเน็ตส์ โดยเพลสจะถูกวาดเป็นวงกลม โทเคนจะแสดงเป็นจุดภาย ในเพลส ทรานสิชันจะแสดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและฟังก์ชันการเกิดเหตุการณ์ด้วยลูกศร ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง เพทริเน็ตส์ที่แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมแบบขนานที่กำหนดไว้ [3]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์กราฟิกของเพทริเน็ตส์ [5]

สัญลักษณ์กราฟิก	คำอธิบาย
	เพลส เป็นวงกลม แสดงเงื่อนไขที่ใช้กำหนดเหตุการณ์
	อาร์ก (Arc) ฟังก์ชันการเกิดเหตุการณ์แสดงด้วยลูกศร
	ทรานสิชัน เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทึบ (Filled rectangles) แสดงเหตุการณ์ และไม่กำหนดเวลา
	โทเคน เป็นจุดภายในเพลส ตัวกำหนดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
	อินพุตเพลส คือ ชุดของเส้นทางก่อนเกิดเหตุการณ์จากเพลสไปยังทรานสิชัน
	เอาต์พุตเพลส คือ ชุดของเส้นทางหลังเกิดเหตุการณ์จาก ทรานสิชันไปยังเพลส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นิยามเพทริเน็ตส์

เพทริเน็ตส์ [3] คือ 5-tuple $PN = (P, T, I, O, M_0)$ โดยที่

$P = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$ คือเซตจำกัดของเพลส

$T = \{t_1, t_2, ..., t_m\}$ คือเซตจำกัดของทรานสิชัน โดยที่ $P \cap T = \emptyset$

$I \subset P \times T$ คือ เซตของอินพุตเพลส

$O \subset T \times P$ คือ เซตของเอาต์พุตเพลส

$M_0 = (M_{01}, M_{02}, ..., M_{0m})$ คือ มาร์กกิงเริ่มต้น

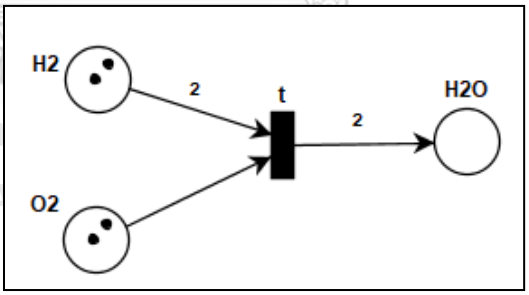
พฤติกรรมเพทริเน็ตส์ (Behavior of Petri Nets) [5]

1) เปิดใช้งานทรานสิชัน (Enabled Transitions)

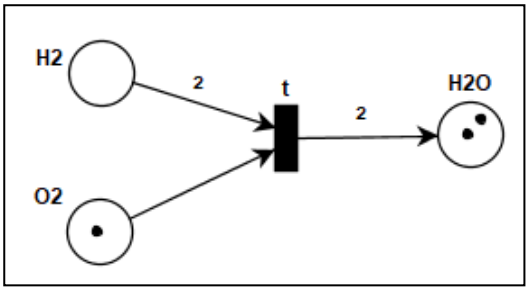
พฤติกรรมของทรานสิชันที่ถูกเปิดใช้งานเมื่อเพลสมีจำนวนโทเคนเพียงพอตามค่าน้ำหนักที่อินพุตเพลสต้องการ ซึ่งเมื่อทรานสิชันที่ถูกเปิดใช้งานแล้ว อาจจะยิงทรานสิชันหรือไม่ยิงทรานสิชันก็ได้ ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบและเงื่อนไขการยิงทรานสิชัน

2) ยิงทรานสิชัน (Firing Transitions)

พฤติกรรมของทรานสิชันจะถูกยิง เมื่อทรานสิชันถูกเปิดใช้งานแล้ว โดยโทเคนที่อยู่ในอินพุตเพลสจะถูกลบออกและโทเคนจะถูกเพิ่มที่เอาต์พุตเพลสของทรานสิชันนั้นตามค่าน้ำหนักของเอาต์พุตเพลส



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างก่อนการยิงทรานสิชัน [6]



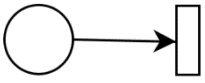
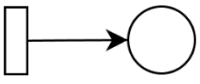
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างหลังการยิงทรานสิชัน [6]

ตัวอย่างพฤติกรรมเพทริเน็ตส์ [6] แสดงดังรูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ซึ่งรูปที่ 2.4 มี 2 โทเคนในแต่ละอินพุตเพลส และแสดงค่าน้ำหนักของ H2 เท่ากับสอง และค่าน้ำหนัก 02 เท่ากับหนึ่งซึ่งพร้อมใช้งาน และ ทรานสิชันถูกเปิดใช้งาน หลังจากการยิงทรานสิชัน t โทเคนจะเปลี่ยนดังรูปที่ 2.5 และทรานสิชันจะไม่เปิดใช้งาน

2.1.3 สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ (Stochastic Petri Nets)

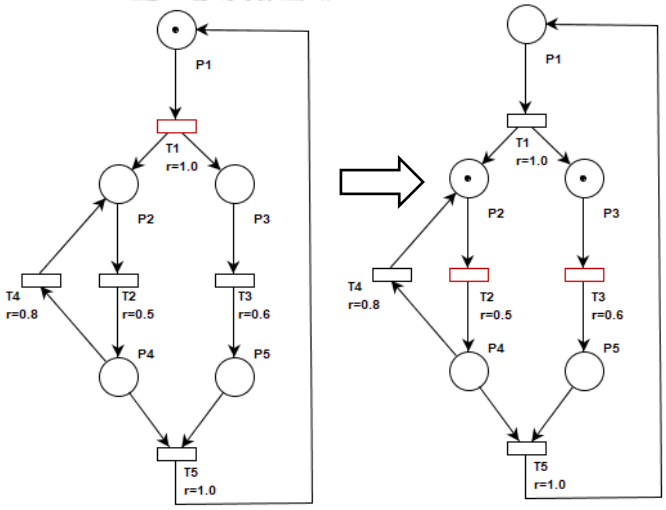
สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [3] เป็นส่วนขยายเพทริเน็ตส์ที่เปิดใช้งานการยิงหน่วงเวลา (Firing delay) สำหรับแต่ละช่วงทรานสิชัน การหน่วงเวลานี้จะระบุเวลาที่ทรานสิชันรอจนกว่าจะยิง หลังจากได้รับการเปิดใช้งานเพทริเน็ตส์ดั้งเดิมนั้นใช้ทรานสิชันที่ไม่ต้องกำหนดเวลา (Immediate transition) ในขณะที่สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ใช้ทรานสิชันที่ต้องกำหนดเวลา (Timed transition) หากทรานสิชันที่ต้องกำหนดเวลา ถูกเปิดที่เวลาเดียวกัน การยิงทรานสิชันครั้งต่อไป นั้นจะถูกเลือกตามน้ำหนักการยิง (Firing weights) หรือความน่าจะเป็นที่กำหนดให้กับทรานสิชัน องค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์กราฟิกของเพทริเน็ตส์ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์กราฟิกของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [5]

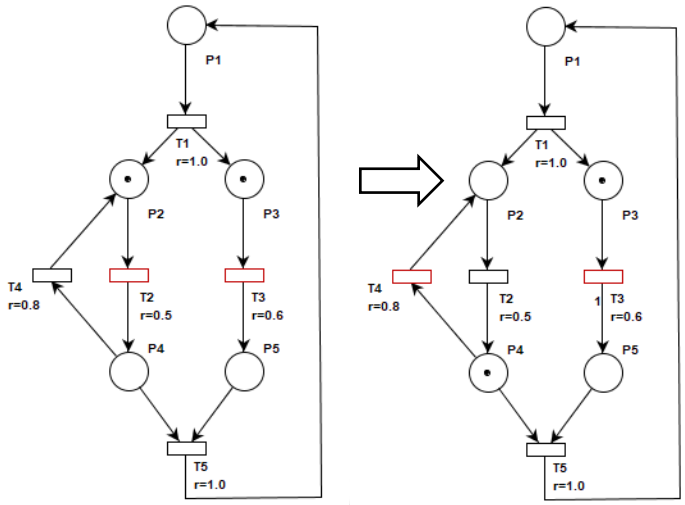
สัญลักษณ์กราฟิก	คำอธิบาย
	เพลส เป็นวงกลม แสดงเงื่อนไขที่ใช้กำหนดเหตุการณ์
	อาร์ก (Arc) ฟังก์ชันการเกิดเหตุการณ์แสดงด้วยลูกศร
	ทรานสิชัน เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าใส (Empty rectangles) แสดงเหตุการณ์ และกำหนดเวลาแบบสุ่ม
	โทเคน เป็นจุดภายในเพลส ตัวกำหนดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
	อินพุตเพลส คือ ชุดของเส้นทางก่อนเกิดเหตุการณ์จากเพลสไปยังทรานสิชัน
	เอาต์พุตเพลส คือ ชุดของเส้นทางหลังเกิดเหตุการณ์จาก ทรานสิชันไปยังเพลส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

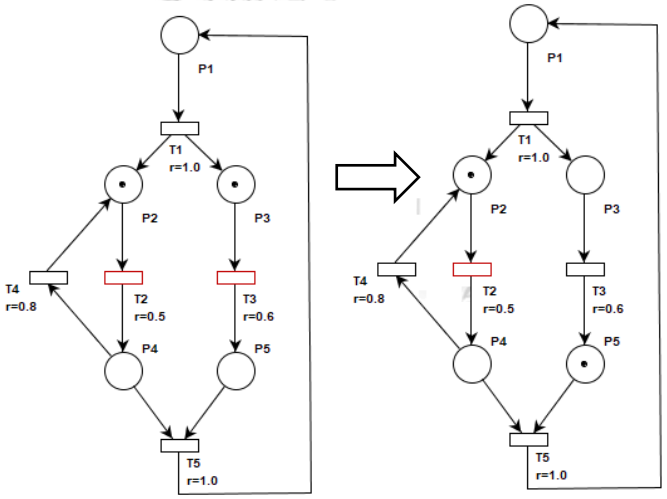
ตัวอย่างทั่วไปของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ซึ่งจากรูป ทรานสิชัน T1 ถูกเปิดใช้งานที่ M_0 = (1,0,0,0,0) เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่ง T1 ยิง มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลด้วยอัตรา $\lambda 1$ กล่าวคือ เวลาเฉลี่ยสำหรับ T1 ถึงยิง คือ $\frac{1}{\lambda}$ เมื่อ T1 มีการยิง โดยใช้กฎการยิงของ เพลส-ทรานสิชัน เน็ต เราจะได้รับมาร์กกิง M_1 = (0,1,1,0,0) ที่ M_1, T2 และ T3 เปิดใช้งานพร้อมกัน นั่นคือหนึ่งในสองทรานสิชันจะยิงหลังจากผ่านไประยะเวลาหนึ่ง หากทรานสิชัน T2 ยิงอันดับแรก สโตแคสติกเพทริเน็ตส์จะเปลี่ยน มาร์กกิง M_2 = (0,0,1,1,0) ดังรูปที่ 2.7 และถ้า T3 ยิงก่อน T2 จะได้มาร์กกิง M_3 = (0,1,0,0,1) ดังรูปที่ 2.8 มาร์กกิงถัดไปขึ้นอยู่กับทรานสิชันว่า "ชนะการแข่งขัน" ความน่าจะเป็นที่ T2 ยิงอันดับแรกนั้นถูกกำหนดโดย P [T2 fires first at M1] = $\frac{\lambda 2}{\lambda 2+\lambda 3}$ และความน่าจะเป็นที่ T3 ยิงอันดับแรก จะได้ P [T3 fires first at M1] = $\frac{\lambda 3}{\lambda 2+\lambda 3}$



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างทั่วไปของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [7]



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการยิงทรานสิชันที่ T2 [7]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการยิงทรานสิชันที่ T3 [7]

นิยามสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ [3] คือ 6-tuple $SPN = (P, T, I, 0, M_0, \Lambda)$ โดยที่

$P = (P_1, P_2, ..., P_n)$ คือ เซตของเพลส

$T = (T_1, T_2, ..., T_m)$ คือ เซตของทรานสิชัน

$I \subset P \times T$ คือ เซตของอินพุตเพลส

$0 \subset T \times P$ คือ เซตของเอาต์พุตเพลส

$M_0 = (M_{01}, M_{02}, ..., M_{0m})$ คือ มาร์กกิงเริ่มต้น

$\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n)$ คือ คืออาร์เรย์ของอัตราการยิง (Array of firing rate) ที่สัมพันธ์กับทรานสิชัน ค่าการยิงหน่วงเวลามีความสัมพันธ์กับทรานสิชันโดยตรงต้องกำหนดลงไป ก่อนที่ทรานสิชันจะมีการยิง ซึ่งค่าการยิงหน่วงเวลาเป็นตัวแปรแบบสุ่ม (Random variable)

โดยงานวิจัยจะศึกษาตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องเพราะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยที่มีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียลซึ่งเป็นแบบจำลองที่นิยมสำหรับแถวคอย ซึ่งในการคำนวณความน่าจะเป็นทางผู้วิจัยจะใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม [8] ตามรูปสมการที่ 1

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (1)$$

โดยที่

- $F(x)$ คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งภายในระยะเวลา X
- λ หรือ $\frac{1}{\mu}$ คือ อัตราการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ
- μ คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ
- x คือ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นภายในระยะเวลานั้นๆ
- e คือ เป็นค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ โดย e มีค่าประมาณ 2.71828

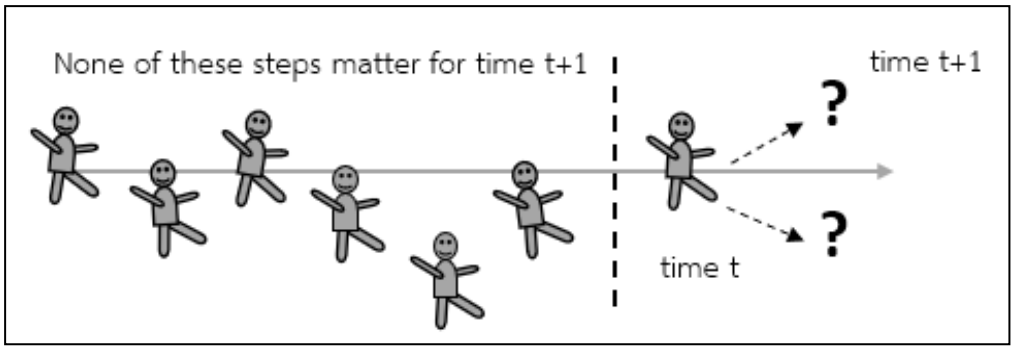
2.1.4 ห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains)

ในปี 1907 อังเดร เอ. มาร์คอฟ (Andrei Andreyevich Markov) นักคณิตศาสตร์ชาวรัสเซีย [9] เริ่มการศึกษากระบวนการโอกาส (Chance processes) ชนิดใหม่ที่สำคัญ ในกระบวนการนี้ผลลัพธ์ของการทดสอบที่กำหนดมีผลต่อผลลัพธ์ของการทดสอบถัดไปได้ กระบวนการประเภทนี้เรียกว่า ห่วงโซ่มาร์คอฟ

จากการตรวจสอบกระบวนการสโตแคสติก (Stochastic processes) [10] โดยใช้ทรานสิชันไดอะแกรม (Transition diagrams) และการวิเคราะห์ขั้นตอนแรก (First-Step Analysis) กระบวนการสามารถเขียนเป็น $\{X_0, X_1, X_2, ...\}$ โดยที่ X_t เป็น State ณ เวลา t ในทรานสิชันไดอะแกรม X_t สอดคล้องกับ กล่องที่อยู่ในขั้นตอน t

กระบวนการที่เราได้ดูผ่านทรานสิชันไดอะแกรมมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ X_{t+1} ขึ้นอยู่กับ X_t เท่านั้น มันไม่ขึ้นอยู่กับ $X_0, X_1, ..., X_{t-1}$ กระบวนการเช่นนี้เรียกว่า ห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งในห่วงโซ่มาร์คอฟ อนาคตจะขึ้นอยู่กับปัจจุบันเท่านั้น ไม่ขึ้นอยู่กับอดีต ดังรูปที่ 2.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการสุ่มเดิน (Random Walk) [10]

นิยามที่เกี่ยวข้องกับห่วงโซ่มาร์คอฟ [10]

ห่วงโซ่มาร์คอฟ คือ กระบวนการ $X_0, X_1, X_2, \ldots$

State ของห่วงโซ่มาร์คอฟ ณ เวลา t คือ ค่าของ X_t

ตัวอย่าง ถ้า $X_t = 6$ คือ กระบวนการอยู่ใน State 6 ณ เวลา t

State Space ของห่วงโซ่มาร์คอฟ S คือ ชุดของค่าที่แต่ละ X_t สามารถรับได้

ตัวอย่าง S = {1,2,3,4,5,6,7} ให้ S มีขนาด N อาจไม่มีที่สิ้นสุด (possibly infinite)

Trajectory ของห่วงโซ่มาร์คอฟ คือ เซตของค่าเฉพาะสำหรับ $X_0, X_1, X_2, \ldots$

ตัวอย่าง ถ้า $X_0 = 1$, $X_1 = 5$ และ $X_2 = 6$

ดังนั้น Trajectory ที่เวลา t = 2 เท่ากับ 1, 5, 6

โดยทั่วไปถ้าเราอ้างถึง Trajectory $s_0, s_1, s_2, s_3, \ldots$

หมายถึง $X_0 = s_0, X_1 = s_1, X_2 = s_2, X_3 = s_3, \ldots$

Trajectory เป็นเพียงความหมายของคำว่า เส้นทาง (path)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คุณสมบัติมาร์คอฟ (Markov Property) [10]

คุณสมบัติพื้นฐานของห่วงโซ่มาร์คอฟคือ เฉพาะจุดล่าสุดใน Trajectory ที่มีผลต่อสิ่งที่เกิดขึ้นต่อไป หมายความว่า X_{t+1} ขึ้นอยู่กับ X_t แต่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ $X_{t-1}, \ldots, X_1, X_0$ เรากำหนดคุณสมบัติของมาร์คอฟในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$P(X_{t+1} = s \mid X_t = s_t, X_{t-1} = s_{t-1}, \ldots, X_0 = s_0) = P(X_{t+1} = s \mid X_t = s_t),$$

สำหรับทุก t = 1, 2, 3, ... และทุก States $s_0, s_1, \ldots, s_t, s$

คำอธิบาย

$$P(X_{t+1} = s \mid X_t = s_t, X_{t-1} = s_{t-1}, \cancel{X_{t-2} = s_{t-2} \ldots, X_1 = s_1, X_0 = s_0})$$

การกระจาย ของ X_{t+1} ขึ้นอยู่กับ X_t สิ่งที่เกิดขึ้นก่อนเวลา t ไม่สำคัญ

นิยาม

ให้ $\{ X_0, X_1, X_2, \ldots \}$ เป็นลำดับของตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่อง

จากนั้น $\{ X_0, X_1, X_2, \ldots \}$ คือ ห่วงโซ่มาร์คอฟ

ถ้าเป็นไปตามคุณสมบัติของมาร์คอฟ:

$P(X_{t+1} = s \mid X_t = s_t, .., X_0 = s_0) = P(X_{t+1} = s \mid X_t = s_t)$,

สำหรับทุก t = 1 , 2, 3, ... และสำหรับทุก States $s_0, s_1, \ldots, s_t, s$

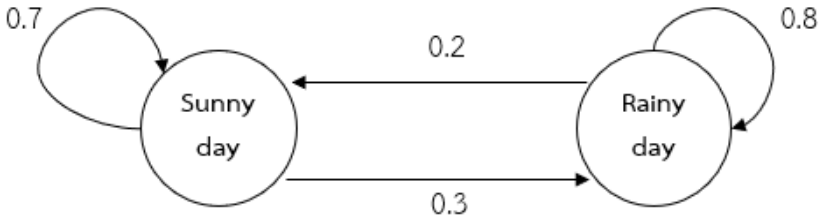
ทรานสิชันเมทริกซ์ (Transition Matrix) [10]

พวกเราได้เห็นตัวอย่างของทรานสิชันไดอะแกรมจำนวนมากที่อธิบายโซ่มาร์คอฟ ที่ถูกเรียกว่าทรานสิชันไดอะแกรมนั้น เพราะมันแสดงทรานสิชันระหว่างสถานะที่แตกต่างกัน

เราสามารถใช้สภาพอากาศเป็นตัวอย่างได้ [11] ดังรูปที่ 2.10 หากเราเลือกความน่าจะเป็นโดยการคาดการณ์เกี่ยวกับสภาพอากาศอาจเป็นดังนี้:

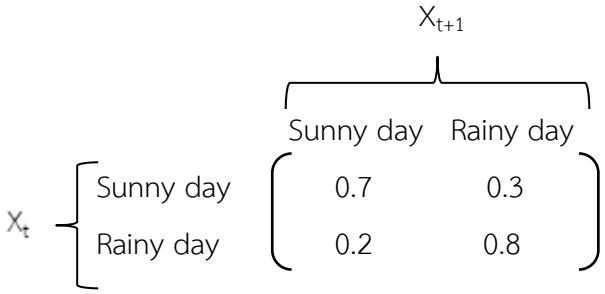
ถ้าเป็นวันที่แดดจัดมีโอกาส 30% (0.3) ที่วันถัดไปจะเป็นวันที่ฝนตก และความน่าจะเป็น 20% (0.2) ที่ถ้าเป็นวันที่ฝนตก วันหลังจากนั้นจะเป็นวันที่มีแดดจัด หากเป็นวันแดดจัด ดังนั้นจึงมีโอกาส 70% (0.7) ที่วันถัดไปจะเป็นอีกวันที่มีแดดจัด และถ้าวันนี้เป็นวันที่ฝนตกมีโอกาส 80% (0.8) ที่วันถัดไปจะเป็นวันที่ฝนตกเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



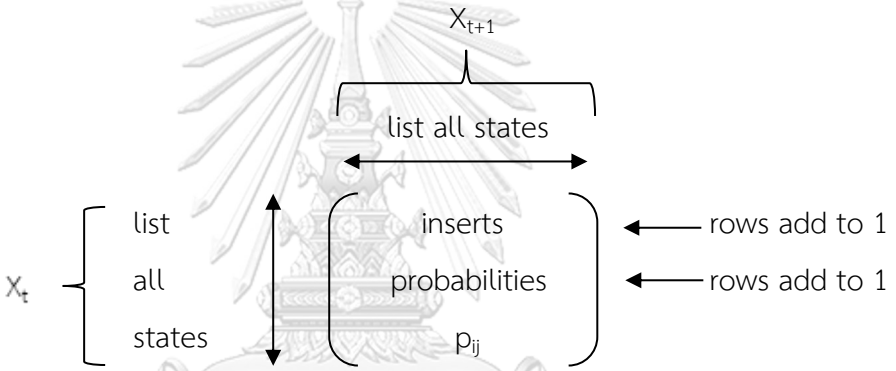
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรม [11]

จากรูปที่ 2.10 เราสามารถสรุปความน่าจะเป็นได้ในเมทริกซ์ (Matrix) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างความน่าจะเป็นในรูปแบบเมทริกซ์ [11]

เมทริกซ์ที่อธิบายห่วงโซ่มาร์คอฟเรียกว่า ทรานสิชันเมทริกซ์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์ห่วงโซ่มาร์คอฟ



รูปที่ 2.12 ทรานสิชันเมทริกซ์ [10]

จากรูปที่ 2.12 ทรานสิชันเมทริกซ์มักจะกำหนดสัญลักษณ์ **P = (p_{ij})**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ในทรานสิชันเมทริกซ์ P:</u>

แถว แสดง NOW หรือ FROM (X_t)

คอลัมน์ แสดง NEXT หรือ To (X_{t+1})

รายการ (i, j) คือความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขที่ NEXT = j,

กำหนดให้ NOW = i : ความน่าจะเป็นที่ FROM state i To State j

$$p_{ij} = P(X_{t+1} = j \mid X_t = i)$$

<u>หมายเหตุ</u>

1. ทรานสิชันเมทริกซ์ P ต้องแสดง State ที่เป็นไปได้ทั้งหมดใน State Space S
2. P เป็นเมทริกซ์จตุรัส (N × N) เนื่องจาก X_{t+1} และ X_t ทั้งคู่ใช้ค่าใน State Space S เดียวกัน
3. แถวของ P ควรรวมเป็น 1

4. คอลัมน์ของ P ไม่รวมเป็น 1

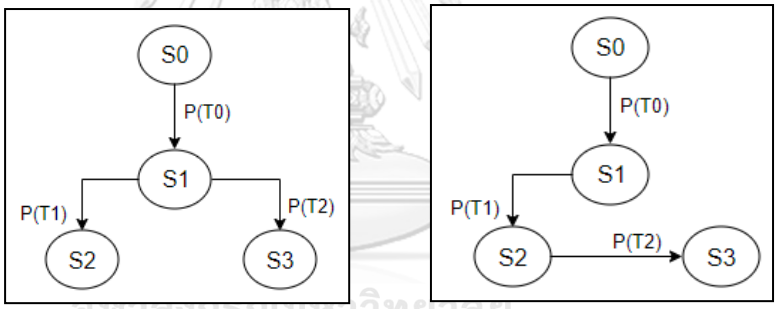
ในทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟเป็นไปได้ที่พฤติกรรมของระบบจะมีเส้นออกจาก State เดียวกันมากกว่า 1 เส้น เรียกว่า "การขัดกัน" (Conflict) [12] ซึ่งถ้าหากเกิดเหตุการณ์การขัดกันเกิดขึ้น ในการคำนวณความน่าจะเป็นฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจะต้องถูกคำนวณโดยใช้สัดส่วน ดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

$$P(T1) = \frac{a1}{a1+a2} \quad (2)$$

$$P(T2) = \frac{a2}{a1+a2} \quad (3)$$

โดยที่

- P(T1) คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน T1 ได้มีการยิงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 2
- P(T2) คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน T2 ได้มีการยิงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 3
- $a1$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน T1 ได้มีการยิงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 1
- $a2$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน T2 ได้มีการยิงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 1



