การแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

นางสาวเกศิณี สุมนาตย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Transformation of Stochastic Petri Nets into Markov Chain

Miss Kesinee Soomanat

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Software Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ |
| โดย | นางสาวเกศิณี สุมนาตย์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมซอฟต์แวร์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ หมื่นไชยศรี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เกศิณี สุมนาตย์ : การแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ (Transformation of Stochastic Petri Nets into Markov Chain) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ, 139 หน้า.

ในการดำเนินธุรกิจ เมื่อมีจำนวนลูกค้าที่เพิ่มมากขึ้น การให้บริการที่รวดเร็ว ทันต่อความต้องการของลูกค้าจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง หากผู้ประกอบการธุรกิจ ไม่ได้มีการวางแผนเพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของลูกค้า อาจทำให้การบริการมีความล่าช้า ไม่ทันกาล ต้องมีการรอคอย ซึ่งอาจเกิดจากมีจำนวนของผู้ให้บริการหรือพนักงานไม่เพียงพอกับจำนวนผู้มารับบริการ การบริหารจัดการแถวคอยที่ขาดประสิทธิภาพ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ ล้วนส่งผลให้เกิดความไม่พึงพอใจต่อผู้มารับบริการและอาจนำไปสู่การสูญเสียลูกค้า และเสียโอกาสในการดำเนินธุรกิจได้

งานวิจัยนี้ได้เสนอสโตแคสติกเพทริเน็ตซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถจำลองการเข้าแถวคอยของผู้มารับบริการ, ผู้ให้บริการและลักษณะของการเข้าแถวคอยได้ ซึ่งที่ได้เสนอแบบจำลองนี้เนื่องจากว่าเป็นแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์การเข้าแถวคอยได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพตลอดจนช่วยทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการเข้าแถวคอยที่ได้จำลองเอาไว้ได้ แต่ด้วยข้อจำกัดของแบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตที่ไม่สามารถคำนวณความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนจากจุดของการเข้าแถวคอยจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ ทำให้ไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์การเข้าแถวคอย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งห่วงโซ่มาร์คอฟสามารถคำนวณความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้ใช้บริการเข้ามาใช้บริการที่แถวคอย และคาดการณ์การใช้บริการว่าจะสามารถแล้วเสร็จในระยะเวลาที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะถูกวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของการคำนวณความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียล โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม เพื่อให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าจำนวนของผู้ให้บริการเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้บริการหรือไม่อย่างไรและนำไปสู่การตัดสินใจและดำเนินการเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการการใช้บริการของผู้ใช้บริการได้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพต่อไป สุดท้ายเครื่องมือได้ถูกนำไปทดสอบความถูกต้องกับ 3 กรณีศึกษา ผลลัพธ์ที่ได้คือ เครื่องมือสามารถวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้ใช้บริการเข้ามาใช้บริการที่แถวคอยและแล้วเสร็จในระยะเวลาที่กำหนดมีค่าความน่าจะเป็นได้อย่างถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 5970905721 : MAJOR SOFTWARE ENGINEERING
KEYWORDS: QUEUE / STOCHASTIC PETRI NETS / SPN / REACHABILITY GRAPH / MARKOV CHAIN / PROBABILITY DENSITY FUNCTION / CUMULATIVE DISTRIBUTION FUNCTION

KESINEE SOOMANAT: Transformation of Stochastic Petri Nets into Markov Chain. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIWAT VATANAWOOD, Ph.D., 139 pp.

Dealing with the increasing number of customers in business, how to provide the fast service and meet customer requirements are very important. If the business owner does their business without plan to support the increase of customers in the future, the service can be delayed. This may be due to the inadequate numbers of service points or employees provided to the expected number of customers and insufficient queue management. These circumstances lead to not only customer dissatisfaction but also loss of customers and opportunities in the business.