(a) กรณีมีการขัดกัน **(b)** กรณีไม่มีการขัดกัน

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ

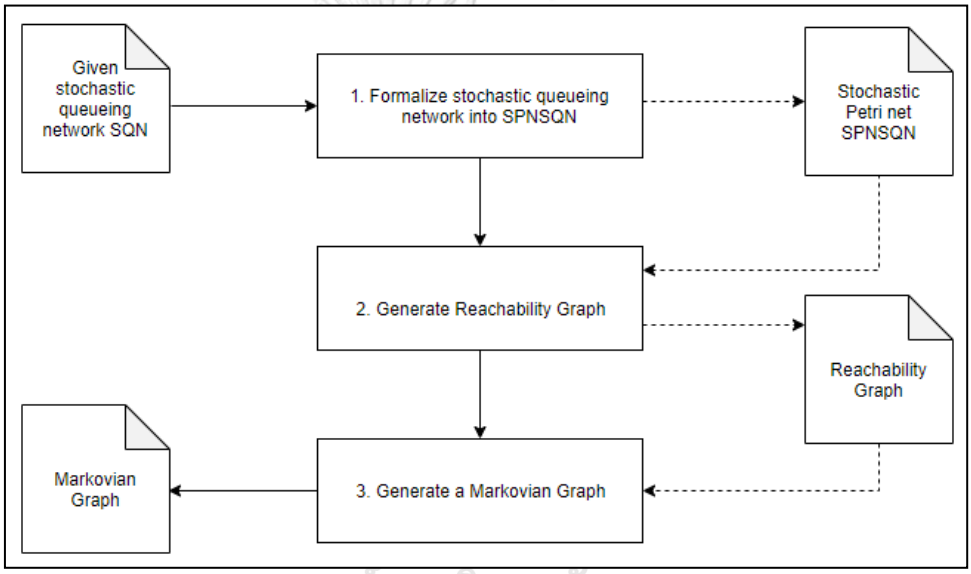
จากรูปที่ 2.13 (a) จะเห็นได้ว่า State S1 มีเส้นออกจาก S1 2 เส้น คือ จาก S1 → S2 และ S1 → S3 เกิดเหตุการณ์การขัดกัน ดังนั้น S1 → S2 จะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นโดยใช้สมการที่ 2 และ S1 → S3 จะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นโดยใช้สมการที่ 3 ส่วนรูปที่ 2.13 (b) มีเส้นออกจากแต่ละ State เพียงเส้นเดียว ดังนั้นจะคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นแบบแจกแจงสะสม โดยใช้สมการที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัย “Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic Petri Nets” โดย K. Soomanat and W. Vatanawood ปี ค.ศ. 2018 [2]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเครือข่ายแถวคอยแบบสโตแคสติกเชิงรูปนัยโดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์เพื่อรับมือกับพฤติกรรมแบบสุ่มของเวลาการมาถึงและเวลาที่ให้บริการของระบบแถวคอยซึ่งได้มีการนิยามหรือ สร้างกฎขึ้นมาใหม่ หลังจากนั้นนำเสนอวิธีการโดยเริ่มจากการสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ SQNSPN ตามกฎที่นิยามไว้ แล้วนำไปสร้างริชอะบิลิตีกราฟและสร้างมาร์คอฟการ์ฟตามลำดับ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กระบวนการ Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic Petri Nets [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยเลือก กรณีศึกษา : การเข้าแถวคอยของคนไข้เพื่อเข้าไปตรวจรักษาสุขภาพที่โรงพยาบาลแห่งหนึ่ง แล้วทำตามขั้นตอนวิธีการที่ได้นำเสนอไว้ โดยมีการกำหนดขอบเขต ระบุค่าพารามิเตอร์ ข้อจำกัดไว้ และมีการเลือกใช้ฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม (Cumulative Distribution Function) มาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น ซึ่งพบว่าผลการทดลองนั้นถูกต้อง แต่ยังมีข้อจำกัด คือ สามารถรองรับหน่วยให้บริการเพียงหนึ่งหน่วยบริการเท่านั้น

ดังนั้นจากงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำกรณีศึกษาในส่วนของแถวคอยแบบหลายผู้ให้บริการมาพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถรองรับหน่วยให้บริการที่มีหลายหน่วยบริการได้

2.2.2 งานวิจัย “MODELLING OF QUEUES BY USING OF PETRI NET SIMULATOR” โดย E. Kamceva ปี ค.ศ. 2011 [13]

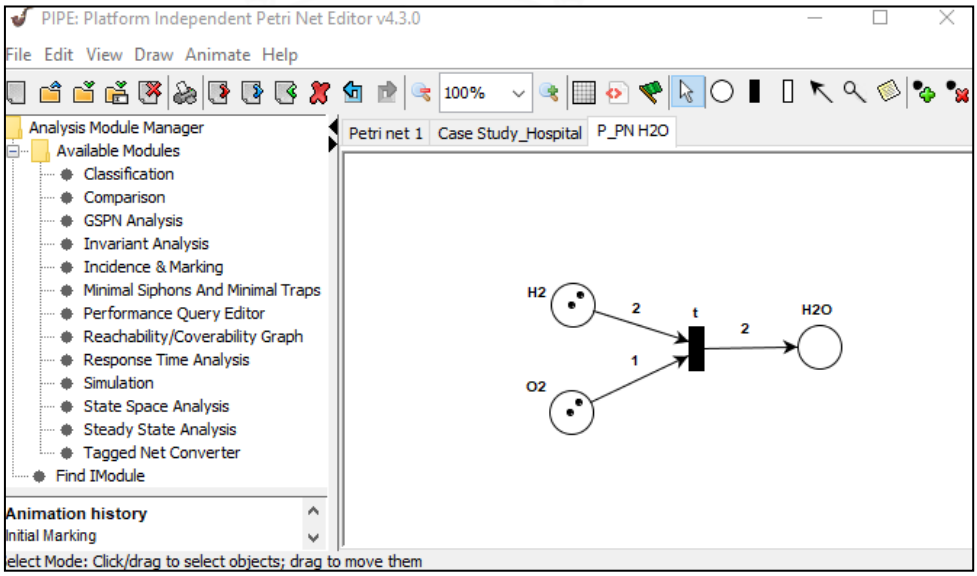
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอโปรแกรมจำลองเพทริเน็ตที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของแถวคอย โดย ได้พิจารณาเวลารอโดยเฉลี่ยในแถวคอย เวลาให้บริการ ความยาวที่คาดหวังของแถวคอย โดยดำเนินการจำลองเพทริเน็ต ผ่านทางกล่องเครื่องมือ PN MATLAB (PN Matlab toolbox) ที่สามารถสร้างแบบจำลองแถวคอยได้ หลังจากนั้นนำเสนอผลการจำลองสำหรับแถวคอย M / M / 1 นอกจากนี้ ยังทำการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้ในทางทฤษฎีกับผลการจำลอง

ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำเอาแนวความคิดในการทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์โดยใช้วิธีการเปรียบ เทียบมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือ

2.2.3 โปรแกรมจำลอง “Platform Independent Petri net Editor 2” โดย N.J. Dingle ปี ค.ศ. 2009 [14]

PIPE เป็นโปรแกรมจำลองโอเพนซอร์ส ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มอิสระสำหรับ การสร้างและวิเคราะห์เพทริเน็ตส์ซึ่งรวมถึงสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ทั่วไปด้วย ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมจำลอง PIPE แสดงดังรูปที่ 2.15

ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำ PIPE มาใช้สำหรับทดสอบความถูกต้องสำหรับผลลัพธ์ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรม

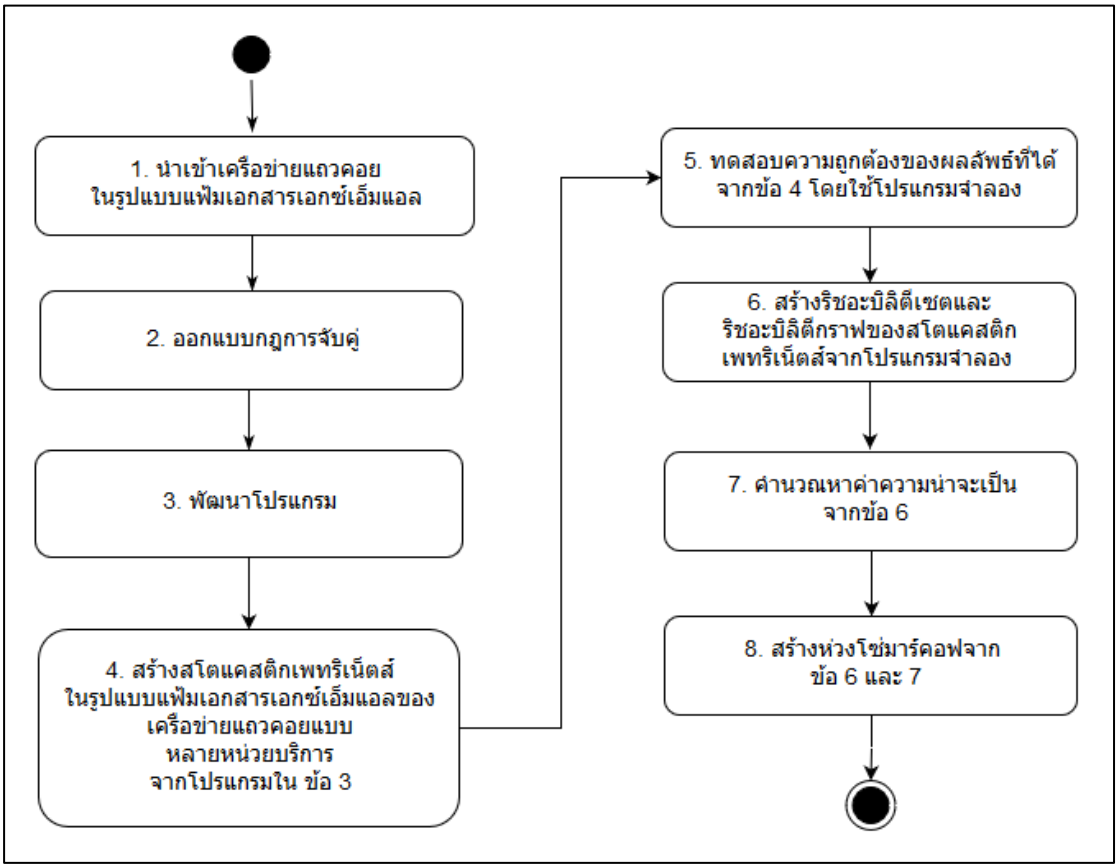


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างหน้าจอโปรแกรมจำลอง PIPE

บทที่ 3

วิธีการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์

วิธีการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ มีภาพรวมของการทำวิทยานิพนธ์นี้ 8 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์

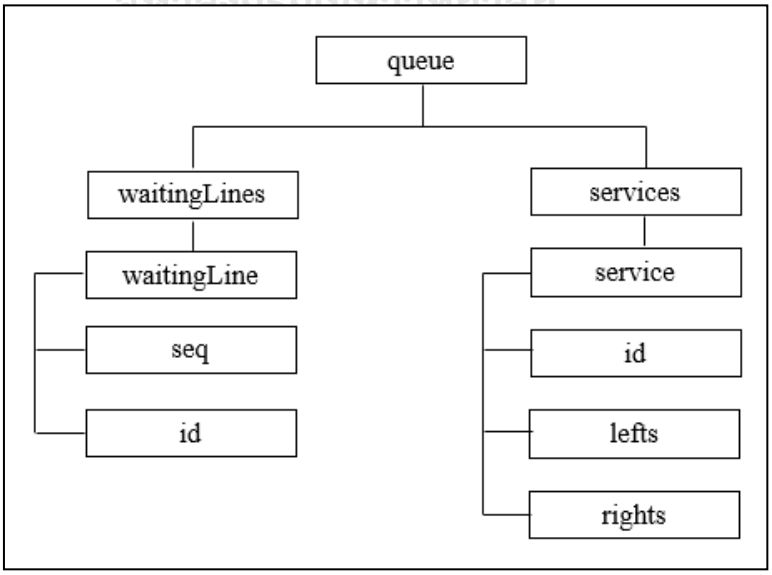
ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนได้ ดังนี้

1) นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล (XML file)
2) ออกแบบกฎการจับคู่ในการจับคู่ชิ้นส่วนองค์ประกอบของเครือข่ายแถวคอยแต่ละชิ้นมาเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

3) พัฒนาโปรแกรมในการอ่านข้อมูลนำเข้าเอกซ์เอ็มแอล จาก ข้อ 1) มา แล้วใช้กฎการจับคู่จากข้อ 2) มาสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ให้ได้ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
4) สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากโปรแกรมใน ข้อ 3)
5) ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ในข้อ 4) โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE
6) สร้างริชอะบิลิตีเซต (Reachability Set) และ ริชอะบิลิตีกราฟ (Reachability Graph) ของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE
7) คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นจาก ข้อ 6)
8) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟจาก ข้อ 6) และ 7)

3.1 นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

แนวคิดในการนำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ผู้วิจัยได้นิยามและออกแบบเครือข่ายแถวคอยให้อยู่ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล เพื่อให้ได้แฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลที่ระบุส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ที่สามารถเข้าใจง่ายและถูกต้องตามไวยากรณ์ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และเขียนแผนภาพเพื่อนิยามเครือข่ายแถวคอยสำหรับเค้าโครงร่างของแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถอธิบายความหมายของเค้าโครงร่างของเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลได้ดังตารางที่ 3.1 และแสดงตัวอย่างเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ดังรูปที่ 3.3

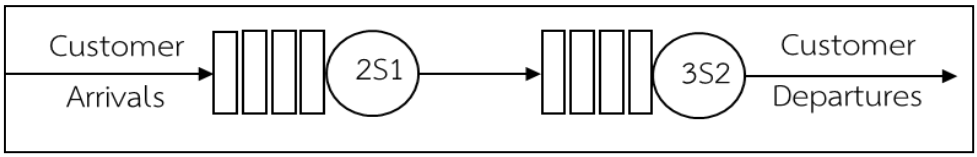


รูปที่ 3.2 แผนภาพเค้าโครงร่างเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของแถวคอยและส่วนประกอบเอกซ์เอ็มแอล

ส่วนประกอบเอกซ์เอ็มแอล	คำอธิบาย
<queue>...</queue>	ราก (Root) ของเอกซ์เอ็มแอล
<waitingLines> <waitingLine> <seq>0</seq> <id>P0</id> </waitingLine> </waitingLines>	ส่วนประกอบของแถวคอย มีดังนี้ seq คือ การระบุขั้นตอนของแถวคอย id คือ การระบุไอดีของแถวคอย
<services> <service> <id>T0</id> <lefts> <left>P0</left> </lefts> <rights> <right>P1</right> </rights> </service> </services>	ส่วนประกอบของหน่วยบริการ มีดังนี้ id คือ การระบุไอดีของหน่วยบริการ lefts คือ การระบุการเชื่อมต่อแถวคอยทางซ้าย rights คือ การระบุการเชื่อมต่อแถวคอยทางขวา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



```xml
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<queue>
    <waitingLines>
        <waitingLine>
            <seq>0</seq>
            <id>P0</id>
        </waitingLine>
        <waitingLine>
            <seq>1</seq>
            <id>P1</id>
        </waitingLine>
        <waitingLine>
            <seq>2</seq>
            <id>P2</id>
        </waitingLine>
    </waitingLines>
    <services>
        <service>
            <id>T0</id>
            <lefts>
                <left>P0</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P1</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T1</id>
            <lefts>
                <left>P0</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P1</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T2</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T3</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T4</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
    </services>
</queue>
```

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 ออกแบบกฎการจับคู่ในการจับคู่ชิ้นส่วนองค์ประกอบของเครือข่ายแถวคอยแต่ละชิ้นส่วนมาเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอนิยามและกฎสำหรับการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ตัวอย่างดังนี้

นิยามข้อที่ 1 Queue Node เพื่อนิยามชุดแถวคอย

องค์ประกอบของ Stochastic Queue Node คือ 4-tuple *QNode* = (*A, W, S, D*) โดยที่

A คือเซตจำกัดของการมาถึง

W คือพื้นที่คอยโดยมีเกณฑ์การให้บริการ *Q*= คำขอการมาถึงจะได้รับการประมวลผลแบบสุ่ม (*SIRO)*

S คือแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยมีค่าเฉลี่ยของเวลา (μ) ในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ

D คือเซตจำกัดของการจากไป

ตัวอย่างที่ 3.1

จากนิยามข้อที่ 1 รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่าง แถวคอยขั้นตอนเดียวมี 2 หน่วยบริการ

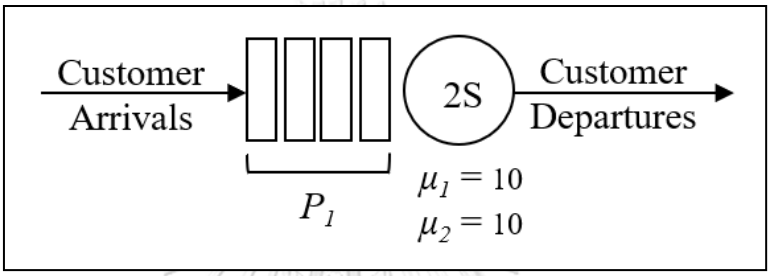
โดยกำหนดให้ Stochastic Queue Node $A = (A, W, S, D)$ โดยที่

A = {Customer Arrivals} คือเซตจำกัดของการมาถึง

$W = \{P_1\}$; Q= คำขอการมาถึงจะได้รับการประมวลผลแบบสุ่ม (SIRO)

$S = 2$; $\mu_1 = 10$, $\mu_2 = 10$ คือ แถวคอยมี 2 หน่วยบริการ โดยมีค่าเฉลี่ยของเวลา (μ) ในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ ; $\mu_1 = 10$, $\mu_2 = 10$

D = {Customer Departure} คือเซตจำกัดของการจากไป



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ

ซึ่งจะเขียนตัวอย่างองค์ประกอบของ Stochastic Queue Node ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Stochastic Queue Node

แถวคอย	คำอธิบาย
Customer → Arrivals	*A* (Arrivals) คือเซตจำกัดของการมาถึง
	W (Waiting Area) คือพื้นที่คอย โดยมีเกณฑ์การให้บริการ *Q=SIRO* *S* (Multi-Server) คือแถวคอยแบบหลายหน่วยโดยมีค่าเฉลี่ยของเวลา (μ) ในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ
Customer → Departures	*D* (Departure) คือเซตจำกัดของการจากไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นิยามข้อที่ 2 Queuing Network เพื่อนิยามเครือข่ายแถวคอย

องค์ประกอบของ Queuing Network คือ 3-tuple *QNet* = (*QN, IC, SN*) โดยที่

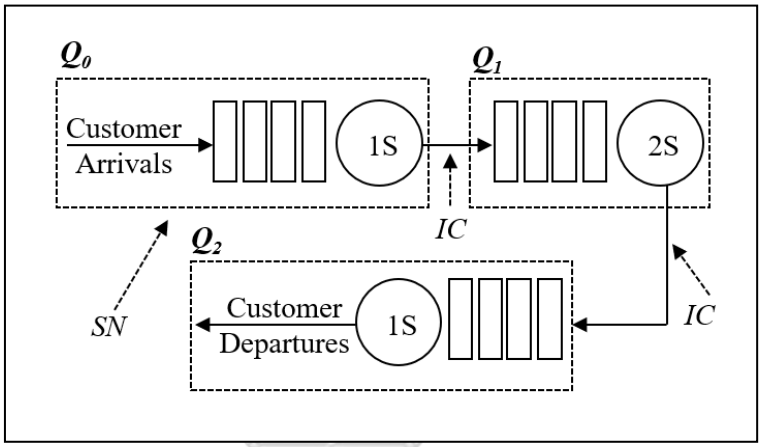
QN คือ เซตของ *QNode*

IC คือ การเชื่อมต่อระหว่าง 2 *QN*

SN คือ โหนดเริ่มต้นของ *QNet*

ตัวอย่างที่ 3.2

จากนิยามข้อที่ 2 รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่าง เครือข่ายแถวคอย ซึ่งมี 3 ขั้นตอน หรือ 3 QNode



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเครือข่ายแถวคอย

โดยกำหนดให้ Queuing Network *A* = (*QN, IC ,SN*) โดยที่

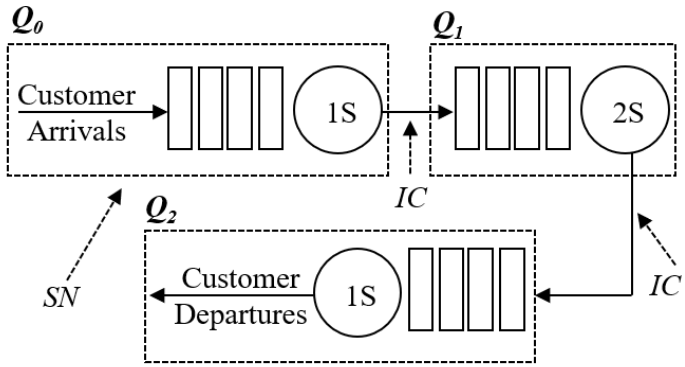
QN = {Q_0, Q_1, Q_2} คือ เซตของ *QNode*

IC = {(Q_0, Q_1), (Q_1, Q_2)} คือ การเชื่อมต่อระหว่าง 2 *QN*

SN = Q_0 คือ โหนดเริ่มต้นของ *QNet*

ซึ่งจะเขียนตัวอย่างองค์ประกอบของ Queuing Network ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Queuing Network

เครือข่ายแถวคอย	คำอธิบาย
	QN (Queue Node) คือ เซตของ QNode
	*IC* (Interconnection) คือ การเชื่อมต่อระหว่าง 2 *QN* *SN* (Start Node) คือ โหนดเริ่มต้นของ *QNet*

นิยามข้อที่ 3 Stochastic Petri nets of Queue Node เพื่อ map แถวคอยกับสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

องค์ประกอบของ Stochastic Petri nets of Queue Node คือ

6-tuple *SPNQN* = (*P, T, I, O, M_0,* Λ) โดยที่

P = {*p1*} เมื่อ *p1* แสดงถึง *W (*พื้นที่คอยโดยมีเกณฑ์การให้บริการ *Q*= คำขอการมาถึงจะได้รับการประมวลผลแบบสุ่ม (*SIRO))*

T = {*t1*, *t2*...} เมื่อ *t1, t2*, ... แสดงถึง *S (*แถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยมีค่าเฉลี่ยของเวลา (μ) ในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ *)*

I = {(*p1, t1*)} คือ เส้นเชื่อมระหว่าง เพลส *p1* ไปทรานสิชัน *t1*

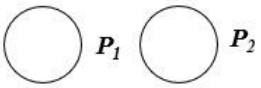
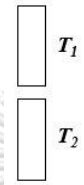
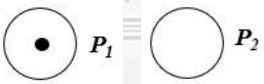
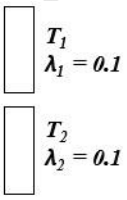
O= {(*t1, p2*)} คือ เส้นเชื่อมระหว่าง ทรานสิชัน *t1* ไปเพลส *p2*

M_0 คือ มาร์กกิงแรกเริ่ม

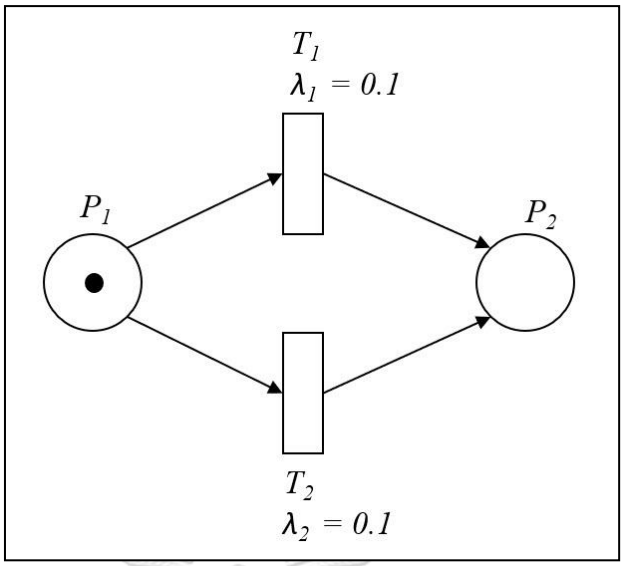
Λ = {λ_1} อัตราการยิงที่สัมพันธ์กับทรานสิชัน *t1* และ $\lambda_1 = 1/\mu$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3. 4 ตัวอย่างองค์ประกอบของ Stochastic Petri Nets of Queue Node

แถวคอย	สโตแคสติกเพทริเน็ตส์	คำอธิบาย
		*P* = {*P1, P2*} เมื่อ P1 แสดงถึง *W* (พื้นที่คอยโดยมีเกณฑ์การให้บริการ Q= คำขอการมาถึงจะได้รับการประมวลผลแบบสุ่ม (SIRO))
		*T* = {*T1, T2*} เมื่อ *T1, T2* แสดงถึง *S* (แถวคอยแบบหลายหน่วยบริการโดยมีค่าเฉลี่ยของเวลา (μ) ในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ)
		I = {(*P1, T1*)} คือ เส้นเชื่อมระหว่างเพลส *P1* ไป ทรานสิชัน *T1* *O*= {(*T1, P2*)} คือ เส้นเชื่อมระหว่างทรานสิชัน *T1* ไปเพลส *P2*
กำหนดมาร์กกิงแรกเริ่ม		M_0 คือ มาร์กกิงแรกเริ่ม
$\mu 1 = 10,$ $\mu 2 = 10$		Λ = {λ_1, λ_2} อัตราการยิงที่สัมพันธ์กับทรานสิชัน T1 และ T2 $\lambda_1 = 1/\mu 1 = 1/10 = 0.1$ $\lambda_2 = 1/\mu 2 = 1/10 = 0.1$

สำหรับตัวอย่าง การใช้กฎการจับคู่ที่อธิบายไว้ในตารางที่ 3.3 Queue Node ที่มี 2 หน่วยบริการจากรูปที่ 3.3 จะถูกวาดใหม่เป็น *SPNQN* ดังรูปที่ 3.6



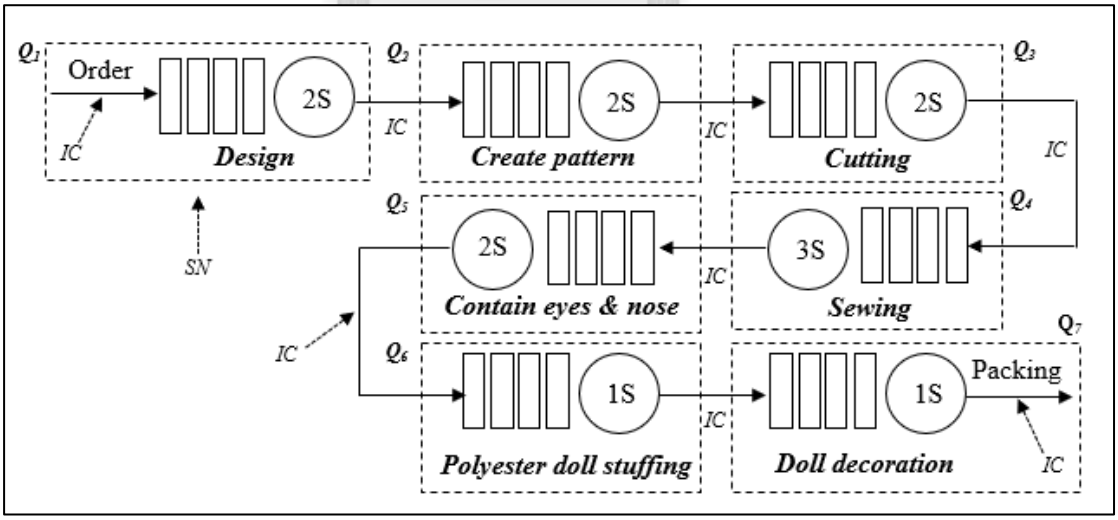
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของ *SPNQN* สำหรับ Queue Node ที่มี 2 หน่วยบริการ

กฎข้อที่ 1 สร้าง Stochastic Petri nets of Queuing Network *SPNQNet* เพื่อสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอย

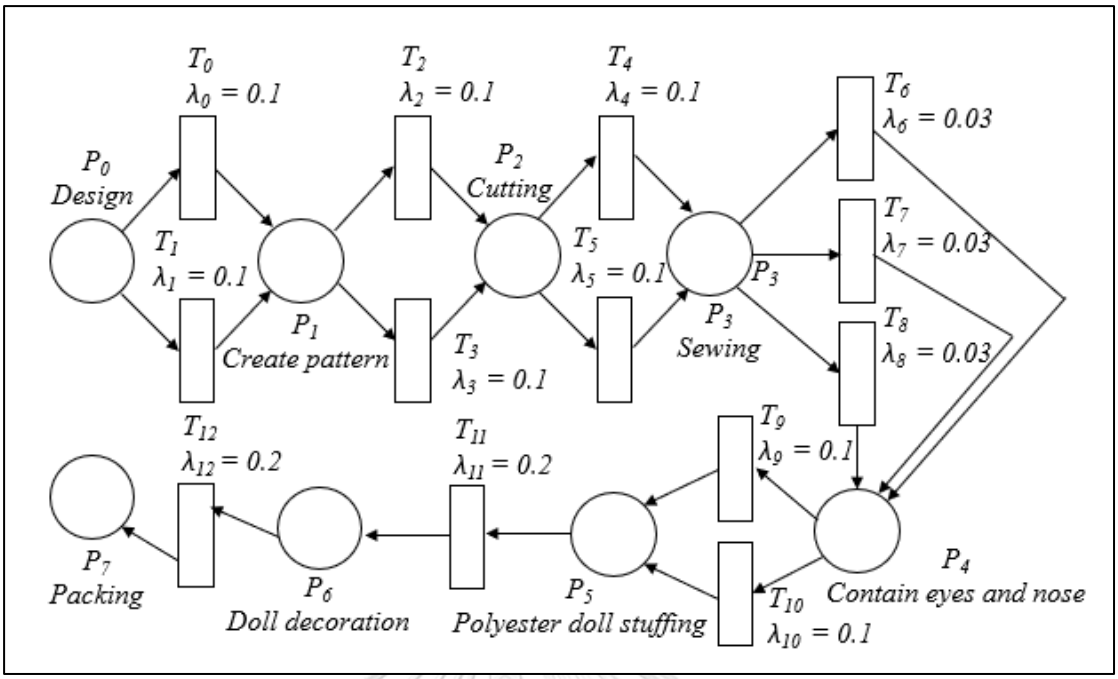
1) กำหนดให้ *SN* ของ *QNet* คือ พาร์ทเริ่มต้นของ *SPNQNet*

2) เพิ่มการเชื่อมต่อจากโหนด *SN* ของ *QNet* ไปยังโหนดที่เชื่อมต่อ

สำหรับตัวอย่าง กำหนดให้ QNet มี 7 QNode ดังรูปที่ 3.7 สามารถสร้าง *SPNQNet* ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ตัวอย่าง Queuing Network ของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา



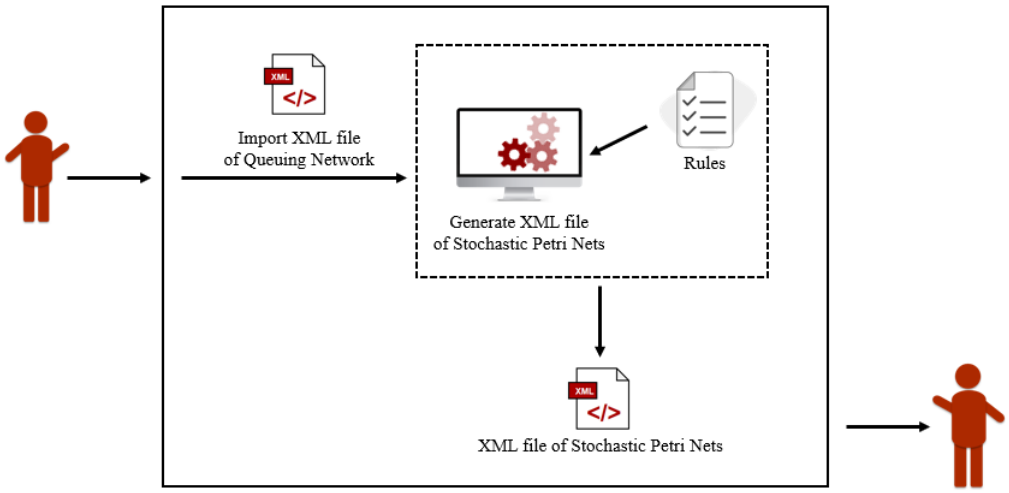
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

จากการออกแบบกฎการจับคู่ในการจับคู่ชิ้นส่วนองค์ประกอบของเครือข่ายแถวคอย แต่ละชิ้นมาเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์นั้น มีความคล้ายกับงานวิจัยของ K. Soomanat [2] เนื่องจากเป็นการ map ชิ้นส่วนองค์ประกอบของเครือข่ายแถวคอยแต่ละชิ้นมาเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์เหมือนกัน แต่มีส่วนที่ต่างกันคือ นิยามข้อที่ 1 ในการกำหนดนิยามของชุดแถวคอย ของ K. Soomanat จะกำหนดเกณฑ์ในการให้บริการเป็นแบบ *FCFS* แต่งานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นแบบ *SIRO* และจำนวนหน่วยบริการเป็นแบบหนึ่งหน่วยบริการเท่านั้น แต่งานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นแบบหลายหน่วยบริการ ซึ่งส่วนที่ต่างกันของนิยามข้อที่ 1 นี้มีผลเกี่ยวเนื่องกับผลลัพธ์ของนิยามข้อที่เหลือทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นออกมาต่างกัน

3.3 พัฒนาโปรแกรมในการอ่านข้อมูลนำเข้าเอกซ์เอ็มแอล

จากภาพรวมของการทำวิทยานิพนธ์ ในส่วนของข้อ 3) การพัฒนาโปรแกรม สามารถอธิบายการออกแบบ flow การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาแต่ละขั้นตอนได้ ดังนี้

1) นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากการนำเข้า ข้อ 1) มา แล้ว ใช้กฎการจับคู่ที่ได้ออกแบบไว้
3) ได้ข้อมูลนำออกเป็นแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอลโดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การออกแบบ flow การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนา

3.4 สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ

ผู้วิจัยจะสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากโปรแกรมใน ข้อ 3) ดังนี้

1) นำเข้าเครือข่ายแถวคอยในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากการนำเข้า ข้อ 1)
3) ได้ข้อมูลนำออกเป็นแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