This thesis aims to study and explore the Stochastic Petri net which illustrates queuing model including clients, service providers and queuing characteristic. This model provides both quantitative and qualitative analysis of queuing technique and also provides an understanding of queuing behavior. However, because of the limitation of Stochastic Petri net which is unable to calculate the probability of changing service points, the analysis cannot be extended. Therefore, we propose the transformation of Stochastic Petri net into a Markov chain. The Markov chain can be used to calculate the probability that the clients get into the waiting line and to forecast whether the service will be completed using a specific period of time or not. The analysis is in the form of Exponential Distribution using Probability Density Function (PDF) or Cumulative Distribution Function (CDF) to forecast whether the number of service providers is consistent with the number of clients. The result will be used for decision making and further actions to provide efficient services. Lastly, the supporting tool is validated with three cases studies and the results show that the supporting tool is able to analyze the probabilities of the serving time for a customer using the specified time correctly.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ เป็นอย่างสูงที่เมตตารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา พร้อมกับทั้งให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์และผลงานทางวิชาการ แม้ว่าตัวข้าพเจ้าเอง จะติดภารกิจเนื่องจากต้องทำงานประจำ ท่านก็พยายามสอบถามความคืบหน้าและคอยให้คำแนะนำอยู่อย่างสม่ำเสมอ

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา, รศ. ดร. พรศิริ หมื่นไชยศรี และ ผศ.ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ที่ช่วยตรวจเอกสารพร้อมทั้งกับให้คำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ และการนำเสนอผลงานของวิทยานิพนธ์

ขอบคุณนางสาววารีรัตน์ บัวเสนาะ, นางสาวชลิกา ศักดิ์สุภาวัฒนกุล และเพื่อนที่เรียนปริญญาโทด้วยกันที่คอยให้กำลังใจ

และสุดท้ายต้องขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และแฟนที่คอยเป็น กำลังใจ สนับสนุนเสมอมา

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**สารบัญ**

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... 1
สารบัญรูป ..... 3
บทที่ 1 บทนำ ..... 10
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา ..... 10
1.2 วัตถุประสงค์ ..... 11
1.3 ขอบเขตการวิจัย ..... 11
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย ..... 12
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 12
1.6 บทความที่ตีพิมพ์จากงานวิจัย ..... 13
บทที่ 2 ทฎษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 14
2.1 ทฎษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 14
2.1.1 แถวคอย ..... 14
2.1.2 เพทริเน็ต ..... 17
2.1.3 สโตแคสติกเพรทิเน็ต ..... 20
2.1.4 ริชอะบิลิตี้เซต ..... 22
2.1.5 ตัวแบบมาร์คอฟ (Markov Model) ..... 24
2.1.6 เอกซ์เอ็มแอล ..... 26
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.1 งานวิจัยชื่อ “Measure of Uncertainty in Process Models Using Stochastic Petri Nets and Shannon Entropy” โดย Martin Ibl * และ Jan C˘ apek ปี ค.ศ.2015 ..... 27

2.2.2 งานวิจัยชื่อ “Analytic Evaluation on Petri Net by Using Markov Chain Theory to Achieve Optimized Models” โดย H. Motameni, A. Movaghar, M. Siasifar, H. Montazeri and A. Rezaei ปี ค.ศ.2008 ..... 29

2.2.3 งานวิจัยชื่อ “Automated Customer-Centric Performance Analysis of Generalised Stochastic Petri Nets Using Tagged Tokens” โดย Nicholas J. Dingle and Willian J. Knottenbelt ปี ค.ศ.2009 ..... 30

บทที่ 3 วิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 31

3.1 การแท็กโทเค็นของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 31

3.2 ภาพรวมวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 33

3.3 รายละเอียดวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 34

3.3.1 นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ..... 34

3.3.2 สกัดและตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 36

3.3.3 ระบุพารามิเตอร์ตั้งต้น ..... 39

3.3.4 สร้างริชอะบิลิตี้เซตและแท็กโทเค็น ..... 40

3.3.5 สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ ..... 45

3.3.6 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณความน่าจะเป็นบนห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 46

3.3.7 วิเคราะห์ผลลัพธ์ ..... 54

บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ . 57

4.1 การออกแบบเครื่องมือสนับสนุน ..... 57

4.1.1 แผนภาพยูสเคส ..... 57

4.1.2 แผนภาพกิจกรรม ..... 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.1.3 แผนภาพแพ็คเกจ ..... 65
4.1.4 แผนภาพคลาส ..... 66
4.2 การพัฒนาเครื่องมือสนับสนุน ..... 73
4.2.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ ..... 73
4.2.2 โครงสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของเครื่องมือสนับสนุน ..... 73
บทที่ 5 การทดสอบเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 82
5.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ ..... 82
5.1.1 ฮาร์ดแวร์ ..... 82
5.1.2 ซอฟต์แวร์ ..... 82
5.2 แนวทางในการทดสอบเครื่องมือ ..... 82
5.3 การทดสอบเครื่องมือ ..... 83
5.3.1 กรณีทดสอบโดยใช้แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป ..... 84
5.3.2 กรณีทดสอบของกรณีศึกษาการเข้าแถวคอย ..... 97
5.3.3 กรณีทดสอบของกรณีศึกษาการผลิตรถยนต์ ..... 110
5.4 สรุปผลการทดสอบเครื่องมือ ..... 130
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ..... 132
6.1 สรุปผลการวิจัย ..... 132
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย ..... 133
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานต่อ ..... 133
..... 134
รายการอ้างอิง ..... 134
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 139