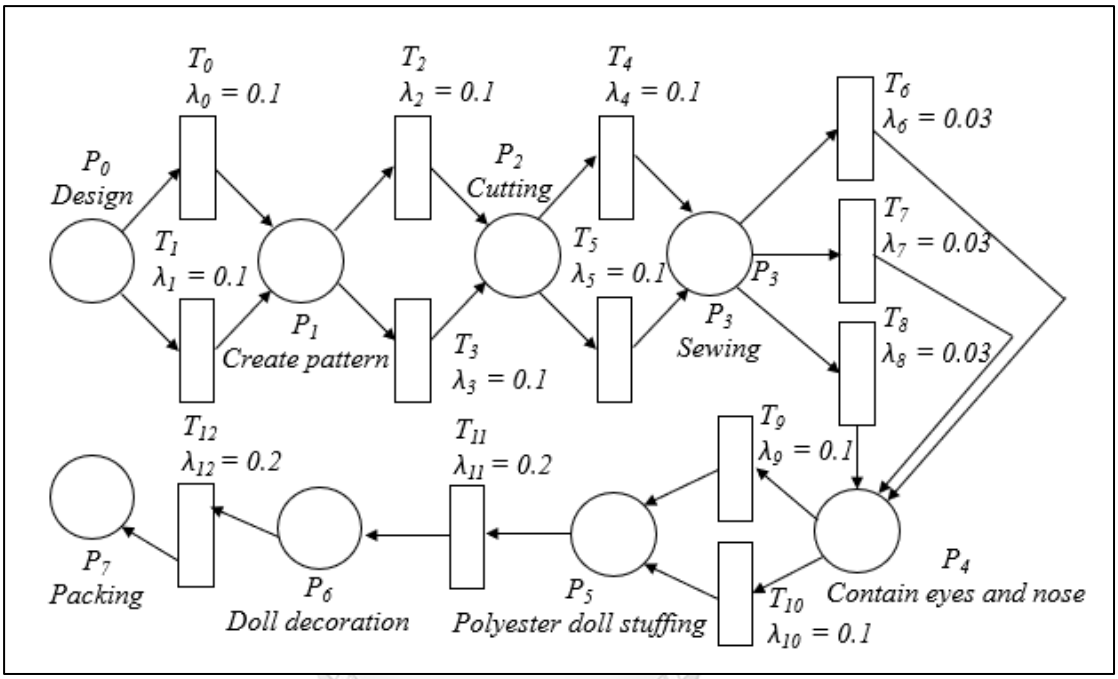
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
<pnml>
  <net id="Net-One" type="P/T net">
    <token id="Default" enabled="true" red="0" green="0" blue="0"/>
    <place id="P0">
      <graphics>
        <position x="210" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P0</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
```

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

3.5 ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

ผู้วิจัยจะนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE จะได้ ดังรูปที่ 3.11 พร้อมทั้งทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยเทียบผลลัพธ์จริงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง อีกทั้งยังสามารถดูพฤติกรรมของระบบและตรวจสอบว่าระบบเกิดภาวะติดตาย (Deadlocks) หรือไม่โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

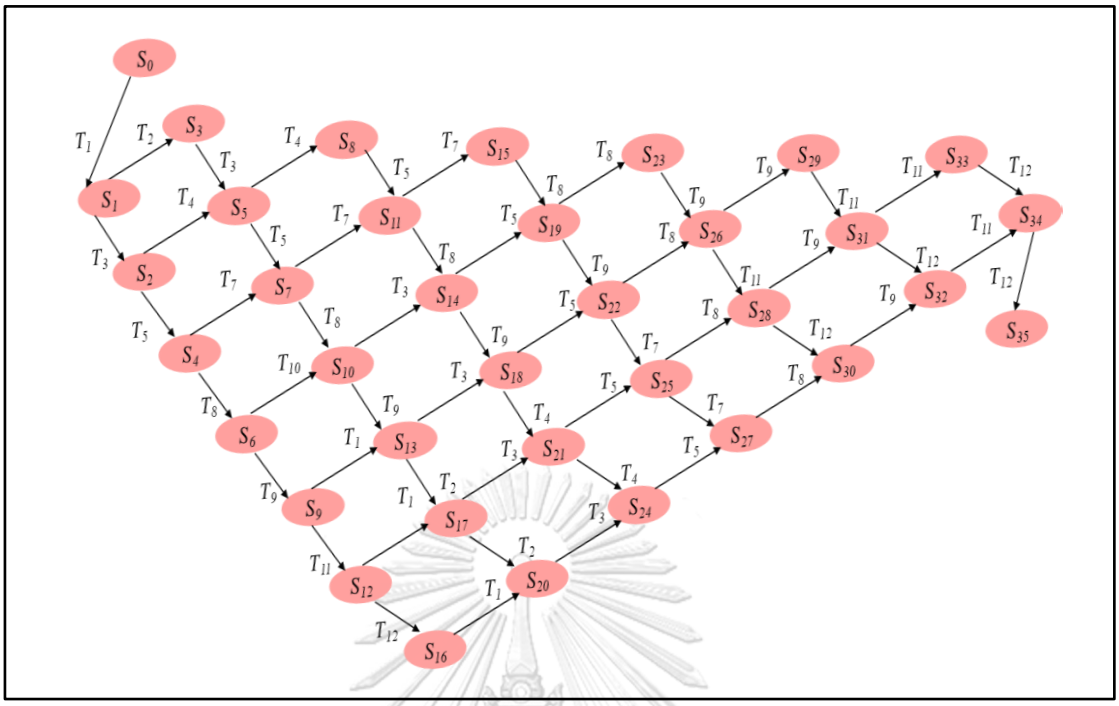


รูปที่ 3.11 ตัวอย่างผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์โดยใช้โปรแกรม PIPE

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 สร้างริชอะบิลิตีเซต (Reachability Set) และ ริชอะบิลิตีกราฟ (Reachability Graph) ของ สโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE

หลังจากที่ได้ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์แล้ว ผู้วิจัยจะสร้างริชอะบิลิตีเซต (Reachability Set) และ ริชอะบิลิตีกราฟ (Reachability Graph) ของ) ของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE ดังตารางที่ 3.5 และ รูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ

3.7 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็น

เมื่อได้ริชอะบิลิตีเซตและริชอะบิลิตีกราฟแล้ว ผู้วิจัยจะนำมาหาค่าความน่าจะเป็น โดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากโปรแกรมไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล (Microsoft Excel) ตัวอย่างดังรูปที่ 3.13 และตารางที่ 3.5 แสดงตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตที่ได้จากโปรแกรมจำลอง PIPE และค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

O3 | =EXPON.DIST(N3,L3,TRUE)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	มาร์กกิ้ง	เซตมาร์กกิ้งปัจจุบัน								มาร์กกิ้ง	ทรานสิชั่น	Lambda	Mean	X	CDF (No	CDF
2	ปัจจุบัน	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	ถัดไป	ที่ฟายริง				conflict)	(Conflict)
3	M0	2	0	0	0	0	0	0	0	M1	T1	0.1	10	60	0.997521	0.002479
4	M1	1	1	0	0	0	0	0	0	M2	T3	0.1	10	60	0.997521	0.500000
5	M1	1	1	0	0	0	0	0	0	M3	T2	0.1	10	60	0.997521	0.500000

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ

จากตัวอย่างจากกรณีศึกษานี้

ผู้วิจัยกำหนดให้

P0 = Design

P1 = Create pattern

P2 = Cutting

P3 = Sewing

P4 = Contain eyes and nose

P5 = Polyester doll stuffing

P6 = Doll decoration

P7 = Packing

ค่า x = 60

T1 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T2 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T3 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T4 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T5 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T6 มีค่า μ = 30, λ = 0.03

T7 มีค่า μ = 30, λ = 0.03

T8 มีค่า μ = 30, λ = 0.03

T9 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T10 มีค่า μ = 10, λ = 0.1

T11 มีค่า μ = 5, λ = 0.2

T12 มีค่า μ = 5, λ = 0.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 3.13 ผู้วิจัยจะหาค่าความน่าจะเป็นจาก M0 ไป M1 โดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากโปรแกรมไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล โดยการแทนค่า λ จากคอลัมน์ G และค่า X จากคอลัมน์ I ในสูตร = EXPON.DIST (x, lambda, cumulative) จะได้ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.997521

ตารางที่ 3. 5 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น

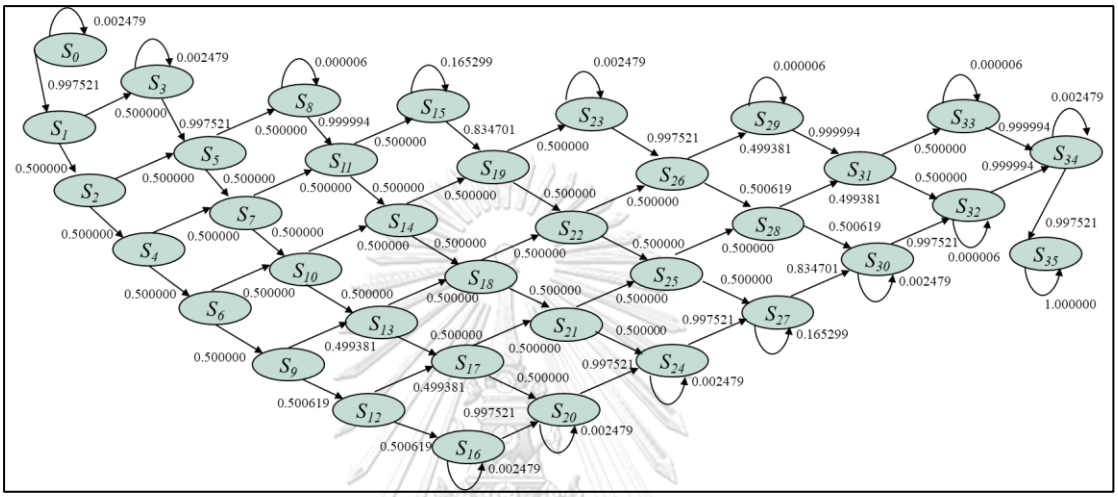
มาร์กกิงปัจจุบัน	เซตมาร์กกิงปัจจุบัน								มาร์กกิงถัดไป	ทรานสิชันที่ฟายริง	λ	μ	X	CDF (No conflict)	CDF (Conflict)
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7							
M0	2	0	0	0	0	0	0	0	M1	T1	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M1	1	1	0	0	0	0	0	0	M2	T3	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M1	1	1	0	0	0	0	0	0	M3	T2	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M2	1	0	1	0	0	0	0	0	M4	T5	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M2	1	0	1	0	0	0	0	0	M5	T4	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M3	0	2	0	0	0	0	0	0	M5	T3	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M4	1	0	0	1	0	0	0	0	M6	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M4	1	0	0	1	0	0	0	0	M7	T7	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M5	0	1	1	0	0	0	0	0	M7	T5	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M5	0	1	1	0	0	0	0	0	M8	T4	0.1	10	60	0.997521	0.500000

ตารางที่ 3. 5 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น (ต่อ)

มาร์กกิงปัจจุบัน	เซตมาร์กกิงปัจจุบัน								มาร์กกิงถัดไป	ทรานสิชันที่ฟายริง	λ	μ	X	CDF (No conflict)	CDF (Conflict)
M6	1	0	0	0	1	0	0	0	M9	T9	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M6	1	0	0	0	1	0	0	0	M10	T10	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M7	0	1	0	1	0	0	0	0	M10	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M7	0	1	0	1	0	0	0	0	M11	T7	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M8	0	0	2	0	0	0	0	0	M11	T11	0.2	5	60	0.999994	0.000006
M9	1	0	0	0	0	1	0	0	M12	T11	0.2	5	60	0.999994	0.500619
M9	1	0	0	0	0	1	0	0	M13	T1	0.1	10	60	0.997521	0.499381
M10	0	1	0	0	1	0	0	0	M13	T9	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M10	0	1	0	0	1	0	0	0	M14	T3	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M11	0	0	1	1	0	0	0	0	M14	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M11	0	0	1	1	0	0	0	0	M15	T7	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M12	1	0	0	0	0	0	1	0	M16	T12	0.2	5	60	0.999994	0.500619
M12	1	0	0	0	0	0	1	0	M17	T1	0.1	10	60	0.997521	0.499381
M13	0	1	0	0	0	1	0	0	M17	T2	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M13	0	1	0	0	0	1	0	0	M18	T3	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M14	0	0	1	0	1	0	0	0	M18	T4	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M14	0	0	1	0	1	0	0	0	M19	T5	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M15	0	0	0	2	0	0	0	0	M19	T8	0.03	30	60	0.834701	0.165299
M16	1	0	0	0	0	0	0	1	M20	T1	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M17	0	1	0	0	0	0	1	0	M20	T2	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M17	0	1	0	0	0	0	1	0	M21	T3	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M18	0	0	1	0	0	1	0	0	M21	T4	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M18	0	0	1	0	0	1	0	0	M22	T5	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M19	0	0	0	1	1	0	0	0	M22	T9	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M19	0	0	0	1	1	0	0	0	M23	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M20	0	1	0	0	0	0	0	1	M24	T3	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M21	0	0	1	0	0	0	1	0	M24	T4	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M21	0	0	1	0	0	0	1	0	M25	T5	0.1	10	60	0.997521	0.500000
M22	0	0	0	1	0	1	0	0	M25	T7	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M22	0	0	0	1	0	1	0	0	M26	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M23	0	0	0	0	2	0	0	0	M26	T9	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M24	0	0	1	0	0	0	0	1	M27	T5	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M25	0	0	0	1	0	0	1	0	M27	T7	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M25	0	0	0	1	0	0	1	0	M28	T8	0.03	30	60	0.834701	0.500000
M26	0	0	0	0	1	1	0	0	M28	T11	0.2	5	60	0.999994	0.500619
M26	0	0	0	0	1	1	0	0	M29	T9	0.1	10	60	0.997521	0.499381
M27	0	0	0	1	0	0	0	1	M30	T8	0.03	30	60	0.834701	0.165299
M28	0	0	0	0	1	0	1	0	M30	T12	0.2	5	60	0.999994	0.500619
M28	0	0	0	0	1	0	1	0	M31	T9	0.1	10	60	0.997521	0.499381
M29	0	0	0	0	0	2	0	0	M31	T11	0.2	5	60	0.999994	0.000006
M30	0	0	0	0	1	0	0	1	M32	T9	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M31	0	0	0	0	0	1	1	0	M32	T12	0.2	5	60	0.999994	0.500000
M31	0	0	0	0	0	1	1	0	M33	T11	0.2	5	60	0.999994	0.500000
M32	0	0	0	0	0	1	0	1	M34	T11	0.2	5	60	0.999994	0.000006
M33	0	0	0	0	0	0	2	0	M34	T12	0.2	5	60	0.999994	0.000006
M34	0	0	0	0	0	0	1	1	M35	T2	0.1	10	60	0.997521	0.002479
M35	0	0	0	0	0	0	0	2	-	-	-	-	-	-	1.000000

3.8 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ

เนื่องจากริชอะบิลิตีกราฟนั้นไม่ได้แสดงค่าความน่าจะเป็น ดังนั้นผู้วิจัยจะนำและริชอะบิลิตีกราฟที่ได้จากข้อ 3.6 และตารางค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากข้อ 3.7 มาสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟโดยเป็นกราฟถอดแบบ (Isomorphic graphs) มาจากริชอะบิลิตีกราฟ เพื่อแสดงค่าความน่าจะเป็นจาก State ปัจจุบันไปยัง State ถัดไปได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือ

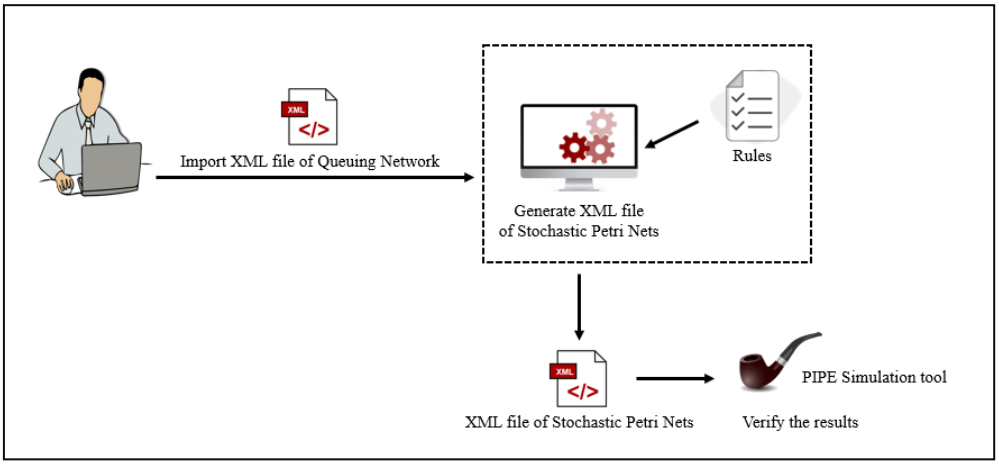
สำหรับในบทนี้ จะนำแนวคิดในการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ที่ได้อธิบายไว้ในบทก่อนหน้านี้ มาพัฒนาเป็นเครื่องมือการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

4.1 ภาพรวมการทำงานของเครื่องมือ

เครื่องมือในการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์นั้น จะพัฒนาโดยใช้โปรแกรมภาษาจาวาและอยู่ในรูปแบบของเว็บแอปพลิเคชัน โดยเครื่องมือจะทำการแปลงส่วนประกอบของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ โดยใช้กฎการแปลงที่ออกแบบไว้ ภาพรวมของการทำงานของเครื่องมือดังรูปที่ 4.1 มีรายละเอียดดังนี้

1) ผู้ใช้งานระบบนำเข้าเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) ระบบสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากการนำเข้า แล้วใช้กฎการจับคู่ที่ได้ออกแบบไว้
3) ได้ข้อมูลนำออกเป็นแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล
4) ผู้ใช้งานระบบทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ในข้อ 3) โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

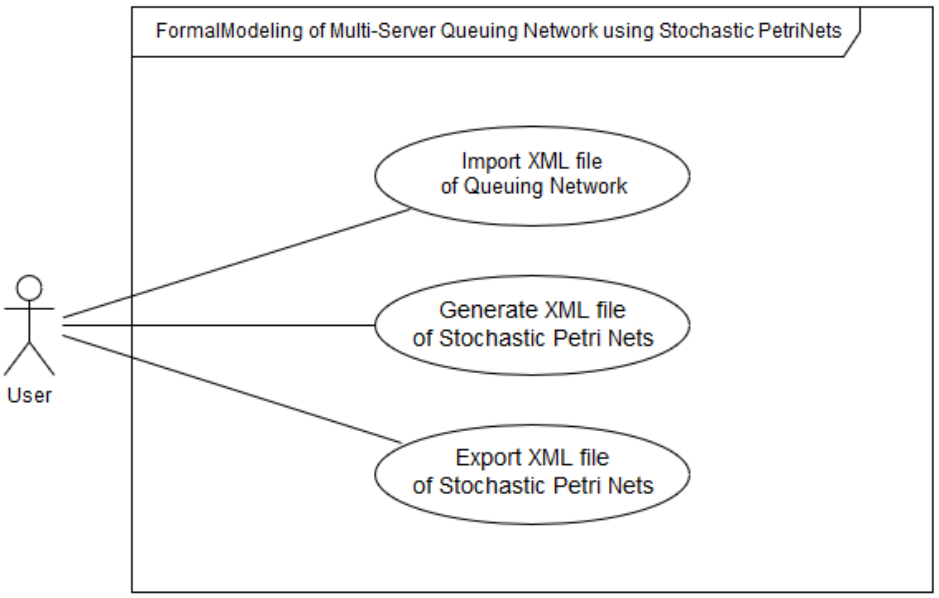
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.1 ภาพรวมการทำงานของเครื่องมือ

4.2 การออกแบบเชิงฟังก์ชันการทำงานของเครื่องมือ

ในการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง เชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ผู้วิจัยได้ใช้แผนภาพยูสเคส (Use Case Diagram) ในการอธิบายขอบเขตของระบบและฟังก์ชันการทำงานของระบบ รวมไปถึงใช้ในการทวนสอบความครบถ้วนของระบบว่ามีฟังก์ชันงานครบตามความต้องการของผู้ใช้หรือไม่ ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4. 2 แผนภาพยูสเคสของเครื่องมือที่พัฒนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปยูสเคสทั้งหมดได้ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงยูสเคสไอดีและยูสเคสทั้งหมดของเครื่องมือที่พัฒนา

ลำดับ	ยูสเคสไอดี	ชื่อยูสเคส
1	UC-01	Import XML file of Queuing Network
2	UC-02	Generate XML file of Stochastic Petri Nets
3	UC-03	Export XML file of Stochastic Petri Nets

ซึ่งแต่ละยูสเคสสามารถอธิบายรายละเอียดได้ ดังนี้

ตารางที่ 4. 2 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-01

หมายเลขยูสเคส	UC-01
ชื่อยูสเคส	Import XML file of Queuing Network
แอคเตอร์	ผู้ใช้งานระบบ
รายละเอียดยูสเคส	นำเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการในรูปแบบเอกซ์เอ็มแอลเข้าสู่ระบบ
ยูสเคสที่สัมพันธ์	-
เงื่อนไขก่อนหน้า	เครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการอยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
ขั้นตอน	1. ผู้ใช้งานระบบเรียกใช้เครื่องมือที่พัฒนา 2. ระบบแสดงหน้าต่างสำหรับนำเข้าเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ 3. ผู้ใช้งานระบบเลือกเอกสารเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการที่อยู่ในรูปแบบเอกซ์เอ็มแอล
เงื่อนไขภายหลัง	ผู้ใช้งานระบบเลือกปุ่มเพื่อทำการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ.xml ไปเป็นสโตแคสติก.xml

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 3 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-02

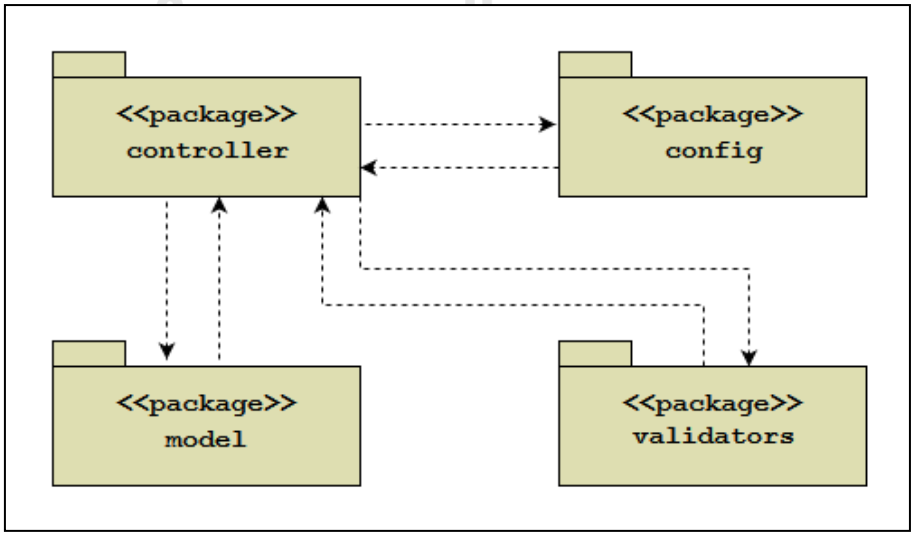
หมายเลขยูสเคส	UC-02
ชื่อยูสเคส	Generate XML file of Stochastic Petri Nets
แอคเตอร์	-
รายละเอียดยูสเคส	อ่านเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการและสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ตามกฎการแปลง
ยูสเคสที่สัมพันธ์	-
เงื่อนไขก่อนหน้า	เครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการที่อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
ขั้นตอน	อ่านเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการในรูปแบบเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล
เงื่อนไขภายหลัง	-

ตารางที่ 4. 4 แสดงรายละเอียดของยูสเคส UC-03

หมายเลขยูสเคส	UC-03
ชื่อยูสเคส	Export XML file of Stochastic Petri Nets
แอคเตอร์	-
รายละเอียดยูสเคส	นำออกสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ตามกฎการแปลงที่อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
ยูสเคสที่สัมพันธ์	-
เงื่อนไขก่อนหน้า	มีการนำเข้าเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการที่อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
ขั้นตอน	1. ระบบแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ตามกฎการแปลงโดยอยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล 2. นำออกสโตแคสติกเพทริเน็ตส์.xml
เงื่อนไขภายหลัง	-

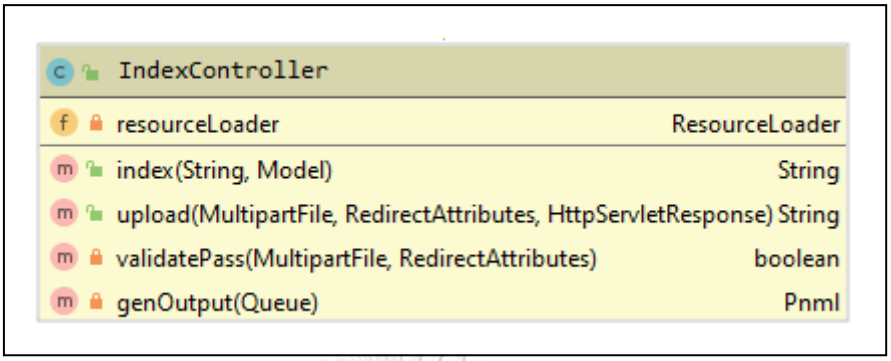
4.3 การออกแบบเชิงโครงสร้าง

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลของเครื่องมือที่จะพัฒนาขึ้น โดยใช้แผนภาพคลาส (Class Diagram) ซึ่งแผนภาพคลาสจะแสดงให้เห็นถึงคลาสต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเครื่องมือและความสัมพันธ์ระหว่างกัน ซึ่งแบ่งเป็น 4 แพ็กเกจ ดังรูปที่ 4.3



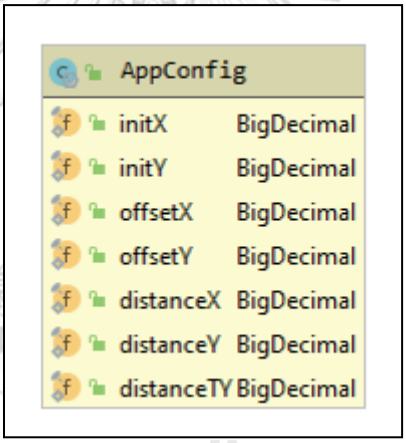
รูปที่ 4.3 แผนภาพแพ็กเกจของเครื่องมือที่พัฒนา

1) แพ็กเกจ controller เป็นส่วนควบคุมการแสดงผล โดยรับข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้งานระบบ แล้วมาตัดสินใจว่า model จะทำงานอย่างไรต่อ ประกอบด้วยคลาส IndexController ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แพ็กเกจ controller ประกอบด้วยคลาส IndexController

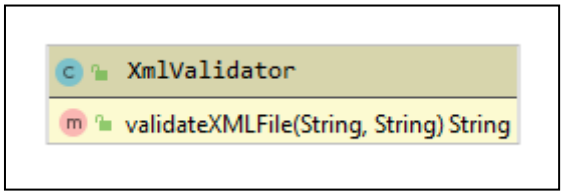
2) แพ็กเกจ config เป็นการกำหนดค่า ซึ่งประกอบด้วยคลาส AppConfig ดังรูปที่ 4.5



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

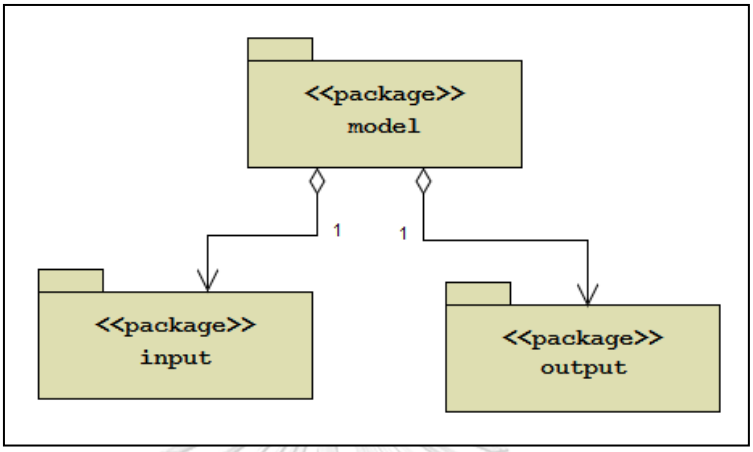
รูปที่ 4. 5 คลาสในแพ็กเกจ config

3) แพ็กเกจ validators เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า ซึ่งประกอบด้วยคลาส XmlValidator ดังรูปที่ 4.6

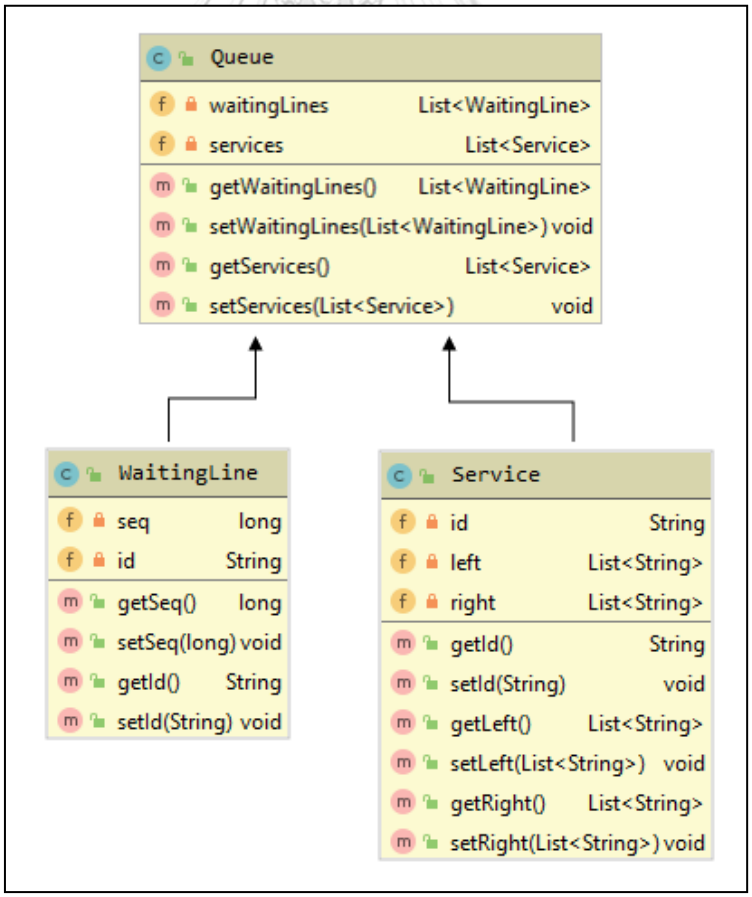


รูปที่ 4.6 คลาสในแพ็กเกจ validators

4) แพ็กเกจ model ประกอบด้วยแพ็กเกจ input เป็นแพ็กเกจเกี่ยวกับข้อมูลนำเข้า และ out put เป็นแพ็กเกจเกี่ยวกับข้อมูลนำออก ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแพ็กเกจ input ประกอบด้วยคลาส Queue WaitingLine และ Service ดังรูปที่ 4.8

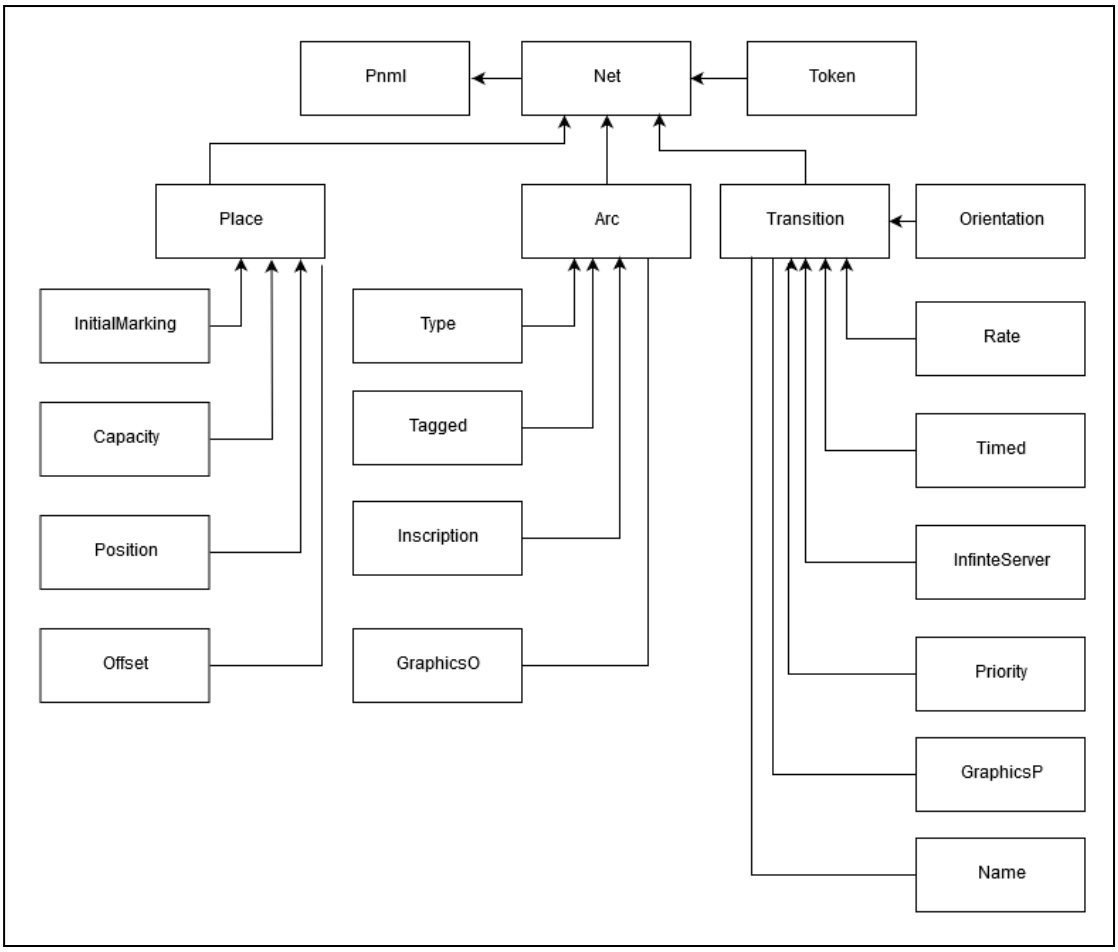


รูปที่ 4.7 แพ็กเกจ model ประกอบแพ็จเกจ input และแพ็จเกจ output



รูปที่ 4.8 คลาสในแพ็กเกจ input

แพ็กเกจ output ประกอบด้วยคลาส Pnml Net Place Token InitialMarking Capacity Transition Orientation Rate Timed InfiniteServer Priority Arc Inscription Tagged Type Name GraphicsP GraphicsO Offset Position ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 คลาสในแพ็กเกจ output

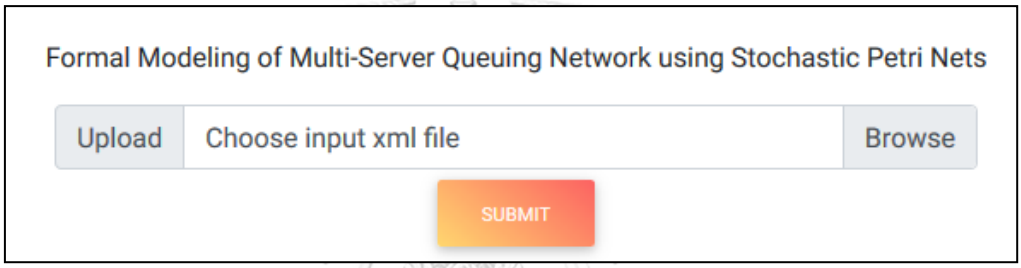
หลังจากได้คลาสในแพ็กเกจ input ซึ่งเป็นแพ็กเกจเกี่ยวกับการนำเข้าข้อมูล และแพ็กเกจ output เป็นแพ็กเกจเกี่ยวกับข้อมูลนำออก เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะนำมาเขียนโปรแกรมเพื่อสร้างข้อมูลนำออกสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ตามกฎการแปลงที่อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

4.4 การออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้งานระบบ

การออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้งานระบบ เพื่อรองรับการนำเข้าแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเข้าสู่ระบบ และทำการรแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ หลังจากนั้นทำการนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลเพื่อนำไปทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดของหน้าจอต่างๆดังนี้

1) หน้าจอหลัก

เป็นหน้าจอสำหรับผู้ใช้งานระบบใช้ในการนำเข้าแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยแสดงชื่อของเครื่องมือ กล่องให้ผู้ใช้ทำการเลือกแฟ้มข้อมูลนำเข้าเอกซ์เอ็มแอล และปุ่ม SUBMIT สำหรับ อัพโหลด (Upload) แฟ้มข้อมูลที่เลือก ดังรูปที่ 4.10

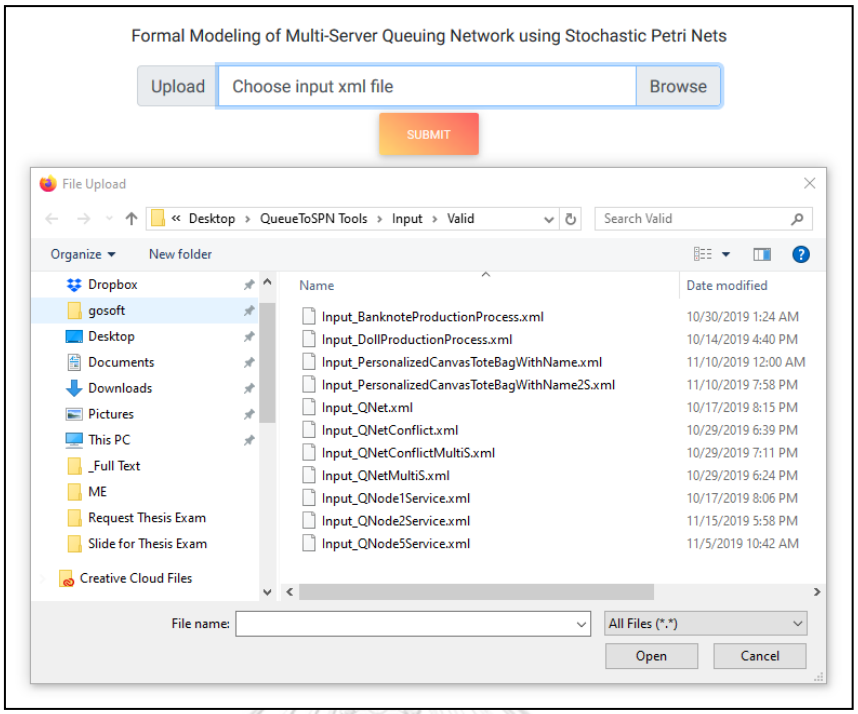


รูปที่ 4.10 หน้าจอหลัก หน้าจอนำเข้าแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอล

2) หน้าจอในการค้นหาแฟ้มข้อมูล

เป็นหน้าจอที่ใช้ในการค้นหาแฟ้มข้อมูล สำหรับนำเข้าแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ ตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.11

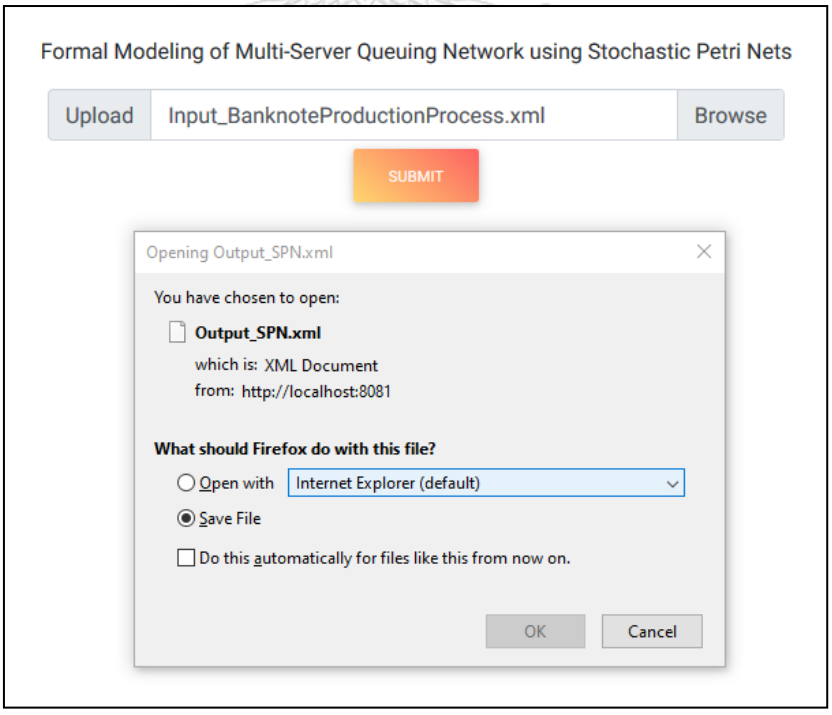
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.11 หน้าจอในการค้นหาแฟ้มข้อมูลเอกซ์เอ็มแอล

3) หน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

เป็นหน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

4.5 เครื่องมือที่ใช้พัฒนาระบบ

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลองเชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) ฮาร์ดแวร์

เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

- หน่วยประมวลผล Intel(R) Core (TM) i5-4250U CPU @ 1.30GHz 1.90Hz
- หน่วยความจำสำรอง (RAM) กิกะไบต์ 4.00 กิกะไบต์ (4.00 GB)
- ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) 256 กิกะไบต์ เอสเอสดี (256 GB SSD)

2) ซอฟต์แวร์

ระบบปฏิบัติการ

- ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดวส์ 10 โปร (Microsoft Windows 10 Pro)

เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- Spring Boot with Bootstrap & jQuery + MDB
- IDE: IntelliJ IDEA 2019.2.3 (Ultimate Edition)
- Build tools: Gradle
- Java SE Development Kit 8u221
- โน้ตแพดพลัสพลัส เวอร์ชัน 7.7.1 (Notepad++ v7.7.1)

ภาษาที่ใช้พัฒนา

- ภาษาจาวา (Java Language)
- ภาษาเอกซ์เอ็มแอล (XML Language)

บทที่ 5

การทดสอบเครื่องมือการสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์

ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือการสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นมานั้น สามารถทำงานได้ถูกต้องและตรงตามข้อกำหนดที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ แนวทางในการทดสอบเครื่องมือ การทดสอบเครื่องมือกับกรณีศึกษา โดยจะทดสอบเครื่องมือจาก 4 กรณีศึกษาได้แก่ รูปแบบแถวคอยทั่วไป กระบวนการผลิตตุ๊กตา กระบวนการผลิตธนบัตร กระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบเครื่องมือ โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

5.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลอง เชิงรูปนัยของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ โดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) ฮาร์ดแวร์

เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก

- หน่วยประมวลผล Intel(R) Core (TM) i5-4250U CPU @ 1.30GHz 1.90Hz
- หน่วยความจำสำรอง (RAM) กิกะไบต์ 4.00 กิกะไบต์ (4.00 GB)
- ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) 256 กิกะไบต์ เอสเอสดี (256 GB SSD)

2) ซอฟต์แวร์

ระบบปฏิบัติการ

- ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดวส์ 10 โปร (Microsoft Windows 10 Pro)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- Browser: Firefox Quantum 69.0.3 (64 บิต)
- โน้ตแพดพลัสพลัส เวอร์ชัน 7.7.1 (Notepad++ v7.7.1)
- PIPE : Platform Independent Petri net Editor v4.3.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 แนวทางในการทดสอบเครื่องมือ

1) เตรียมข้อมูลนำเข้า โดยการจัดเตรียมข้อมูลของแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการให้อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) นำเข้าข้อมูลแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการให้อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอลที่ได้จากข้อ 1)
3) เครื่องมือสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากการนำเข้า ข้อ 2)
4) ได้ข้อมูลนำออกเป็นแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล
5) ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ในข้อ 4) โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

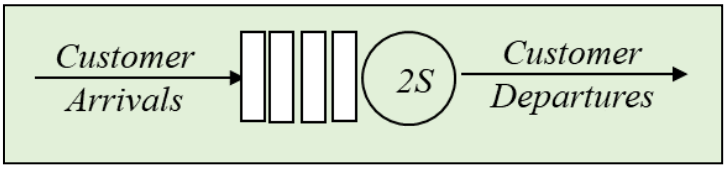
5.3 การทดสอบเครื่องมือและสรุปผลการทดสอบเครื่องมือ

การทดสอบเครื่องมือเป็นเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของเครื่องมือว่าสามารถแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ได้ถูกต้องตรงตามผลลัพธ์ที่คาดหวังไว้หรือไม่ โดยใช้ 4 กรณีศึกษา ได้แก่ รูปแบบแถวคอยทั่วไป กระบวนการผลิตตุ๊กตา กระบวนการผลิตธนบัตร กระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 การทดสอบโดยใช้รูปแบบแถวคอยทั่วไป ได้แก่

1) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีแถวคอยขั้นตอนเดียว
2) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว
3) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ
4) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว
5) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ

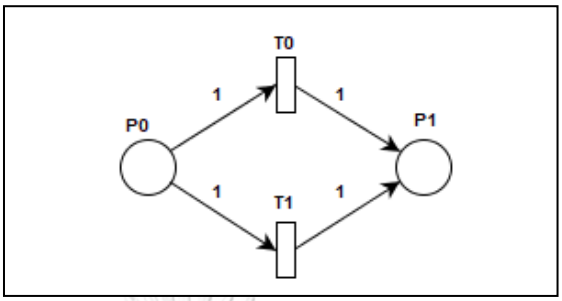
1) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ



รูปที่ 5.1 แถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ

จากรูปที่ 5.1 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.2

ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของการแปลงแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ

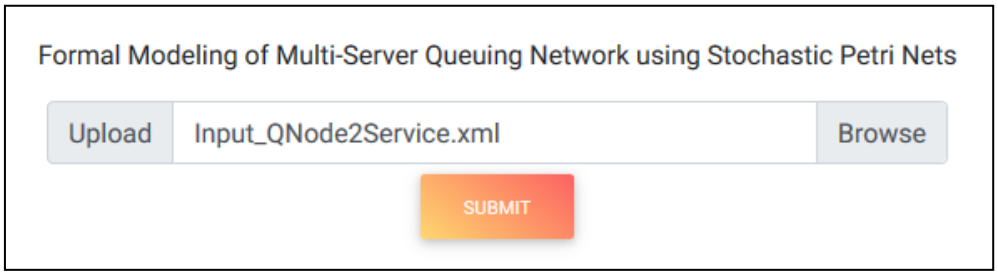
ขั้นตอนการทดสอบ

1) เตรียมข้อมูลนำเข้า โดยการจัดเตรียมข้อมูลของแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการให้อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

```xml
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<queue>
    <waitingLines>
        <waitingLine>
            <seq>0</seq>
            <id>P0</id>
        </waitingLine>
        <waitingLine>
            <seq>1</seq>
            <id>P1</id>
        </waitingLine>
    </waitingLines>
    <services>
        <service>
            <id>T0</id>
            <lefts>
                <left>P0</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P1</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T1</id>
            <lefts>
                <left>P0</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P1</right>
            </rights>
        </service>
 </services>
</queue>
```

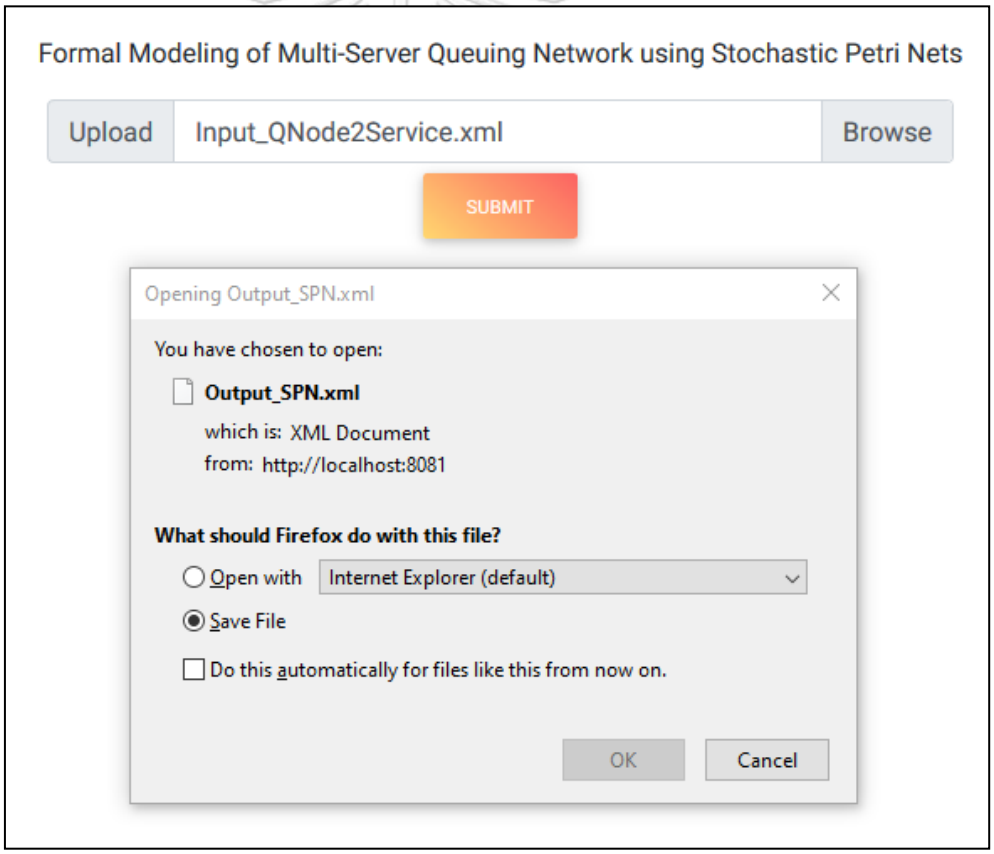
รูปที่ 5.3 ข้อมูลนำเข้าในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอลของแถวคอยขั้นตอนเดียว 2 หน่วยบริการ

2) นำเข้าข้อมูลแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการให้อยู่ในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอลที่ได้จากข้อ 1)



รูปที่ 5. 4 หน้าจอนำเข้าข้อมูลแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการในรูปเอกสาร์เอกซ์เอ็มแอล

3) เครื่องมือสร้างสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ของเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการ จากการนำเข้า ข้อ 2)



รูปที่ 5.5 หน้าจอแสดงผล กรณีนำออกแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

4) ได้ข้อมูลนำออกเป็นแฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล

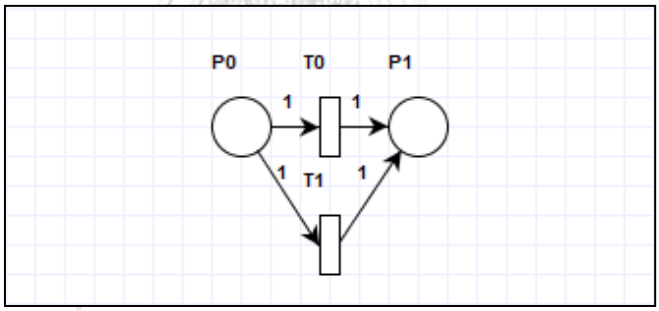
```
<pnml>
  <net id="Net-One" type="P/T net">
    <token id="Default" enabled="true" red="0" green="0" blue="0"/>
    <place id="P0">
      <graphics>
        <position x="210" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P0</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P1">
      <graphics>
        <position x="300" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P1</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <transition id="T0">
      <graphics>
        <position x="255" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T0</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
                  y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
```

```
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T1">
      <graphics>
        <position x="255" y="150"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T1</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
                  y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <arc id="P0 to T0" source="P0" target="T0">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T0 to P1" source="T0" target="P1">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
```