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้า ..... 15
ตารางที่ 2.2 คำอธิบายความหมายของสัญลักษณ์แคนดอลโนเตชัน ..... 15
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของเพทริเน็ต ..... 17
ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไป ..... 22
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 23
ตารางที่ 2.6 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 25
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตและแท็กเอกซ์เอ็มแอล ..... 34
ตารางที่ 3.2 การสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 36
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 38
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างเงื่อนไขในการฟายริงทรานสิชันและการยับยั้งทรานสิชัน ..... 39
ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น ..... 43
ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทาง ..... 55
ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของแต่ละเส้นทาง ..... 55
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของยูสเคสของการนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล ..... 58
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของยูสเคสของการอัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 59
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของยูสเคสของการป้อนพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับคำนวณความน่าจะเป็น ..... 61
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างริชอะบิลิตี้เซต ..... 62
ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ ..... 62
ตารางที่ 4.6 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณความน่าจะเป็น ..... 63
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของหน้าต่าง “SPN XML Upload” ..... 74

ตารางที่ 4.8 รายละเอียดของหน้าต่าง “Input Required Parameter” ..... 76
ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของหน้าต่าง “Reachability Set” ..... 77
ตารางที่ 4.10 รายละเอียดของหน้าต่าง “Reachability Graph” ..... 79
ตารางที่ 4.11 รายละเอียดของหน้าต่าง “Probability Calculation Option” ..... 80
ตารางที่ 4.12 รายละเอียดของหน้าต่าง “Markov Chain and Analysis Result” ..... 80
ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดของกรณีทดสอบ ..... 83
ตารางที่ 5.2 รูปแบบของสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 84
ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป 4 รูปแบบ ..... 130
ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาการเข้าแถวคอยและการผลิตรถยนต์โดยใช้การคำนวณจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ..... 131
ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาการเข้าแถวคอยและการผลิตรถยนต์โดยใช้การคำนวณจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ..... 131

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแถวคอย [2] ..... 14
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเพทริเน็ต [4] ..... 18
รูปที่ 2.3 ก่อนการฟายริงทรานสิชัน [4] ..... 19
รูปที่ 2.4 หลังการฟายริงทรานสิชัน [4] ..... 19
รูปที่ 2.5 แบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โดยใช้ริชอะบิลิตี้เซต ..... 23
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของริชอะบิลิตี้กราฟ ..... 23
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง ..... 25
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 25
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟที่เกิดการขัดกัน ..... 26
รูปที่ 2.10 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของงานวิจัยนี้กับวิธีของ McCabe's และ Entropy-Based Uncertainty Measure Introduced in [10] ..... 28
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตที่เป็นการผลิตรถยนต์ ที่มีเพลสเป็น 3 ประเภท ..... 32
รูปที่ 3.2 ภาพรวมแสดงวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 33
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล ..... 35
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 36
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการแท็กโทเค็นในสโตแคสติกเพทริเน็ต ..... 42
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้กราฟ ..... 46
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (กรณีไม่เกิดการขัดกัน) ..... 47
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (กรณีเกิดการขัดกัน) ..... 48
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟกับค่าความน่าจะเป็นบนเส้นความสัมพันธ์ในแต่ละโหนดโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ..... 50

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (กรณีไม่เกิดการขัดกัน) ..... 51

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (กรณีเกิดการขัดกัน) ..... 51

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟกับค่าความน่าจะเป็นบนเส้นความสัมพันธ์ในแต่ละโหนดโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ..... 54

รูปที่ 4.1 แผนภาพยูสเคสของเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 58

รูปที่ 4.2 แผนภาพกิจกรรมการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 64

รูปที่ 4.3 แผนภาพแพ็คเกจเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ..... 65