```
120     <arc id="P0 to T1" source="P0" target="T1">
121       <graphics/>
122       <inscription>
123         <value>Default,1</value>
124         <graphics/>
125       </inscription>
126       <tagged>
127         <value>false</value>
128       </tagged>
129       <type value="normal"/>
130     </arc>
131     <arc id="T1 to P1" source="T1" target="P1">
132       <graphics/>
133       <inscription>
134         <value>Default,1</value>
135         <graphics/>
136       </inscription>
137       <tagged>
138         <value>false</value>
139       </tagged>
140       <type value="normal"/>
141     </arc>
142   </net>
143 </pnml>
```

รูปที่ 5.6 แฟ้มข้อมูลผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ในรูปแบบภาษาเอกซ์เอ็มแอล

5) ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์ ในข้อ 4) โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

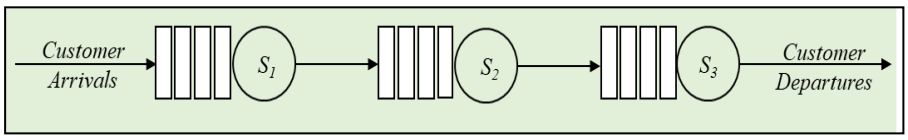


รูปที่ 5. 7 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE

ขั้นตอนการทดสอบของกรณีที่เหลือจะเหมือนกับขั้นตอนการทดสอบของกรณีแรก สิ่งที่แตกต่างกัน คือ ข้อมูลนำเข้า ผลลัพธ์ที่คาดหวัง และผลลัพธ์ที่ได้จริง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.8 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว

จากรูปที่ 5.8 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า เครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว โดยเริ่มจากการมาถึงของลูกค้า (Customer Arrivals) เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 1 แล้วเข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 โดยแต่ละขั้นตอนมี 1 หน่วยบริการ เสร็จแล้วก็ออกจากระบบหรือจากไป (Customer Departures) โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1

P1 คือ ขั้นตอนที่ 2

P2 คือ ขั้นตอนที่ 3

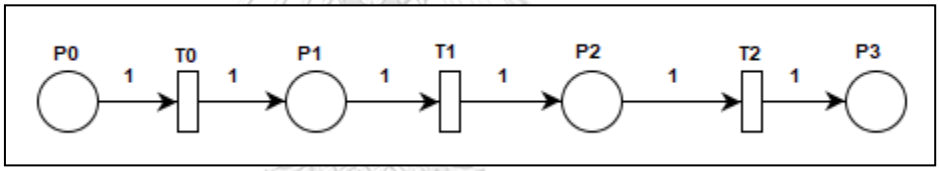
P3 คือ การจากไป

T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1

T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2

T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3

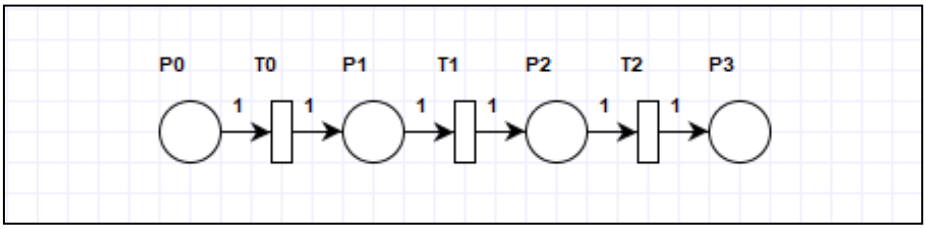
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.10 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

ผลลัพธ์ที่ได้จริง

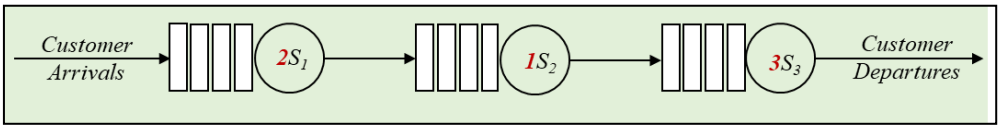


รูปที่ 5.10 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหน่วยบริการเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ

ข้อมูลนำเข้า



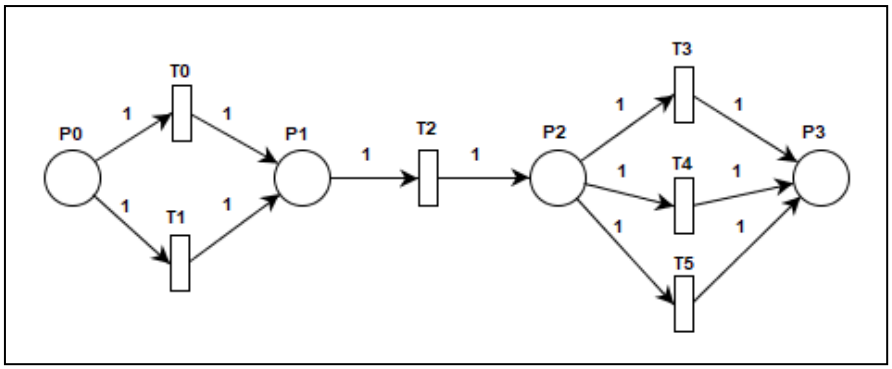
รูปที่ 5.11 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ

จากรูปที่ 5.11 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ โดยเริ่มจาก การมาถึงของลูกค้า (Customer Arrivals) เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 1 แล้วเข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 โดยขั้นตอนที่ 1 มี 2 หน่วยบริการ ขั้นตอนที่ 2 มี 1 หน่วยบริการ ขั้นตอนที่ 3 มี 3 หน่วยบริการ เสร็จแล้วก็ออกจากระบบหรือจากไป (Customer Departures) โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.12 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1
P1 คือ ขั้นตอนที่ 2
P2 คือ ขั้นตอนที่ 3
P3 คือ การจากไป
T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1
T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1
T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2
T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3
T4 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3
T5 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

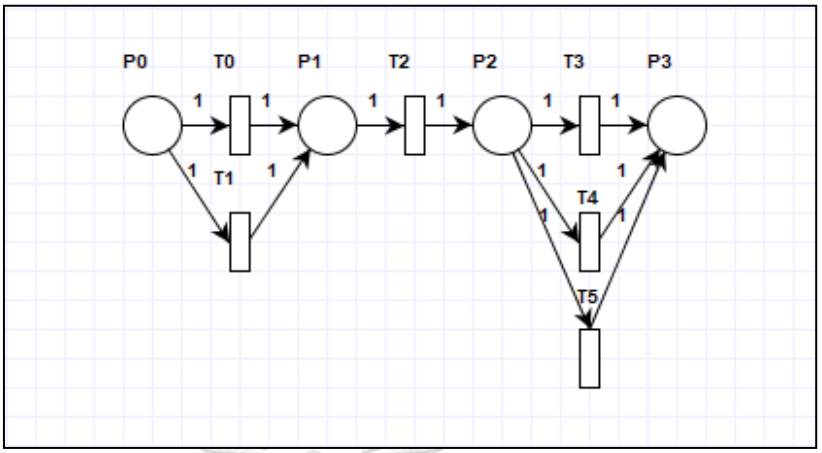
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.12 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.13 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

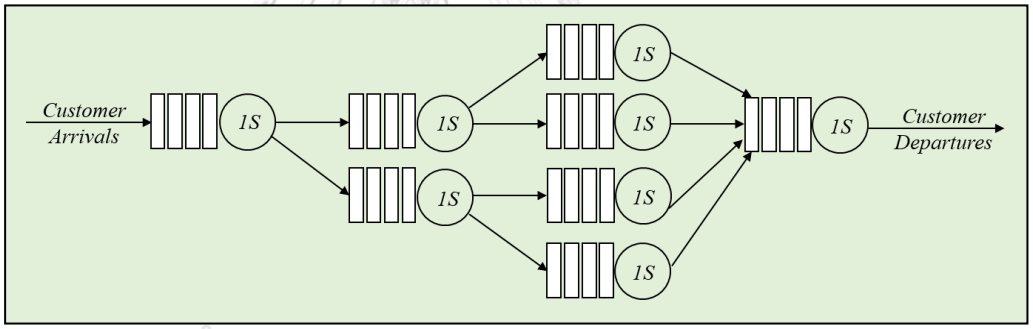
ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.13 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบหลายหน่วยบริการ

4) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.14 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว

จากรูปที่ 5.14 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียวโดยเริ่มจาก การมาถึงของลูกค้า (Customer Arrivals) เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 1 แล้วเข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 2 หรือขั้นตอนที่ 3 แล้วจากขั้นตอนที่ 2 เข้ารับบริการต่อที่ขั้นตอนที่ 4 หรือขั้นตอนที่ 5 จากขั้นตอนที่ 3 เข้ารับบริการต่อที่โดยขั้นตอนที่ 6 หรือขั้นตอนที่ 7 หลังจากเข้ารับบริการขั้นตอนที่ 4-7 แล้ว เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 8 เสร็จแล้วก็ออกจากระบบหรือจากไป (Customer Departures) โดยแต่ละขั้นตอนมี 1 หน่วยบริการ ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.15 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1

P1 คือ ขั้นตอนที่ 2

P2 คือ ขั้นตอนที่ 3

P3 คือ ขั้นตอนที่ 4

P4 คือ ขั้นตอนที่ 5

P5 คือ ขั้นตอนที่ 6

P6 คือ ขั้นตอนที่ 7

P7 คือ ขั้นตอนที่ 8

P8 คือ การจากไป

T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1

T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2

T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3

T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4

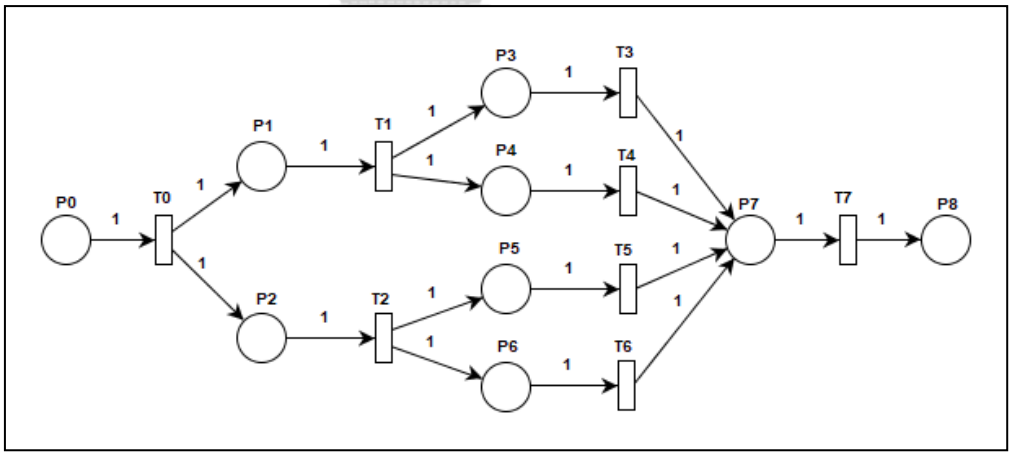
T4 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 5

T5 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6

T6 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 7

T7 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 8

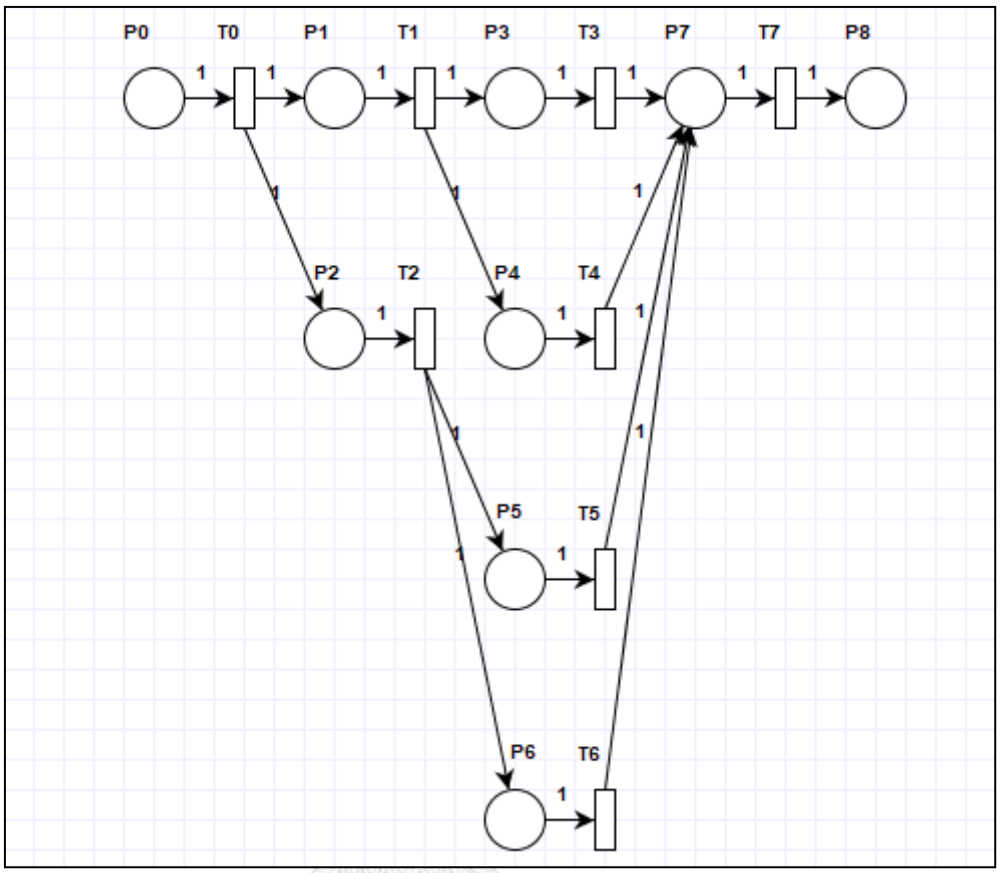
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.15 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.16 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

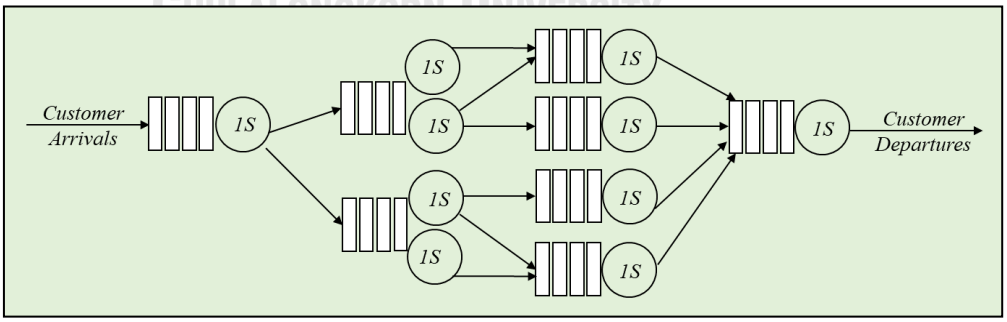
ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.16 ผลลัพธ์ที่ได้จริงกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียว

5) การทดสอบข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.17 ข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ

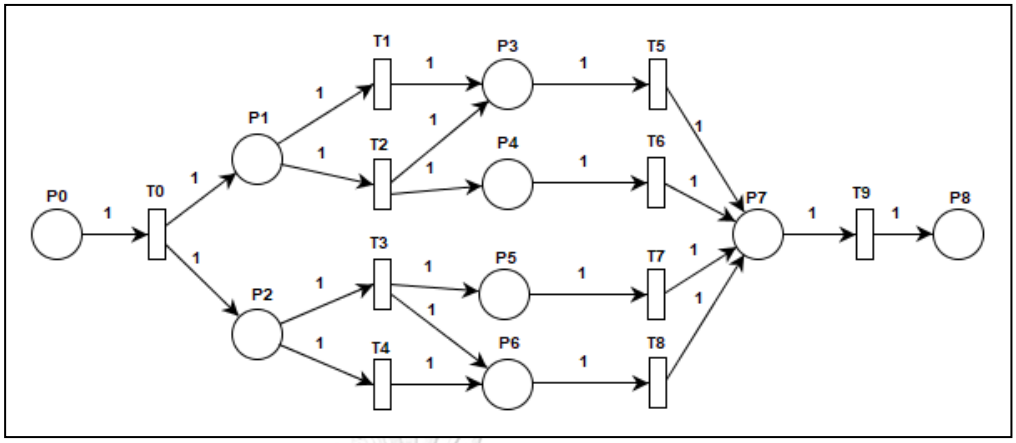
จากรูปที่ 5.17 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หน่วยบริการเดียวโดยเริ่มจาก การมาถึงของลูกค้า (Customer Arrivals) เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 1 ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ แล้วเข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 2 หรือขั้นตอนที่ 3 ซึ่งทั้งสองขั้นตอนมี 2

หน่วยบริการแล้วจากขั้นตอนที่ 2 เข้ารับบริการต่อที่ขั้นตอนที่ 4 หรือขั้นตอนที่ 5 จากขั้นตอนที่ 3 เข้ารับบริการต่อที่โดยขั้นตอนที่ 6 หรือขั้นตอนที่ 7 หลังจากเข้ารับบริการขั้นตอนที่ 4-7 แล้ว เข้ารับบริการที่ขั้นตอนที่ 8 เสร็จแล้วก็ออกจากระบบหรือจากไป (Customer Departures) โดยขั้นตอนที่ 4-8 มีขั้นตอนละ 1 หน่วยบริการ ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.18 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1
P1 คือ ขั้นตอนที่ 2
P2 คือ ขั้นตอนที่ 3
P3 คือ ขั้นตอนที่ 4
P4 คือ ขั้นตอนที่ 5
P5 คือ ขั้นตอนที่ 6
P6 คือ ขั้นตอนที่ 7
P7 คือ ขั้นตอนที่ 8
P8 คือ การจากไป
T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1
T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1
T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2
T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2
T4 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3
T5 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4
T6 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 5
T7 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6
T8 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 7
T9 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

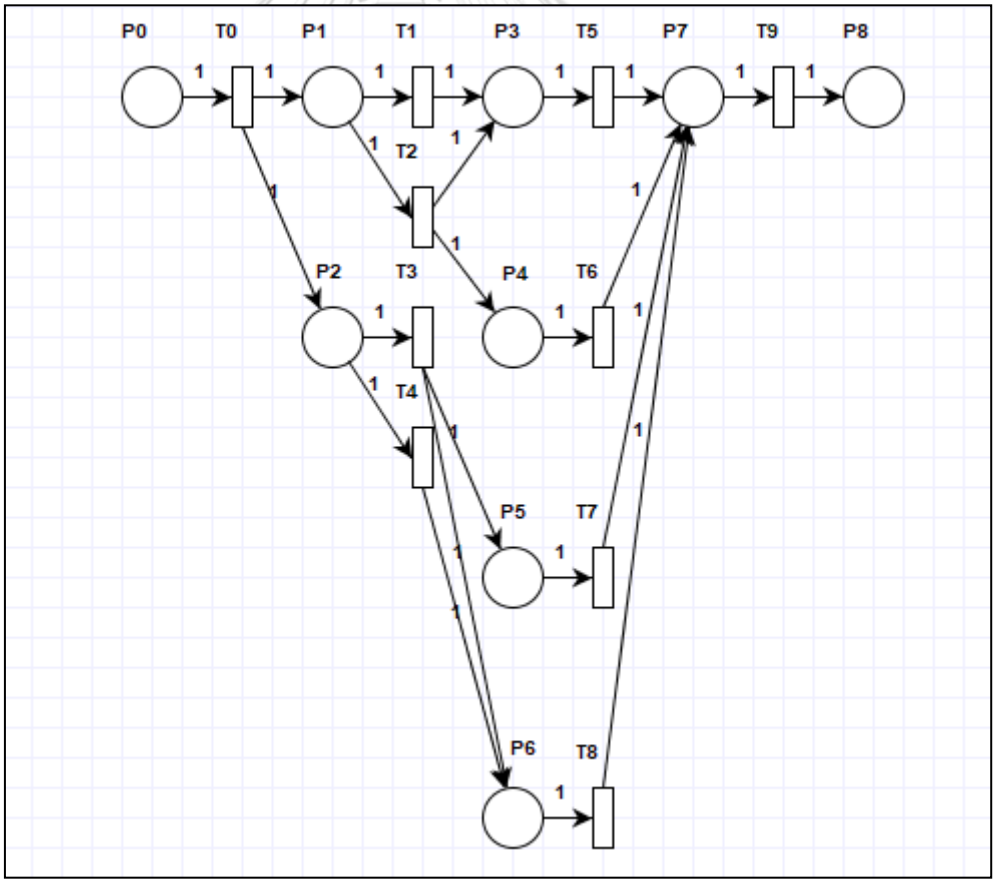
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.18 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.19 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

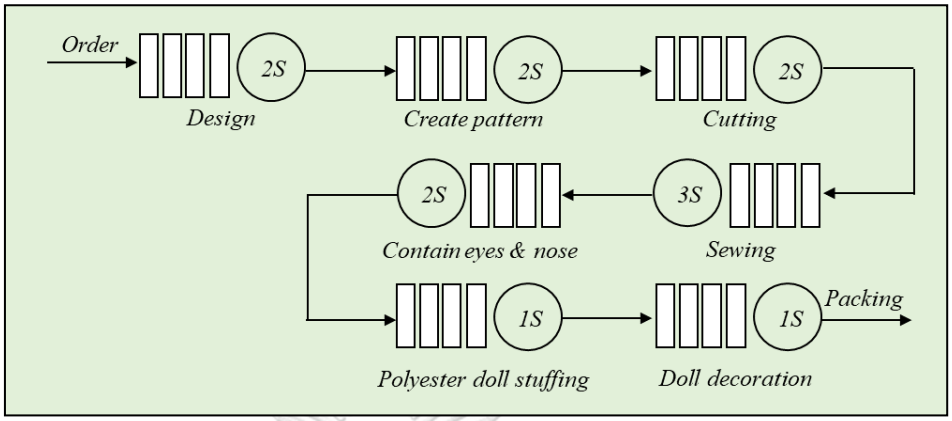
ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.19 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีเครือข่ายแถวคอย แบบมีทางแยก หลายหน่วยบริการ

5.3.2 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.20 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

จากรูปที่ 5.20 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา ซึ่งมี 7 ขั้นตอนโดยเริ่มจากมี Order เข้ามาแล้ว

ขั้นตอนแรกทำการ Design ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 2 Create pattern ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 3 Cutting ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 4 Contain eyes & nose ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 5 Sewing ซึ่งมี 3 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 6 Polyester doll stuffing ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ และ

ขั้นตอนที่ 7 Doll decoration ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

เสร็จแล้วนำไป Packing โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.21 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1 Design

P1 คือ ขั้นตอนที่ 2 Create pattern

P2 คือ ขั้นตอนที่ 3 Cutting

P3 คือ ขั้นตอนที่ 4 Contain eyes & nose

P4 คือ ขั้นตอนที่ 5 Sewing

P5 คือ ขั้นตอนที่ 6 Polyester doll stuffing

P6 คือ ขั้นตอนที่ 7 Doll decoration

P7 คือ นำไป Packing

T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1 Design

T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1 Design

T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create pattern

T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create pattern

T4 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3 Cutting

T5 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3 Cutting

T6 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4 Contain eyes & nose

T7 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4 Contain eyes & nose

T8 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4 Contain eyes & nose

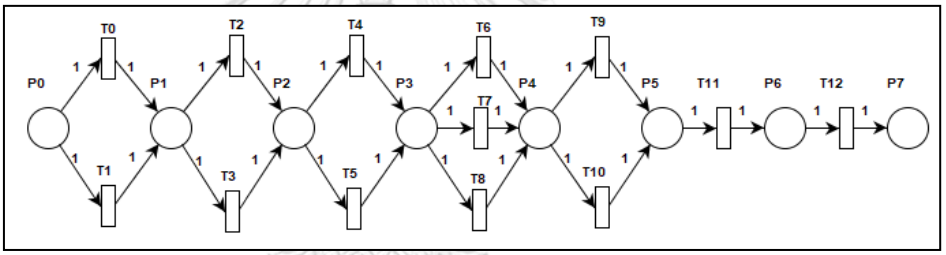
T9 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 5 Sewing

T10 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 5 Sewing

T11 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6 Polyester doll stuffing

T12 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 7 Doll decoration

ผลลัพธ์ที่คาดหวัง

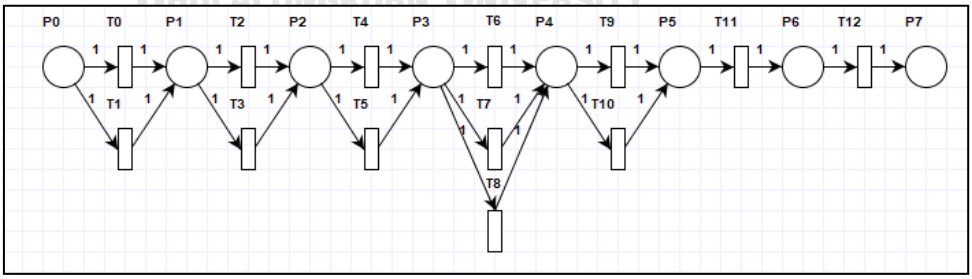


รูปที่ 5.21 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.22 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

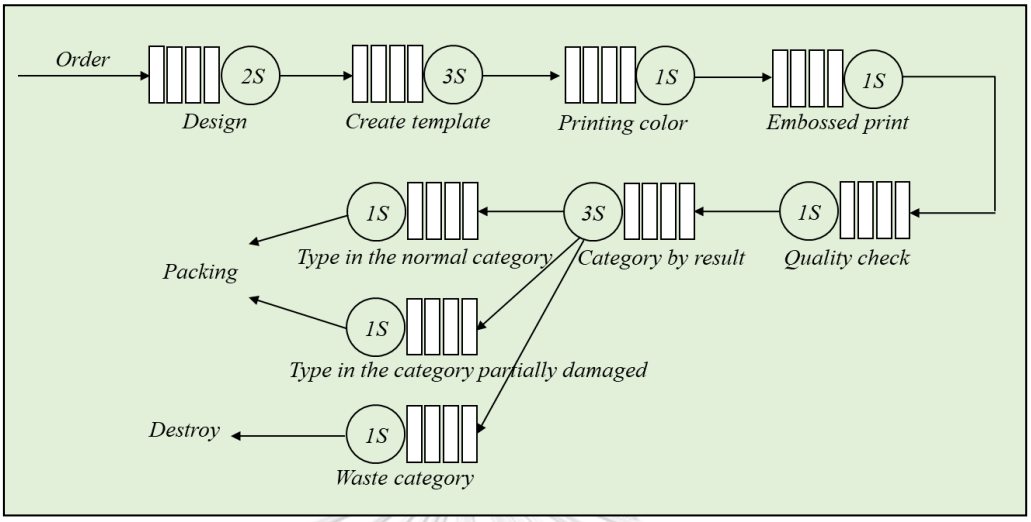
ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.22 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

5.3.3 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.23 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

จากรูปที่ 5.25 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร ซึ่งมี 9 ขั้นตอนโดยเริ่มจากมี Order เข้ามาแล้ว

ขั้นตอนแรกทำการ Design ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 2 Create template ซึ่งมี 3 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 3 Printing color ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 4 Embossed print ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 5 Quality check ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 6 Category by result ซึ่งมี 3 หน่วยบริการ แล้วเลือกไปขั้นตอนที่ 6 ขั้นตอนที่ 7 หรือขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 7 Type in the normal category ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 8 Type in the category partially ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

หลังจากเสร็จจากขั้นตอนที่ 7 หรือขั้นตอนที่ 8 แล้วนำไป Packing หรือ

ขั้นตอนที่ 9 Waste category ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ เสร็จแล้วนำไป Destroy

โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.24 โดยที่

P0 คือ ขั้นตอนที่ 1 Design

P1 คือ ขั้นตอนที่ 2 Create template

P2 คือ ขั้นตอนที่ 3 Printing color

P3 คือ ขั้นตอนที่ 4 Embossed print

P4 คือ ขั้นตอนที่ 5 Quality check

P5 คือ ขั้นตอนที่ 6 Category by result

P6 คือ ขั้นตอนที่ 7 Type in the normal category

P7 คือ ขั้นตอนที่ 8 Type in the category partially

P8 คือ ขั้นตอนที่ 9 Waste category

P9 คือ นำไป Packing

P10 คือ นำไป Destroy

T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1 Design

T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1 Design

T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create template

T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create template

T4 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create template

T5 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3 Printing color

T6 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 4 Embossed print

T7 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 5 Quality check

T8 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6 Category by result

T9 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6 Category by result

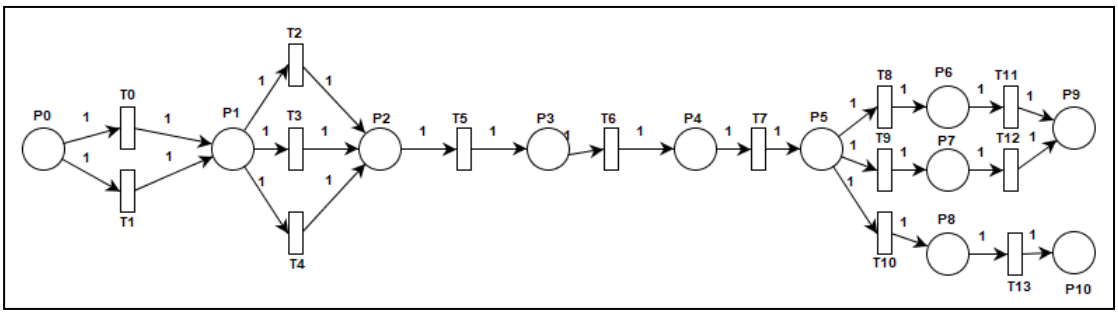
T10 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 6 Category by result

T11 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 7 Type in the normal category

T12 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 8 Type in the category partially

T13 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 9 Waste category

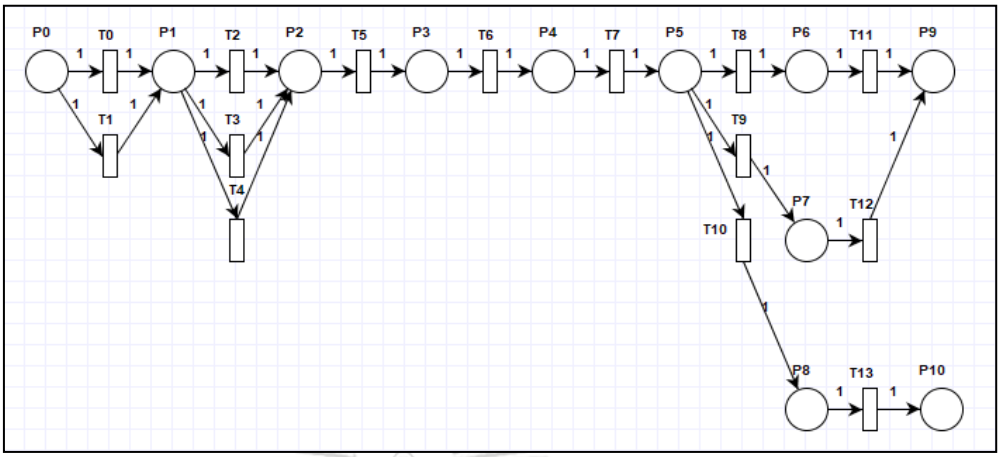
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.24 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.25 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

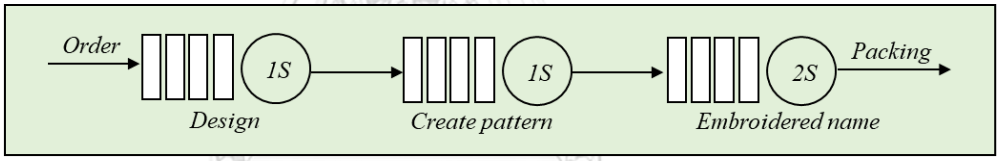
ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.25 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

5.3.4 การทดสอบโดยใช้กรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

ข้อมูลนำเข้า



รูปที่ 5.26 ข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

จากรูปที่ 5.26 แสดงถึงข้อมูลนำเข้า กรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส ซึ่งมี 3 ขั้นตอนโดยเริ่มจากมี Order เข้ามาแล้ว

ขั้นตอนแรกทำการ Design ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 2 Create pattern ซึ่งมี 1 หน่วยบริการ

ขั้นตอนที่ 3 Embroidered name ซึ่งมี 2 หน่วยบริการ

เสร็จแล้วนำไป Packing โดยผลลัพธ์ที่คาดหวังจากกฎการจับคู่ แสดงดังรูปที่ 5.27 โดยที่

P0 Design คือ ขั้นตอนที่ 1 Design

P1 Create pattern คือ ขั้นตอนที่ 2 Create pattern

P2 Embroidered name คือ ขั้นตอนที่ 3 Embroidered name

P3 คือ นำไป Packing

T0 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 1 Design

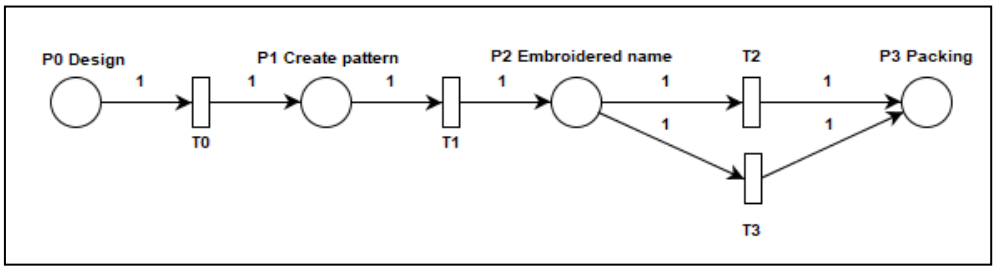
T1 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 2 Create pattern

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

T2 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3 Embroidered name

T3 คือ หน่วยบริการของขั้นตอนที่ 3 Embroidered name

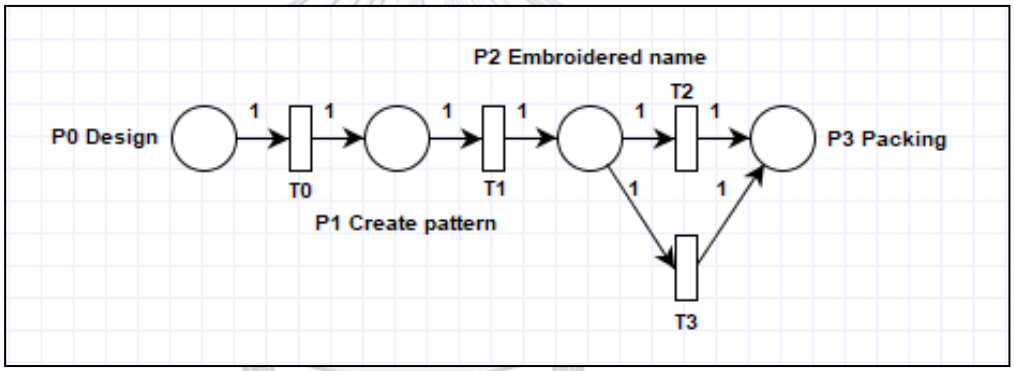
ผลลัพธ์ที่คาดหวัง



รูปที่ 5.27 ผลลัพธ์ที่คาดหวังของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

หลังจากทำการแปลงแล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้จริงดังรูป 5.28 ซึ่งถูกต้องตรงกับผลลัพธ์ที่คาดหวัง

ผลลัพธ์ที่ได้จริง



รูปที่ 5.28 ผลลัพธ์ที่ได้จริงของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

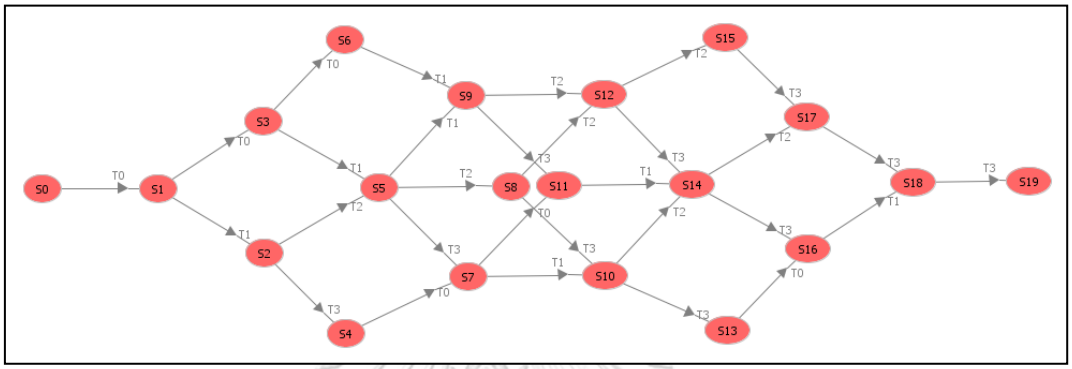
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.5 สรุปผลการทดสอบการทดสอบเครื่องมือ

จากการทดสอบการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ โดยใช้ 4 กรณีศึกษาได้แก่ รูปแบบแถวคอยทั่วไป กระบวนการผลิตตุ๊กตา กระบวนการผลิตธนบัตร กระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาสนั้น พบว่าเครื่องมือสามารถทำงานถูกต้องตามผลลัพธ์ที่คาดหวังไว้ทั้ง 4 กรณีศึกษา

5.4 สร้างริชอะบิลิตีเซต และ ริชอะบิลิตีกราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE

หลังจากที่ได้ทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์แล้ว ผู้วิจัยจะสร้างริชอะบิลิตีเซตและ ริชอะบิลิตีกราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตส์จากโปรแกรมจำลอง PIPE โดยใช้กรณีกระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาสจากข้อ 5.3.4 ดังตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 ตัวอย่างริชอะบิลิตีกราฟ

5.5 คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นจากข้อ 5.4

เมื่อได้ริชอะบิลิตีเซตและริชอะบิลิตีกราฟแล้ว ผู้วิจัยจะนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากโปรแกรมไมโครซอฟท์ เอกซ์เซล (Microsoft Excel) ตัวอย่างดังรูปที่ 5.30 และตารางที่ 5.1 แสดงตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตที่ได้จากโปแกรมจำลอง PIPE และค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

K3 | =EXPON.DIST(J3,H3,TRUE)

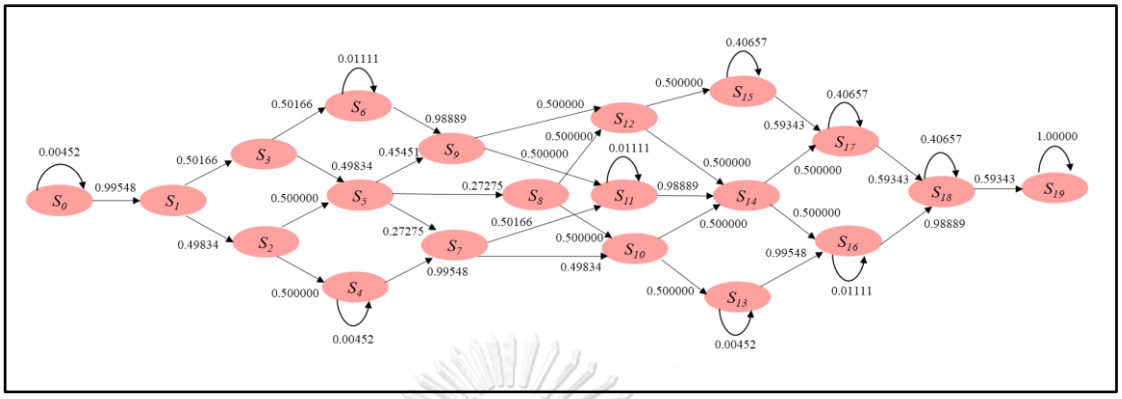
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	มาร์กกิงปัจจุบัน	เซตมาร์กกิงปัจจุบัน				มาร์กกิงถัดไป	เหตุการณ์ที่ฟายริง	Lambda	Mean	X	CDF (No Conflict)	CDF (Conflict)
2		P0 Design	P1 Create pattern	P2 Embroidered name	P3 Packing							
3	M0	3	0	0	0	M1	T0	0.06	15	90	0.99548	-

รูปที่ 5.30 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็น โดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

5.6 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟจาก ข้อ 5.4 และ ข้อ 5.5

เนื่องจากริชอะบิลิตีกราฟนั้นไม่ได้แสดงค่าความน่าจะเป็น ดังนั้นผู้วิจัยจะนำและริชอะบิลิตีกราฟที่ได้จากข้อ 5.4 และตารางค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากข้อ 5.5 มาสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟโดยเป็น

กราฟถอดแบบ (Isomorphic graphs) มาจากริชอะบิลิตีกราฟ เพื่อแสดงค่าความน่าจะเป็นจาก State ปัจจุบันไปยัง State ถัดไปได้ ตัวอย่างดังรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 ตัวอย่างทรานสิชันไดอะแกรมของห่วงโซ่มาร์คอฟ

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น

มาร์กกิงปัจจุบัน	เซตมาร์กกิงปัจจุบัน				มาร์กกิงถัดไป	ทรานสิชันที่ฟายริง	λ	μ	X	CDF (No Conflict)	CDF (Conflict)
	P0 Design	P1 Create pattern	P2 Embroidered name	P3 Packing							
M0	3	0	0	0	M1	T0	0.06	15	90	0.99548	-
M1	2	1	0	0	M2	T1	0.05	20	90	0.98889	0.49834
M1	2	1	0	0	M3	T0	0.06	15	90	0.99548	0.50166
M2	2	0	1	0	M4	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M2	2	0	1	0	M5	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M3	1	2	0	0	M5	T1	0.05	20	90	0.98889	0.49834
M3	1	2	0	0	M6	T0	0.06	15	90	0.99548	0.50166
M4	2	0	0	1	M7	T0	0.06	15	90	0.99548	-
M5	1	1	1	0	M7	T3	0.01	60	90	0.59343	0.27275
M5	1	1	1	0	M8	T2	0.01	60	90	0.59343	0.27275
M5	1	1	1	0	M9	T1	0.05	20	90	0.98889	0.45451
M6	0	3	0	0	M9	T1	0.05	20	90	0.98889	-
M7	1	1	0	1	M10	T1	0.05	20	90	0.98889	0.49834
M7	1	1	0	1	M11	T0	0.06	15	90	0.99548	0.50166
M8	1	0	2	0	M10	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M8	1	0	2	0	M12	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M9	0	2	1	0	M11	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M9	0	2	1	0	M12	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M10	1	0	1	1	M13	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5. 1 ตัวอย่างริชอะบิลิตีเซตและค่าความน่าจะเป็น (ต่อ)

มาร์กกิงปัจจุบัน	เซตมาร์กกิงปัจจุบัน				มาร์กกิงถัดไป	ทรานสิชันที่ฟายริง	λ	μ	X	CDF (No Conflict)	CDF (Conflict)
	P0 Design	P1 Create pattern	P2 Embroidered name	P3 Packing							
M10	1	0	1	1	M14	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M11	0	2	0	1	M14	T1	0.05	20	90	0.98889	-
M12	0	1	2	0	M14	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M12	0	1	2	0	M15	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M13	1	0	0	2	M16	T0	0.06	15	90	0.99548	-
M14	0	1	1	1	M16	T3	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M14	0	1	1	1	M17	T2	0.01	60	90	0.59343	0.50000
M15	0	0	3	0	M17	T3	0.01	60	90	0.59343	-
M16	0	1	0	2	M18	T1	0.05	20	90	0.98889	-
M17	0	0	2	1	M18	T3	0.01	60	90	0.59343	-
M18	0	0	1	2	M19	T3	0.01	60	90	0.59343	-
M19	0	0	0	3	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 5. 2 แสดงตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทางของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

Path	Path Name	Prob.
1	S0 > S1 > S2 > S4 > S7 > S10 > S13 > S16 > S18 > S19	0.03594
2	S0 > S1 > S2 > S4 > S7 > S10 > S14 > S16 > S18 > S19	0.01805
3	S0 > S1 > S2 > S4 > S7 > S10 > S14 > S17 > S18 > S19	0.01083
4	S0 > S1 > S2 > S4 > S7 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.03594
5	S0 > S1 > S2 > S4 > S7 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.02157
6	S0 > S1 > S2 > S5 > S7 > S10 > S13 > S16 > S18 > S19	0.00985
7	S0 > S1 > S2 > S5 > S7 > S10 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00495
8	S0 > S1 > S2 > S5 > S7 > S10 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00297
9	S0 > S1 > S2 > S5 > S7 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00985
10	S0 > S1 > S2 > S5 > S7 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00591
11	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S10 > S13 > S16 > S18 > S19	0.00988
12	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S10 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00496
13	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S10 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00298
14	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S12 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00496
15	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S12 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00298
16	S0 > S1 > S2 > S5 > S8 > S12 > S15 > S17 > S18 > S19	0.00353
17	S0 > S1 > S2 > S5 > S9 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.01636
18	S0 > S1 > S2 > S5 > S9 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00982

ตารางที่ 5. 2 แสดงตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทางของกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส (ต่อ)

Path	Path Name	Prob.
19	S0 > S1 > S2 > S5 > S9 > S12 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00827
20	S0 > S1 > S2 > S5 > S9 > S12 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00496
21	S0 > S1 > S2 > S5 > S9 > S12 > S15 > S17 > S18 > S19	0.00589
22	S0 > S1 > S3 > S5 > S7 > S10 > S13 > S16 > S18 > S19	0.00982
23	S0 > S1 > S3 > S5 > S7 > S10 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00493
24	S0 > S1 > S3 > S5 > S7 > S10 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00296
25	S0 > S1 > S3 > S5 > S7 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00982
26	S0 > S1 > S3 > S5 > S7 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00589
27	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S10 > S13 > S16 > S18 > S19	0.00985
28	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S10 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00495
29	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S10 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00297
30	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S12 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00495
31	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S12 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00297
32	S0 > S1 > S3 > S5 > S8 > S12 > S15 > S17 > S18 > S19	0.00352
33	S0 > S1 > S3 > S5 > S9 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.01630
34	S0 > S1 > S3 > S5 > S9 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00978
35	S0 > S1 > S3 > S5 > S9 > S12 > S14 > S16 > S18 > S19	0.00824
36	S0 > S1 > S3 > S5 > S9 > S12 > S14 > S17 > S18 > S19	0.00495
37	S0 > S1 > S3 > S5 > S9 > S12 > S15 > S17 > S18 > S19	0.00587
38	S0 > S1 > S3 > S6 > S9 > S11 > S14 > S16 > S18 > S19	0.03570
39	S0 > S1 > S3 > S6 > S9 > S11 > S14 > S17 > S18 > S19	0.02143
40	S0 > S1 > S3 > S6 > S9 > S12 > S14 > S16 > S18 > S19	0.01805
41	S0 > S1 > S3 > S6 > S9 > S12 > S14 > S17 > S18 > S19	0.01083
42	S0 > S1 > S3 > S6 > S9 > S12 > S15 > S17 > S18 > S19	0.01286

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากได้ริชอะบิลิตีเซตและริชอะบิลิตีกราฟและนำมาหาค่าความน่าจะเป็น และสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟได้แล้ว ผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถนำมาวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้มารับบริการที่หน่วยให้บริการจะสามารถแล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยจะขอยกตัวอย่างจากกรณีศึกษากระบวนการผลิตการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส ซึ่งจะต้องหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจาก S0 ถึง S19 โดยแต่ละเส้นทางสามารถหาค่าความน่าจะเป็นได้จากการนำค่าความน่าจะเป็นแต่ละมาร์กกิงมาคูณกัน เช่น เส้นทางที่ 1 นำค่าความน่าจะเป็นของ (S0->S1) x (S1->S2) x (S2->S4) x (S4->S7) x (S7->S10) x (S10->S13) x (S13->S16) x (S16->S18) x (S18->S19) จะได้ผลลัพธ์ค่าความน่าจะเป็นดังตารางข้างบน หลังจากนั้นนำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทางมารวมกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโอกาสที่ผู้มารับบริการที่หน่วยให้บริการจะสามารถแล้วเสร็จ ภายในระยะเวลาที่กำหนดได้ มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.43708 หรือคิดเป็น 43.71 % โดยประมาณ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาค้นคว้า วิเคราะห์ ออกแบบกฎการแปลงและพัฒนาเครื่องมือ สามารถสรุปผล ข้อจำกัดของเครื่องมือ และแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต โดยมี รายละเอียดดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกฎการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ และเครื่องมือการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ เพื่อผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยที่สามารถรองรับหน่วยให้บริการที่มีหลายหน่วยบริการ โดยการคำนวณค่าความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้มารับบริการที่หน่วยให้บริการจะสามารถแล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดได้หรือไม่ เพื่อหาจำนวนหน่วยให้บริการหรือผู้ให้บริการที่เหมาะสมกับผู้เข้ารับบริการได้ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการนิยามและออกแบบกฎการแปลง หลังจากนั้นได้พัฒนาเครื่องมือการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์ และทำการทดสอบเครื่องมือโดยใช้กรณีศึกษา และทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์โดยใช้โปรแกรมจำลอง PIPE และได้ทำการสร้างริชอะบิลิตีเซตและริชอะบิลิตีกราฟจากโปรแกรมจำลอง PIPE หลังจากนั้นคำนวณหาค่าความน่าจะเป็น และสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟโดยเป็นกราฟถอดแบบมาจากริชอะบิลิตีกราฟ เพื่อแสดงค่าความน่าจะเป็นจาก State ปัจจุบันไปยัง State ถัดไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1) เครื่องมือรองรับข้อมูลนำเข้าที่เป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น
2) เครื่องมือรองรับเกณฑ์ในการให้บริการลูกค้าเป็นแบบ Service in random order เท่านั้น
3) เครื่องมือรองรับการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์เท่านั้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานต่อ

1) พัฒนาเครื่องมือที่สามารถพิจารณาเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้าได้หลากหลายรูปแบบ
2) พัฒนาเครื่องมือที่รองรับในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลต่อหลังจากได้ทำการแปลงเครือข่ายแถวคอยแบบหลายหน่วยบริการไปเป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตส์แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

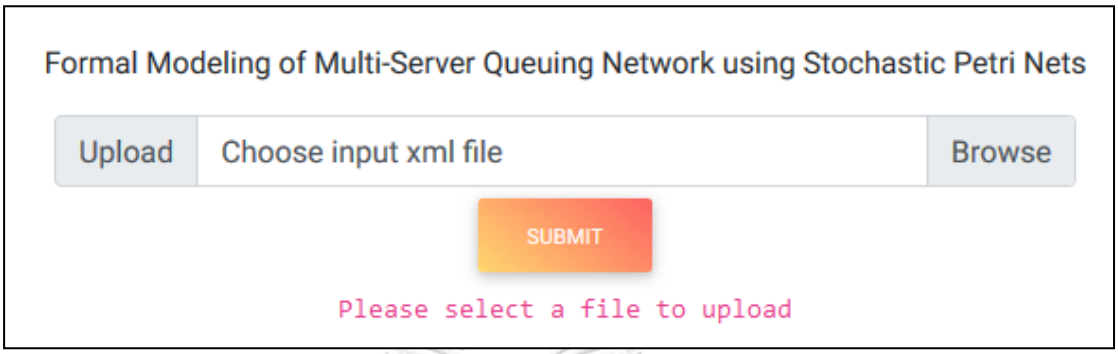
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. Marsan, M., *Stochastic Petri Nets: An Elementary Introduction.* In Lecture Notes in Computer Science. Springer., 1984.
2. Soomanat, K. and W. Vatanawood. *Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic Petri Nets*. in *the 19th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering,Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*. 2018. Busan, South Korea.
3. Walter, J. *Parallel Simulation of Queueing Petri Net Models*. in *the 8th International Conference on Simulation Tools and Techniques*. 2013.
4. Adan, I. and J. Resing, *Queueing Systems. Netherlands*. 2015.
5. Choi, B., *Petri net approaches for modeling, controlling, and validating flexible manufacturing systems.* 1994.
6. Murata, T., *Petri Nets: Properties, Analysis and Applications.* 1989.
7. Bause, F. and P. Kritzinger, *Stochastic Petri Nets: An Introduction to the Theory*. 2002.
8. Stirzaker, D., *Probability and Random Variables: A Beginner's Guide*. 1999.
9. Grinstead, C. and J. Snell, *Introduction to Probability*. 2006.
10. Auckland, D.o.S.U.o., *"Chapter 8: Markov Chains", in COURSE NOTESSTATS 325 Stochastic Processes.* 2014.
11. Myers, D., *An introduction to Markov chains and their applications within finance.* 2017.
12. Balbo, G., *Introduction to Stochastic Petri Nets.* 2001.
13. Kamceva, E., Z. Gacovski, and O. Iliev. *MODELLING OF QUEUES BY USING OF PETRI NET SIMULATOR*. in *8th Conference on Informatics and Information Technology with International Participation (CIIT 2011)*. 2011.
14. Dingle, N. *PIPE2: A Tool for the Performance Evaluation of Generalized Stochastic Petri Nets*. 2009.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

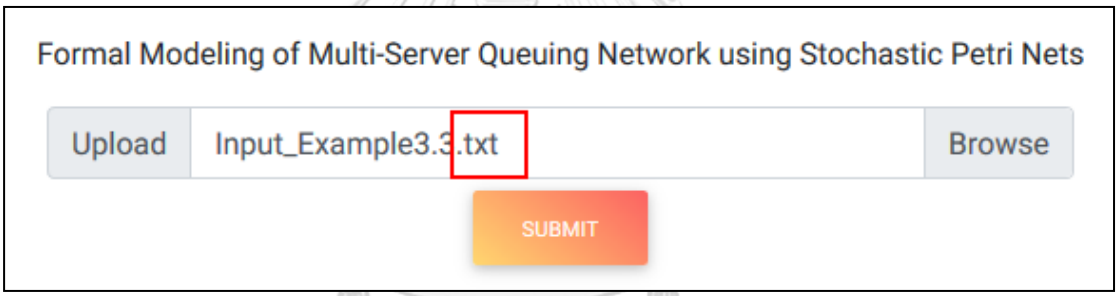
ภาคผนวก

1) ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีกดปุ่ม SUBMIT โดยไม่เลือกแฟ้มข้อมูล



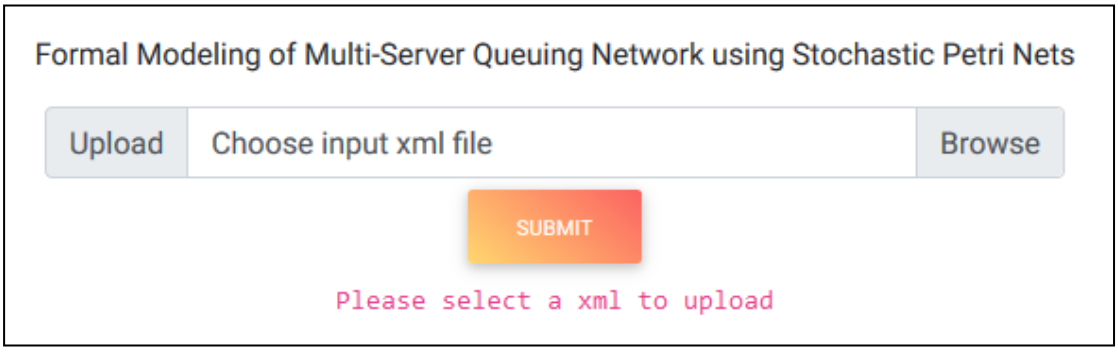
รูปที่ ผ- 1 ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีกดปุ่ม SUBMIT โดยไม่เลือกแฟ้มข้อมูล

2) ตัวอย่างการแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีเลือกแฟ้มข้อมูลที่ไม่ใช่ XML



รูปที่ ผ- 2 ตัวอย่าง กรณีเลือกแฟ้มข้อมูลที่ไม่ใช่ XML

เมื่อกดปุ่ม SUBMIT ระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือนดังรูป



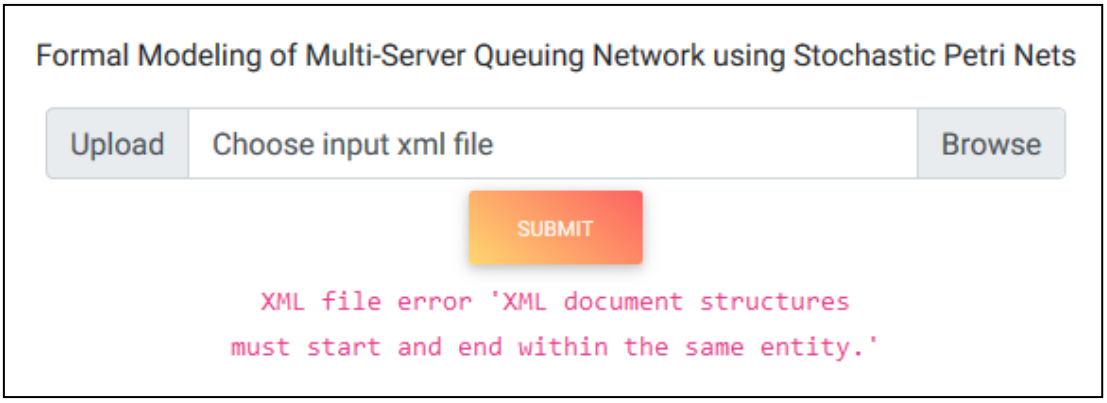
รูปที่ ผ- 3 ตัวอย่าง ระบบแสดงข้อความแจ้งเตือน “Please select a xml to upload”

3) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<queue>
    <waitingLines>
        <waitingLine>
            <seq>0</seq>
            <id>P1</id>
        </waitingLine>
        <waitingLine>
            <seq>1</seq>
            <id>P2</id>
        </waitingLine>
    </waitingLines>
    <services>
        <service>
            <id>T1</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T2</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
</services>
```

รูปที่ ผ- 4 ตัวอย่าง กรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้

เมื่อนำเข้าข้อมูล ระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือนดังรูป



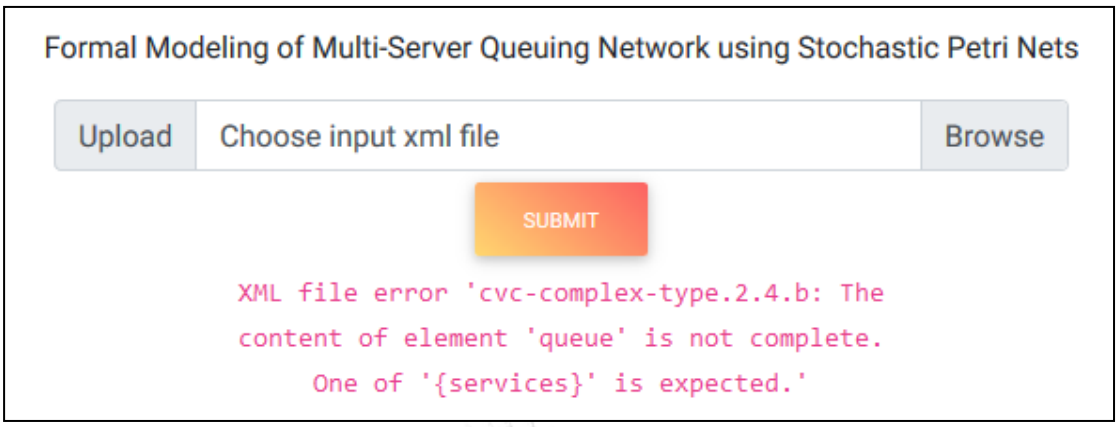
รูปที่ ผ- 5 ตัวอย่างระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือน กรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้

4) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ services

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<queue>
    <waitingLines>
        <waitingLine>
            <seq>0</seq>
            <id>P1</id>
        </waitingLine>
        <waitingLine>
            <seq>1</seq>
            <id>P2</id>
        </waitingLine>
    </waitingLines>
</queue>
```

รูปที่ ผ- 6 ตัวอย่างกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ services

เมื่อนำเข้าข้อมูล ระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือนดังรูป



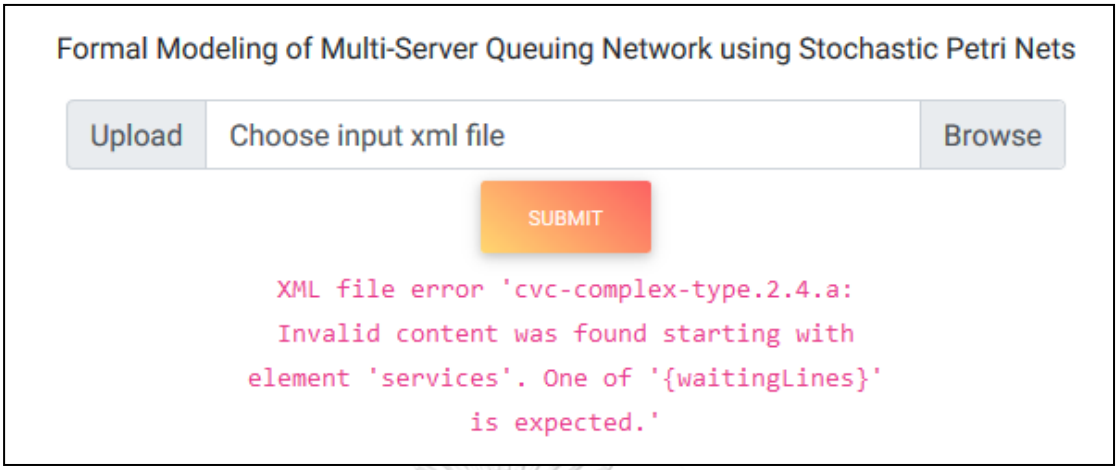
รูปที่ ผ- 7 ตัวอย่างระบบแสดงข้อความแจ้งเตือนกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ services

5) ตัวอย่างการแสดงข้อผิดพลาดกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ waitingLines

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<queue>
    <services>
        <service>
            <id>T1</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
        <service>
            <id>T2</id>
            <lefts>
                <left>P1</left>
            </lefts>
            <rights>
                <right>P2</right>
            </rights>
        </service>
 </services>
</queue>
```

รูปที่ ผ- 8 ตัวอย่างกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ waitingLines

เมื่อนำเข้าข้อมูล ระบบจะแสดงข้อความแจ้งเตือนดังรูป



รูปที่ ผ- 9 ตัวอย่างระบบแสดงข้อความแจ้งเตือนกรณีข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลนำเข้าไม่ถูกต้องตามโครงสร้างที่กำหนดไว้ ไม่มีข้อมูลในส่วนของ waitingLines

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

```
<pnml>
  <net id="Net-One" type="P/T net">
    <token id="Default" enabled="true" red="0" green="0" blue="0"/>
    <place id="P0">
      <graphics>
        <position x="210" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P0</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P1">
      <graphics>
        <position x="300" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P1</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P2">
      <graphics>
        <position x="390" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P2</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
```

```
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P3">
      <graphics>
        <position x="480" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P3</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P4">
      <graphics>
        <position x="570" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P4</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P5">
      <graphics>
        <position x="660" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P5</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
```

```
120       <capacity>
121         <value>0</value>
122       </capacity>
123     </place>
124     <place id="P6">
125       <graphics>
126         <position x="750" y="90"/>
127       </graphics>
128       <name>
129         <value>P6</value>
130         <graphics>
131           <offset x="20" y="-10"/>
132         </graphics>
133       </name>
134       <initialMarking>
135         <value>Default,0</value>
136         <graphics>
137           <offset x="0" y="0"/>
138         </graphics>
139       </initialMarking>
140       <capacity>
141         <value>0</value>
142       </capacity>
143     </place>
144     <place id="P7">
145       <graphics>
146         <position x="840" y="90"/>
147       </graphics>
148       <name>
149         <value>P7</value>
150         <graphics>
151           <offset x="20" y="-10"/>
152         </graphics>
153       </name>
154       <initialMarking>
155         <value>Default,0</value>
156         <graphics>
157           <offset x="0" y="0"/>
158         </graphics>
159       </initialMarking>
160       <capacity>
161         <value>0</value>
162       </capacity>
163     </place>
164     <transition id="T0">
165       <graphics>
166         <position x="255" y="90"/>
167       </graphics>
168       <name>
169         <value>T0</value>
170         <graphics>
171           <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
172                   y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
173         </graphics>
174       </name>
175       <orientation>
176         <value>0</value>
177       </orientation>
178       <rate>
179         <value>1</value>
180       </rate>
```

```
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T1">
      <graphics>
        <position x="255" y="150"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T1</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
                  y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T2">
      <graphics>
        <position x="345" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T2</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
                  y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
```

```
241         <priority>
242           <value>1</value>
243         </priority>
244       </transition>
245       <transition id="T3">
246         <graphics>
247           <position x="345" y="150"/>
248         </graphics>
249         <name>
250           <value>T3</value>
251           <graphics>
252             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
253                     y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
254           </graphics>
255         </name>
256         <orientation>
257           <value>0</value>
258         </orientation>
259         <rate>
260           <value>1</value>
261         </rate>
262         <timed>
263           <value>true</value>
264         </timed>
265         <infiniteServer>
266           <value>false</value>
267         </infiniteServer>
268         <priority>
269           <value>1</value>
270         </priority>
271       </transition>
272       <transition id="T4">
273         <graphics>
274           <position x="435" y="90"/>
275         </graphics>
276         <name>
277           <value>T4</value>
278           <graphics>
279             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
280                     y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
281           </graphics>
282         </name>
283         <orientation>
284           <value>0</value>
285         </orientation>
286         <rate>
287           <value>1</value>
288         </rate>
289         <timed>
290           <value>true</value>
291         </timed>
292         <infiniteServer>
293           <value>false</value>
294         </infiniteServer>
295         <priority>
296           <value>1</value>
297         </priority>
298       </transition>
299       <transition id="T5">
300         <graphics>
301           <position x="435" y="150"/>
302         </graphics>
```

```
303         <name>
304           <value>T5</value>
305           <graphics>
306             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
307                     y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
308           </graphics>
309         </name>
310         <orientation>
311           <value>0</value>
312         </orientation>
313         <rate>
314           <value>1</value>
315         </rate>
316         <timed>
317           <value>true</value>
318         </timed>
319         <infiniteServer>
320           <value>false</value>
321         </infiniteServer>
322         <priority>
323           <value>1</value>
324         </priority>
325       </transition>
326       <transition id="T6">
327         <graphics>
328           <position x="525" y="90"/>
329         </graphics>
330         <name>
331           <value>T6</value>
332           <graphics>
333             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
334                     y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
335           </graphics>
336         </name>
337         <orientation>
338           <value>0</value>
339         </orientation>
340         <rate>
341           <value>1</value>
342         </rate>
343         <timed>
344           <value>true</value>
345         </timed>
346         <infiniteServer>
347           <value>false</value>
348         </infiniteServer>
349         <priority>
350           <value>1</value>
351         </priority>
352       </transition>
353       <transition id="T7">
354         <graphics>
355           <position x="525" y="150"/>
356         </graphics>
357         <name>
358           <value>T7</value>
359           <graphics>
360             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
361                     y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
362           </graphics>
363         </name>
```

```
364        <orientation>
365          <value>0</value>
366        </orientation>
367        <rate>
368          <value>1</value>
369        </rate>
370        <timed>
371          <value>true</value>
372        </timed>
373        <infiniteServer>
374          <value>false</value>
375        </infiniteServer>
376        <priority>
377          <value>1</value>
378        </priority>
379      </transition>
380      <transition id="T8">
381        <graphics>
382          <position x="525" y="210"/>
383        </graphics>
384        <name>
385          <value>T8</value>
386          <graphics>
387            <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
388                    y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
389          </graphics>
390        </name>
391        <orientation>
392          <value>0</value>
393        </orientation>
394        <rate>
395          <value>1</value>
396        </rate>
397        <timed>
398          <value>true</value>
399        </timed>
400        <infiniteServer>
401          <value>false</value>
402        </infiniteServer>
403        <priority>
404          <value>1</value>
405        </priority>
406      </transition>
407      <transition id="T9">
408        <graphics>
409          <position x="615" y="90"/>
410        </graphics>
411        <name>
412          <value>T9</value>
413          <graphics>
414            <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
415                    y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
416          </graphics>
417        </name>
418        <orientation>
419          <value>0</value>
420        </orientation>
421        <rate>
422          <value>1</value>
423        </rate>
```

```
424         <timed>
425           <value>true</value>
426         </timed>
427         <infiniteServer>
428           <value>false</value>
429         </infiniteServer>
430         <priority>
431           <value>1</value>
432         </priority>
433       </transition>
434       <transition id="T10">
435         <graphics>
436           <position x="615" y="150"/>
437         </graphics>
438         <name>
439           <value>T10</value>
440           <graphics>
441             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
442                     y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
443           </graphics>
444         </name>
445         <orientation>
446           <value>0</value>
447         </orientation>
448         <rate>
449           <value>1</value>
450         </rate>
451         <timed>
452           <value>true</value>
453         </timed>
454         <infiniteServer>
455           <value>false</value>
456         </infiniteServer>
457         <priority>
458           <value>1</value>
459         </priority>
460       </transition>
461       <transition id="T11">
462         <graphics>
463           <position x="705" y="90"/>
464         </graphics>
465         <name>
466           <value>T11</value>
467           <graphics>
468             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
469                     y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
470           </graphics>
471         </name>
472         <orientation>
473           <value>0</value>
474         </orientation>
475         <rate>
476           <value>1</value>
477         </rate>
478         <timed>
479           <value>true</value>
480         </timed>
481         <infiniteServer>
482           <value>false</value>
483         </infiniteServer>
484         <priority>
485           <value>1</value>
486         </priority>
487       </transition>
```

```
488     <transition id="T12">
489       <graphics>
490         <position x="795" y="90"/>
491       </graphics>
492       <name>
493         <value>T12</value>
494         <graphics>
495           <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
496                   y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
497         </graphics>
498       </name>
499       <orientation>
500         <value>0</value>
501       </orientation>
502       <rate>
503         <value>1</value>
504       </rate>
505       <timed>
506         <value>true</value>
507       </timed>
508       <infiniteServer>
509         <value>false</value>
510       </infiniteServer>
511       <priority>
512         <value>1</value>
513       </priority>
514     </transition>
515     <arc id="P0 to T0" source="P0" target="T0">
516       <graphics/>
517       <inscription>
518         <value>Default,1</value>
519         <graphics/>
520       </inscription>
521       <tagged>
522         <value>false</value>
523       </tagged>
524       <type value="normal"/>
525     </arc>
526     <arc id="T0 to P1" source="T0" target="P1">
527       <graphics/>
528       <inscription>
529         <value>Default,1</value>
530         <graphics/>
531       </inscription>
532       <tagged>
533         <value>false</value>
534       </tagged>
535       <type value="normal"/>
536     </arc>
537     <arc id="P0 to T1" source="P0" target="T1">
538       <graphics/>
539       <inscription>
540         <value>Default,1</value>
541         <graphics/>
542       </inscription>
543       <tagged>
544         <value>false</value>
545       </tagged>
546       <type value="normal"/>
547     </arc>
```

```
548     <arc id="T1 to P1" source="T1" target="P1">
549       <graphics/>
550       <inscription>
551         <value>Default,1</value>
552         <graphics/>
553       </inscription>
554       <tagged>
555         <value>false</value>
556       </tagged>
557       <type value="normal"/>
558     </arc>
559     <arc id="P1 to T2" source="P1" target="T2">
560       <graphics/>
561       <inscription>
562         <value>Default,1</value>
563         <graphics/>
564       </inscription>
565       <tagged>
566         <value>false</value>
567       </tagged>
568       <type value="normal"/>
569     </arc>
570     <arc id="T2 to P2" source="T2" target="P2">
571       <graphics/>
572       <inscription>
573         <value>Default,1</value>
574         <graphics/>
575       </inscription>
576       <tagged>
577         <value>false</value>
578       </tagged>
579       <type value="normal"/>
580     </arc>
581     <arc id="P1 to T3" source="P1" target="T3">
582       <graphics/>
583       <inscription>
584         <value>Default,1</value>
585         <graphics/>
586       </inscription>
587       <tagged>
588         <value>false</value>
589       </tagged>
590       <type value="normal"/>
591     </arc>
592     <arc id="T3 to P2" source="T3" target="P2">
593       <graphics/>
594       <inscription>
595         <value>Default,1</value>
596         <graphics/>
597       </inscription>
598       <tagged>
599         <value>false</value>
600       </tagged>
601       <type value="normal"/>
602     </arc>
603     <arc id="P2 to T4" source="P2" target="T4">
604       <graphics/>
605       <inscription>
606         <value>Default,1</value>
607         <graphics/>
608       </inscription>
```

```
609         <tagged>
610           <value>false</value>
611         </tagged>
612         <type value="normal"/>
613       </arc>
614       <arc id="T4 to P3" source="T4" target="P3">
615         <graphics/>
616         <inscription>
617           <value>Default,1</value>
618           <graphics/>
619         </inscription>
620         <tagged>
621           <value>false</value>
622         </tagged>
623         <type value="normal"/>
624       </arc>
625       <arc id="P2 to T5" source="P2" target="T5">
626         <graphics/>
627         <inscription>
628           <value>Default,1</value>
629           <graphics/>
630         </inscription>
631         <tagged>
632           <value>false</value>
633         </tagged>
634         <type value="normal"/>
635       </arc>
636       <arc id="T5 to P3" source="T5" target="P3">
637         <graphics/>
638         <inscription>
639           <value>Default,1</value>
640           <graphics/>
641         </inscription>
642         <tagged>
643           <value>false</value>
644         </tagged>
645         <type value="normal"/>
646       </arc>
647       <arc id="P3 to T6" source="P3" target="T6">
648         <graphics/>
649         <inscription>
650           <value>Default,1</value>
651           <graphics/>
652         </inscription>
653         <tagged>
654           <value>false</value>
655         </tagged>
656         <type value="normal"/>
657       </arc>
658       <arc id="T6 to P4" source="T6" target="P4">
659         <graphics/>
660         <inscription>
661           <value>Default,1</value>
662           <graphics/>
663         </inscription>
664         <tagged>
665           <value>false</value>
666         </tagged>
667         <type value="normal"/>
668       </arc>
```

```
669     <arc id="P3 to T7" source="P3" target="T7">
670       <graphics/>
671       <inscription>
672         <value>Default,1</value>
673         <graphics/>
674       </inscription>
675       <tagged>
676         <value>false</value>
677       </tagged>
678       <type value="normal"/>
679     </arc>
680     <arc id="T7 to P4" source="T7" target="P4">
681       <graphics/>
682       <inscription>
683         <value>Default,1</value>
684         <graphics/>
685       </inscription>
686       <tagged>
687         <value>false</value>
688       </tagged>
689       <type value="normal"/>
690     </arc>
691     <arc id="P3 to T8" source="P3" target="T8">
692       <graphics/>
693       <inscription>
694         <value>Default,1</value>
695         <graphics/>
696       </inscription>
697       <tagged>
698         <value>false</value>
699       </tagged>
700       <type value="normal"/>
701     </arc>
702     <arc id="T8 to P4" source="T8" target="P4">
703       <graphics/>
704       <inscription>
705         <value>Default,1</value>
706         <graphics/>
707       </inscription>
708       <tagged>
709         <value>false</value>
710       </tagged>
712     </arc>
713     <arc id="P4 to T9" source="P4" target="T9">
714       <graphics/>
715       <inscription>
716         <value>Default,1</value>
717         <graphics/>
718       </inscription>
719       <tagged>
720         <value>false</value>
721       </tagged>
722       <type value="normal"/>
723     </arc>
724     <arc id="T9 to P5" source="T9" target="P5">
725       <graphics/>
726       <inscription>
727         <value>Default,1</value>
728         <graphics/>
729       </inscription>
730       <tagged>
731         <value>false</value>
732       </tagged>
733       <type value="normal"/>
734     </arc>
```

```
735     <arc id="P4 to T10" source="P4" target="T10">
736       <graphics/>
737       <inscription>
738         <value>Default,1</value>
739         <graphics/>
740       </inscription>
741       <tagged>
742         <value>false</value>
743       </tagged>
744       <type value="normal"/>
745     </arc>
746     <arc id="T10 to P5" source="T10" target="P5">
747       <graphics/>
748       <inscription>
749         <value>Default,1</value>
750         <graphics/>
751       </inscription>
752       <tagged>
753         <value>false</value>
754       </tagged>
755       <type value="normal"/>
756     </arc>
757     <arc id="P5 to T11" source="P5" target="T11">
758       <graphics/>
759       <inscription>
760         <value>Default,1</value>
761         <graphics/>
762       </inscription>
763       <tagged>
764         <value>false</value>
765       </tagged>
766       <type value="normal"/>
767     </arc>
768     <arc id="T11 to P6" source="T11" target="P6">
769       <graphics/>
770       <inscription>
771         <value>Default,1</value>
772         <graphics/>
773       </inscription>
774       <tagged>
775         <value>false</value>
776       </tagged>
777       <type value="normal"/>
778     </arc>
779     <arc id="P6 to T12" source="P6" target="T12">
780       <graphics/>
781       <inscription>
782         <value>Default,1</value>
783         <graphics/>
784       </inscription>
785       <tagged>
786         <value>false</value>
787       </tagged>
788       <type value="normal"/>
789     </arc>
790     <arc id="T12 to P7" source="T12" target="P7">
791       <graphics/>
792       <inscription>
793         <value>Default,1</value>
794         <graphics/>
795       </inscription>
```

```
796          <tagged>
797            <value>false</value>
798          </tagged>
799          <type value="normal"/>
800        </arc>
801      </net>
802    </pnml>
```