รูปที่ 4.4 รายละเอียดของคลาส BeanUtils ..... 66

รูปที่ 4.5 รายละเอียดของคลาส SPNUtils ..... 67

รูปที่ 4.6 รายละเอียดของแผนภาพคลาส SPN, Place, Transition และ Arc ..... 67

รูปที่ 4.7 รายละเอียดของคลาส SPNFileUploadForm ..... 68

รูปที่ 4.8 รายละเอียดของคลาส InputParameterForm ..... 68

รูปที่ 4.9 รายละเอียดของคลาส ReachabilitySetForm ..... 68

รูปที่ 4.10 รายละเอียดของคลาส ReachabilityGraphForm ..... 69

รูปที่ 4.11 รายละเอียดของคลาส MarkovChainForm ..... 69

รูปที่ 4.12 รายละเอียดของคลาส ImportXML ..... 69

รูปที่ 4.13 รายละเอียดของคลาส Reachability ..... 70

รูปที่ 4.14 รายละเอียดของคลาส MarkovChain ..... 71

รูปที่ 4.15 รายละเอียดของคลาส AllPathsFromASource ..... 71

รูปที่ 4.16 รายละเอียดของคลาส ReachabilitySetRole ..... 71

รูปที่ 4.17 รายละเอียดของคลาส StateMarking ..... 72

รูปที่ 4.18 รายละเอียดของคลาส Input Parameter ..... 72

รูปที่ 4.19 หน้าต่าง “SPN XML Upload” ..... 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.20 หน้าต่างสำหรับหาที่อยู่ของแฟ้มเอกสารสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบเอกซ์เอ็มแอล .. 75
รูปที่ 4.21 หน้าต่าง “Input Required Parameter” ..... 77
รูปที่ 4.22 หน้าต่าง “Reachability Set” ..... 78
รูปที่ 4.23 หน้าต่าง “Reachability Graph” ..... 79
รูปที่ 4.24 หน้าต่าง “Probability Calculation Options"..... 80
รูปที่ 4.25 หน้าต่าง “Markov Chain and Analysis Result” ..... 81
รูปที่ 4.26 หน้าต่างแจ้งเตือนข้อผิดพลาด..... 81
รูปที่ 5.1 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 84
รูปที่ 5.2 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 85
รูปที่ 5.3 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ..... 85
รูปที่ 5.4 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 85
รูปที่ 5.5 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 86
รูปที่ 5.6 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพท
ริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 86
รูปที่ 5.7 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ..... 86
รูปที่ 5.8 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรม
ไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ..... 87
รูปที่ 5.9 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล
ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ..... 87
รูปที่ 5.10 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน..... 87
รูปที่ 5.11 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน..... 88
รูปที่ 5.12 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน ..... 88
รูปที่ 5.13 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน..... 89
รูปที่ 5.14 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน..... 89

รูปที่ 5.15 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน ..... 89
รูปที่ 5.16 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน .. 90
รูปที่ 5.17 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน ..... 90
รูปที่ 5.18 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน ..... 90
รูปที่ 5.19 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 91
รูปที่ 5.20 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 91
รูปที่ 5.21 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 92
รูปที่ 5.22 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 92
รูปที่ 5.23 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 92
รูปที่ 5.24 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 93
รูปที่ 5.25 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 93
รูปที่ 5.26 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 93
รูปที่ 5.27 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก ..... 94
รูปที่ 5.28 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 94
รูปที่ 5.29 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 94
รูปที่ 5.30 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 95
รูปที่ 5.31 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 95
รูปที่ 5.32 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.33 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 96

รูปที่ 5.34 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 96

รูปที่ 5.35 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน ..... 96

รูปที่ 5.36 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ ..... 97

รูปที่ 5.37 แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการเข้าแถวคอย ..... 97

รูปที่ 5.38 เอกซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอย ..... 97

รูปที่ 5.39 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอย ..... 98

รูปที่ 5.40 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย ..... 98

รูปที่ 5.41 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย ..... 99

รูปที่ 5.42 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย ..... 100

รูปที่ 5.43 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย ..... 101

รูปที่ 5.44 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย ..... 102

รูปที่ 5.45 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย ..... 103

รูปที่ 5.46 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย ..... 103

รูปที่ 5.47 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย ..... 104

รูปที่ 5.48 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย ..... 105

รูปที่ 5.49 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย ..... 106

รูปที่ 5.50 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย ..... 107

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.51 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย ..... 107

รูปที่ 5.52 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย ..... 108

รูปที่ 5.53 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย ..... 109

รูปที่ 5.54 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย ..... 110

รูปที่ 5.55 แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการผลิตรถยนต์ ..... 111