รูปที่ ผ- 10 ตัวอย่างผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตตุ๊กตา

7) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

```
1  <pnml>
2    <net id="Net-One" type="P/T net">
3      <token id="Default" enabled="true" red="0" green="0" blue="0"/>
4      <place id="P0">
5        <graphics>
6          <position x="210" y="90"/>
7        </graphics>
8        <name>
9          <value>P0</value>
10         <graphics>
11           <offset x="20" y="-10"/>
12         </graphics>
13       </name>
14       <initialMarking>
15         <value>Default,0</value>
16         <graphics>
17           <offset x="0" y="0"/>
18         </graphics>
19       </initialMarking>
20       <capacity>
21         <value>0</value>
22       </capacity>
23     </place>
24     <place id="P1">
25       <graphics>
26         <position x="300" y="90"/>
27       </graphics>
28       <name>
29         <value>P1</value>
30         <graphics>
31           <offset x="20" y="-10"/>
32         </graphics>
33       </name>
34       <initialMarking>
35         <value>Default,0</value>
36         <graphics>
37           <offset x="0" y="0"/>
38         </graphics>
39       </initialMarking>
40       <capacity>
41         <value>0</value>
42       </capacity>
43     </place>
```

```
    <place id="P2">
      <graphics>
        <position x="390" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P2</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P3">
      <graphics>
        <position x="480" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P3</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P4">
      <graphics>
        <position x="570" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P4</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P5">
      <graphics>
        <position x="660" y="90"/>
      </graphics>
```

```
      <name>
        <value>P5</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P6">
      <graphics>
        <position x="750" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P6</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P7">
      <graphics>
        <position x="750" y="210"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>P7</value>
        <graphics>
          <offset x="20" y="-10"/>
        </graphics>
      </name>
      <initialMarking>
        <value>Default,0</value>
        <graphics>
          <offset x="0" y="0"/>
        </graphics>
      </initialMarking>
      <capacity>
        <value>0</value>
      </capacity>
    </place>
    <place id="P8">
      <graphics>
        <position x="750" y="330"/>
      </graphics>
```

```
168         <name>
169           <value>P8</value>
170           <graphics>
171             <offset x="20" y="-10"/>
172           </graphics>
173         </name>
174         <initialMarking>
175           <value>Default,0</value>
176           <graphics>
177             <offset x="0" y="0"/>
178           </graphics>
179         </initialMarking>
180         <capacity>
181           <value>0</value>
182         </capacity>
183       </place>
184       <place id="P9">
185         <graphics>
186           <position x="840" y="90"/>
187         </graphics>
188         <name>
189           <value>P9</value>
190           <graphics>
191             <offset x="20" y="-10"/>
192           </graphics>
193         </name>
194         <initialMarking>
195           <value>Default,0</value>
196           <graphics>
197             <offset x="0" y="0"/>
198           </graphics>
199         </initialMarking>
200         <capacity>
201           <value>0</value>
202         </capacity>
203       </place>
204       <place id="P10">
205         <graphics>
206           <position x="930" y="90"/>
207         </graphics>
208         <name>
209           <value>P10</value>
210           <graphics>
211             <offset x="20" y="-10"/>
212           </graphics>
213         </name>
214         <initialMarking>
215           <value>Default,0</value>
216           <graphics>
217             <offset x="0" y="0"/>
218           </graphics>
219         </initialMarking>
220         <capacity>
221           <value>0</value>
222         </capacity>
223       </place>
224       <transition id="T0">
225         <graphics>
226           <position x="255" y="90"/>
227         </graphics>
```

```
      <name>
        <value>T0</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
          y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T1">
      <graphics>
        <position x="255" y="150"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T1</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
          y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T2">
      <graphics>
        <position x="345" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T2</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
          y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
```

```
289         <orientation>
290           <value>0</value>
291         </orientation>
292         <rate>
293           <value>1</value>
294         </rate>
295         <timed>
296           <value>true</value>
297         </timed>
298         <infiniteServer>
299           <value>false</value>
300         </infiniteServer>
301         <priority>
302           <value>1</value>
303         </priority>
304       </transition>
305       <transition id="T3">
306         <graphics>
307           <position x="345" y="150"/>
308         </graphics>
309         <name>
310           <value>T3</value>
311           <graphics>
312             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
313             y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
314           </graphics>
315         </name>
316         <orientation>
317           <value>0</value>
318         </orientation>
319         <rate>
320           <value>1</value>
321         </rate>
322         <timed>
323           <value>true</value>
324         </timed>
325         <infiniteServer>
326           <value>false</value>
327         </infiniteServer>
328         <priority>
329           <value>1</value>
330         </priority>
331       </transition>
332       <transition id="T4">
333         <graphics>
334           <position x="345" y="210"/>
335         </graphics>
336         <name>
337           <value>T4</value>
338           <graphics>
339             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
340             y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
341           </graphics>
342         </name>
343         <orientation>
344           <value>0</value>
345         </orientation>
346         <rate>
347           <value>1</value>
348         </rate>
349         <timed>
350           <value>true</value>
351         </timed>
```

```
352         <infiniteServer>
353           <value>false</value>
354         </infiniteServer>
355         <priority>
356           <value>1</value>
357         </priority>
358       </transition>
359       <transition id="T5">
360         <graphics>
361           <position x="435" y="90"/>
362         </graphics>
363         <name>
364           <value>T5</value>
365           <graphics>
366             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
367             y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
368           </graphics>
369         </name>
370         <orientation>
371           <value>0</value>
372         </orientation>
373         <rate>
374           <value>1</value>
375         </rate>
376         <timed>
377           <value>true</value>
378         </timed>
379         <infiniteServer>
380           <value>false</value>
381         </infiniteServer>
382         <priority>
383           <value>1</value>
384         </priority>
385       </transition>
386       <transition id="T6">
387         <graphics>
388           <position x="525" y="90"/>
389         </graphics>
390         <name>
391           <value>T6</value>
392           <graphics>
393             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
394             y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
395           </graphics>
396         </name>
397         <orientation>
398           <value>0</value>
399         </orientation>
400         <rate>
401           <value>1</value>
402         </rate>
403         <timed>
404           <value>true</value>
405         </timed>
406         <infiniteServer>
407           <value>false</value>
408         </infiniteServer>
409         <priority>
410           <value>1</value>
411         </priority>
412       </transition>
```

```
413     <transition id="T7">
414       <graphics>
415         <position x="615" y="90"/>
416       </graphics>
417       <name>
418         <value>T7</value>
419         <graphics>
420           <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
421           y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
422         </graphics>
423       </name>
424       <orientation>
425         <value>0</value>
426       </orientation>
427       <rate>
428         <value>1</value>
429       </rate>
430       <timed>
431         <value>true</value>
432       </timed>
433       <infiniteServer>
434         <value>false</value>
435       </infiniteServer>
436       <priority>
437         <value>1</value>
438       </priority>
439     </transition>
440     <transition id="T8">
441       <graphics>
442         <position x="705" y="90"/>
443       </graphics>
444       <name>
445         <value>T8</value>
446         <graphics>
447           <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
448           y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
449         </graphics>
450       </name>
451       <orientation>
452         <value>0</value>
453       </orientation>
454       <rate>
455         <value>1</value>
456       </rate>
457       <timed>
458         <value>true</value>
459       </timed>
460       <infiniteServer>
461         <value>false</value>
462       </infiniteServer>
463       <priority>
464         <value>1</value>
465       </priority>
466     </transition>
467     <transition id="T9">
468       <graphics>
469         <position x="705" y="150"/>
470       </graphics>
471       <name>
472         <value>T9</value>
473         <graphics>
474           <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
475           y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
476         </graphics>
```

```
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T10">
      <graphics>
        <position x="705" y="210"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T10</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
          y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
      <infiniteServer>
        <value>false</value>
      </infiniteServer>
      <priority>
        <value>1</value>
      </priority>
    </transition>
    <transition id="T11">
      <graphics>
        <position x="795" y="90"/>
      </graphics>
      <name>
        <value>T11</value>
        <graphics>
          <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
          y="-7.857142857142853209495569899445399641990661621093 75"/>
        </graphics>
      </name>
      <orientation>
        <value>0</value>
      </orientation>
      <rate>
        <value>1</value>
      </rate>
      <timed>
        <value>true</value>
      </timed>
```

```
541         <infiniteServer>
542           <value>false</value>
543         </infiniteServer>
544         <priority>
545           <value>1</value>
546         </priority>
547       </transition>
548       <transition id="T12">
549         <graphics>
550           <position x="795" y="210"/>
551         </graphics>
552         <name>
553           <value>T12</value>
554           <graphics>
555             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
556             y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
557           </graphics>
558         </name>
559         <orientation>
560           <value>0</value>
561         </orientation>
562         <rate>
563           <value>1</value>
564         </rate>
565         <timed>
566           <value>true</value>
567         </timed>
568         <infiniteServer>
569           <value>false</value>
570         </infiniteServer>
571         <priority>
572           <value>1</value>
573         </priority>
574       </transition>
575       <transition id="T13">
576         <graphics>
577           <position x="795" y="330"/>
578         </graphics>
579         <name>
580           <value>T13</value>
581           <graphics>
582             <offset x="20.714285714285708195347979199141263961791992187 5"
583             y="-7.85714285714285320949556989944539964199066162109375"/>
584           </graphics>
585         </name>
586         <orientation>
587           <value>0</value>
588         </orientation>
589         <rate>
590           <value>1</value>
591         </rate>
592         <timed>
593           <value>true</value>
594         </timed>
595         <infiniteServer>
596           <value>false</value>
597         </infiniteServer>
598         <priority>
599           <value>1</value>
600         </priority>
601       </transition>
```

```
602     <arc id="P0 to T0" source="P0" target="T0">
603       <graphics/>
604       <inscription>
605         <value>Default,1</value>
606         <graphics/>
607       </inscription>
608       <tagged>
609         <value>false</value>
610       </tagged>
611       <type value="normal"/>
612     </arc>
613     <arc id="T0 to P1" source="T0" target="P1">
614       <graphics/>
615       <inscription>
616         <value>Default,1</value>
617         <graphics/>
618       </inscription>
619       <tagged>
620         <value>false</value>
621       </tagged>
622       <type value="normal"/>
623     </arc>
624     <arc id="P0 to T1" source="P0" target="T1">
625       <graphics/>
626       <inscription>
627         <value>Default,1</value>
628         <graphics/>
629       </inscription>
630       <tagged>
631         <value>false</value>
632       </tagged>
633       <type value="normal"/>
634     </arc>
635     <arc id="T1 to P1" source="T1" target="P1">
636       <graphics/>
637       <inscription>
638         <value>Default,1</value>
639         <graphics/>
640       </inscription>
641       <tagged>
642         <value>false</value>
643       </tagged>
644       <type value="normal"/>
645     </arc>
646     <arc id="P1 to T2" source="P1" target="T2">
647       <graphics/>
648       <inscription>
649         <value>Default,1</value>
650         <graphics/>
651       </inscription>
652       <tagged>
653         <value>false</value>
654       </tagged>
655       <type value="normal"/>
656     </arc>
657     <arc id="T2 to P2" source="T2" target="P2">
658       <graphics/>
659       <inscription>
660         <value>Default,1</value>
661         <graphics/>
662       </inscription>
```

```
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="P1 to T3" source="P1" target="T3">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T3 to P2" source="T3" target="P2">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="P1 to T4" source="P1" target="T4">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T4 to P2" source="T4" target="P2">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="P2 to T5" source="P2" target="T5">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
```

```
723     <arc id="T5 to P3" source="T5" target="P3">
724       <graphics/>
725       <inscription>
726         <value>Default,1</value>
727         <graphics/>
728       </inscription>
729       <tagged>
730         <value>false</value>
731       </tagged>
732       <type value="normal"/>
733     </arc>
734     <arc id="P3 to T6" source="P3" target="T6">
735       <graphics/>
736       <inscription>
737         <value>Default,1</value>
738         <graphics/>
739       </inscription>
740       <tagged>
741         <value>false</value>
742       </tagged>
743       <type value="normal"/>
744     </arc>
745     <arc id="T6 to P4" source="T6" target="P4">
746       <graphics/>
747       <inscription>
748         <value>Default,1</value>
749         <graphics/>
750       </inscription>
751       <tagged>
752         <value>false</value>
753       </tagged>
754       <type value="normal"/>
755     </arc>
756     <arc id="P4 to T7" source="P4" target="T7">
757       <graphics/>
758       <inscription>
759         <value>Default,1</value>
760         <graphics/>
761       </inscription>
762       <tagged>
763         <value>false</value>
764       </tagged>
765       <type value="normal"/>
766     </arc>
767     <arc id="T7 to P5" source="T7" target="P5">
768       <graphics/>
769       <inscription>
770         <value>Default,1</value>
771         <graphics/>
772       </inscription>
773       <tagged>
774         <value>false</value>
775       </tagged>
776       <type value="normal"/>
777     </arc>
778     <arc id="P5 to T8" source="P5" target="T8">
779       <graphics/>
780       <inscription>
781         <value>Default,1</value>
782         <graphics/>
783       </inscription>
```

```
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T8 to P6" source="T8" target="P6">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="P5 to T9" source="P5" target="T9">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T9 to P7" source="T9" target="P7">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="P5 to T10" source="P5" target="T10">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
    <arc id="T10 to P8" source="T10" target="P8">
      <graphics/>
      <inscription>
        <value>Default,1</value>
        <graphics/>
      </inscription>
      <tagged>
        <value>false</value>
      </tagged>
      <type value="normal"/>
    </arc>
```

```
844     <arc id="P6 to T11" source="P6" target="T11">
845       <graphics/>
846       <inscription>
847         <value>Default,1</value>
848         <graphics/>
849       </inscription>
850       <tagged>
851         <value>false</value>
852       </tagged>
853       <type value="normal"/>
854     </arc>
855     <arc id="T11 to P9" source="T11" target="P9">
856       <graphics/>
857       <inscription>
858         <value>Default,1</value>
859         <graphics/>
860       </inscription>
861       <tagged>
862         <value>false</value>
863       </tagged>
864       <type value="normal"/>
865     </arc>
866     <arc id="P7 to T12" source="P7" target="T12">
867       <graphics/>
868       <inscription>
869         <value>Default,1</value>
870         <graphics/>
871       </inscription>
872       <tagged>
873         <value>false</value>
874       </tagged>
875       <type value="normal"/>
876     </arc>
877     <arc id="T12 to P9" source="T12" target="P9">
878       <graphics/>
879       <inscription>
880         <value>Default,1</value>
881         <graphics/>
882       </inscription>
883       <tagged>
884         <value>false</value>
885       </tagged>
886       <type value="normal"/>
887     </arc>
888     <arc id="P8 to T13" source="P8" target="T13">
889       <graphics/>
890       <inscription>
891         <value>Default,1</value>
892         <graphics/>
893       </inscription>
894       <tagged>
895         <value>false</value>
896       </tagged>
897       <type value="normal"/>
898     </arc>
899     <arc id="T13 to P10" source="T13" target="P10">
900       <graphics/>
901       <inscription>
902         <value>Default,1</value>
903         <graphics/>
904       </inscription>
905       <tagged>
906         <value>false</value>
907       </tagged>
```

```
908         <type value="normal"/>
909       </arc>
910     </net>
911   </pnml>
```

รูปที่ ผ- 11 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการผลิตธนบัตร

8) ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

```
1  <?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?><pnml>
2  <net id="Net-One" type="P/T net">
3  <token id="Default" enabled="true" red="0" green="0" blue="0"/>
4  <place id="P0 Design">
5  <graphics>
6  <position x="210.0" y="90.0"/>
7  </graphics>
8  <name>
9  <value>P0 Design</value>
10 <graphics>
11 <offset x="-2.0" y="17.0"/>
12 </graphics>
13 </name>
14 <initialMarking>
15 <value>Default,0</value>
16 <graphics>
17 <offset x="0.0" y="0.0"/>
18 </graphics>
19 </initialMarking>
20 <capacity>
21 <value>0</value>
22 </capacity>
23 </place>
24 <place id="P1 Create pattern">
25 <graphics>
26 <position x="300.0" y="90.0"/>
27 </graphics>
28 <name>
29 <value>P1 Create pattern</value>
30 <graphics>
31 <offset x="60.0" y="57.0"/>
32 </graphics>
33 </name>
34 <initialMarking>
35 <value>Default,0</value>
36 <graphics>
37 <offset x="0.0" y="0.0"/>
38 </graphics>
39 </initialMarking>
40 <capacity>
41 <value>0</value>
42 </capacity>
43 </place>
44 <place id="P2 Embroidered name">
45 <graphics>
46 <position x="390.0" y="90.0"/>
47 </graphics>
48 <name>
49 <value>P2 Embroidered name</value>
50 <graphics>
51 <offset x="77.0" y="-21.0"/>
52 </graphics>
53 </name>
54 <initialMarking>
55 <value>Default,0</value>
56 <graphics>
57 <offset x="0.0" y="0.0"/>
58 </graphics>
59 </initialMarking>
```

```
60  <capacity>
61   <value>0</value>
62  </capacity>
63  </place>
64  <place id="P3 Packing">
65  <graphics>
66   <position x="480.0" y="90.0"/>
67  </graphics>
68  <name>
69   <value>P3 Packing</value>
70  <graphics>
71   <offset x="95.0" y="17.0"/>
72  </graphics>
73  </name>
74  <initialMarking>
75   <value>Default,0</value>
76  <graphics>
77   <offset x="0.0" y="0.0"/>
78  </graphics>
79  </initialMarking>
80  <capacity>
81   <value>0</value>
82  </capacity>
83  </place>
84  <transition id="T0">
85  <graphics>
86   <position x="255.0" y="90.0"/>
87  </graphics>
88  <name>
89   <value>T0</value>
90  <graphics>
91   <offset x="23.714285714285708" y="41.142857142857146"/>
92  </graphics>
93  </name>
94  <orientation>
95   <value>0</value>
96  </orientation>
97  <rate>
98   <value>1.0</value>
99  </rate>
100 <timed>
101  <value>true</value>
102 </timed>
103 <infiniteServer>
104  <value>false</value>
105 </infiniteServer>
106 <priority>
107  <value>1</value>
108 </priority>
109 </transition>
110 <transition id="T1">
111 <graphics>
112  <position x="345.0" y="90.0"/>
113 </graphics>
114 <name>
115  <value>T1</value>
116 <graphics>
117  <offset x="21.714285714285708" y="41.142857142857146"/>
118 </graphics>
119 </name>
```

```
120   <orientation>
121     <value>0</value>
122     </orientation>
123   <rate>
124     <value>1.0</value>
125     </rate>
126   <timed>
127     <value>true</value>
128     </timed>
129   <infiniteServer>
130     <value>false</value>
131     </infiniteServer>
132   <priority>
133     <value>1</value>
134     </priority>
135     </transition>
136   <transition id="T2">
137   <graphics>
138     <position x="435.0" y="90.0"/>
139     </graphics>
140   <name>
141     <value>T2</value>
142   <graphics>
143     <offset x="22.714285714285708" y="-4.857142857142854"/>
144     </graphics>
145     </name>
146   <orientation>
147     <value>0</value>
148     </orientation>
149   <rate>
150     <value>1.0</value>
151     </rate>
152   <timed>
153     <value>true</value>
154     </timed>
155   <infiniteServer>
156     <value>false</value>
157     </infiniteServer>
158   <priority>
159     <value>1</value>
160     </priority>
161     </transition>
162   <transition id="T3">
163   <graphics>
164     <position x="435.0" y="150.0"/>
165     </graphics>
166   <name>
167     <value>T3</value>
168   <graphics>
169     <offset x="21.714285714285708" y="-4.857142857142853"/>
170     </graphics>
171     </name>
172   <orientation>
173     <value>0</value>
174     </orientation>
175   <rate>
176     <value>1.0</value>
177     </rate>
178   <timed>
179     <value>true</value>
180     </timed>
```

```
<infiniteServer>
<value>false</value>
</infiniteServer>
<priority>
<value>1</value>
</priority>
</transition>
<arc id="P0 Design to T0" source="P0 Design" target="T0">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="236" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="261" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="P1 Create pattern to T1" source="P1 Create pattern" target="T1">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="326" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="351" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="P2 Embroidered name to T2" source="P2 Embroidered name" target="T2">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="416" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="441" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="P2 Embroidered name to T3" source="P2 Embroidered name" target="T3">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="410" y="114" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="441" y="162" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
```

```
<arc id="T0 to P1 Create pattern" source="T0" target="P1 Create pattern">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="271" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="297" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="T1 to P2 Embroidered name" source="T1" target="P2 Embroidered name">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="361" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="387" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="T2 to P3 Packing" source="T2" target="P3 Packing">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="451" y="102" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="477" y="102" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
<arc id="T3 to P3 Packing" source="T3" target="P3 Packing">
<graphics/>
<inscription>
<value>Default,1</value>
<graphics/>
</inscription>
<tagged>
<value>false</value>
</tagged>
<arcpath id="000" x="451" y="162" curvePoint="false"/>
<arcpath id="001" x="483" y="114" curvePoint="false"/>
<type value="normal"/>
</arc>
</net>
</pnml>
```

รูปที่ ผ- 12 ผลลัพธ์สโตแคสติกเพทริเน็ตส์สำหรับกรณีศึกษากระบวนการปักชื่อกระเป๋าผ้าแคนวาส

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวพิมพร บุญอินทร์
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปัจจุบันทำงานเป็นวิศวกรประกันคุณภาพอาวุโส และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University