รูปที่ 5.56 เอกซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอยของการผลิตรถยนต์ ..... 111

รูปที่ 5.57 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของการผลิตรถยนต์ ..... 112

รูปที่ 5.58 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 112

รูปที่ 5.59 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 113

รูปที่ 5.60 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 115

รูปที่ 5.61 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 116

รูปที่ 5.62 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 117

รูปที่ 5.63 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 117

รูปที่ 5.64 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ ..... 118

รูปที่ 5.65 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 118

รูปที่ 5.66 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 119

รูปที่ 5.67 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 121

รูปที่ 5.68 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 122

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 5.69 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 123

รูปที่ 5.70 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 123

รูปที่ 5.71 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ ..... 124

รูปที่ 5.72 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 124

รูปที่ 5.73 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 125

รูปที่ 5.74 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 127

รูปที่ 5.75 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 128

รูปที่ 5.76 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 129

รูปที่ 5.77 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 129

รูปที่ 5.78 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ ..... 130

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 1บทนำ

## 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเรื่องการเข้าแถวคอย (Queuing) เป็นเรื่องปกติทั่วไปในชีวิตประจำวันที่เราต้องประสบแทบทุกวัน เช่น การเข้าแถวคอยเพื่อซื้อตั๋วโดยสารของรถไฟฟ้า, การเข้าแถวคอยเพื่อรอชำระเงินที่ห้างสรรพสินค้า, การเข้าถอยคอยเพื่อเข้าไปตรวจรักษาสุขภาพที่โรงพยาบาล หรือการเข้าแถวคอยอื่นๆ ที่ผู้มารับบริการยังไม่สามารถใช้บริการได้ทันที ต้องใช้เวลาในการเข้าแถวคอยเพื่อใช้บริการ ซึ่งปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดลักษณะของการเข้าแถวคอย อาจจะมาจากหลายๆ องค์ประกอบด้วยกัน ได้แก่ จำนวนของผู้ให้บริการไม่เพียงพอกับจำนวนผู้มารับบริการ หรือรูปแบบของแถวคอย เป็นต้น ซึ่งการศึกษาการเข้าแถวคอยมีเป้าหมายที่จะจัดให้มีผู้ให้บริการพอเพียงกับผู้รับบริการ กรณีจัดให้มีผู้ให้บริการน้อยเกินไปย่อมทำให้เกิดแถวคอยยาวอาจทำให้สูญเสียลูกค้าเนื่องจากลูกค้าไม่มีเวลารอหรือเกิดความเบื่อหน่ายในการรอ จึงทำให้สูญเสียรายได้ แต่ถ้าจัดให้มีผู้บริการมากเกินไป จนไม่เกิดแถวคอยเลยหรือมีพนักงานว่าง ก็จะทำให้ธุรกิจมีรายจ่ายทั้งด้านค่าจ้างพนักงาน รวมถึงต้นทุนเครื่องมือที่ใช้ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการศึกษาการเข้าแถวคอยคือ การหาจำนวนหน่วยให้บริการหรือผู้ให้บริการที่เหมาะสม โดยมีเป้าหมายที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการให้บริการและค่าเสียหาย หรือค่าใช้จ่ายในการรอคอยต่ำสุด

ในองค์ประกอบของการเข้าแถวคอยมีด้วยกันอยู่หลายองค์ประกอบ ได้แก่ กระบวนการสโตแคสติก, ตัวแปรสุ่ม, จำนวนของหน่วยให้บริการ, ขนาดของจุดที่รอรับบริการ,จำนวนของลูกค้าที่มาใช้บริการ และเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้า เป็นต้น จากลักษณะขององค์ประกอบของการเข้าแถวคอยดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปรวบรวมได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนของผู้มารับบริการ (The Arrival), ส่วนของผู้ให้บริการ(The Serve) และลักษณะของระบบแถวคอย ซึ่งในงานวิจัยได้สนใจในส่วนของผู้ให้บริการเท่านั้น ซึ่งในส่วนของผู้ให้บริการเวลาที่ใช้ในการให้บริการแก่ลูกค้าแต่ละรายโดยปกติแล้วจะไม่เท่ากัน แต่มีหลายกรณีที่เท่ากัน โดยเฉพาะการให้บริการในกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติที่เครื่องจักรแต่ละเครื่องใช้เวลาแปรรูปวัตถุดิบเท่าๆ กันทุกหน่วย ซึ่งการให้บริการลูกค้าแต่ละรายมีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential Distribution) ซึ่งมี 2 ลักษณะ ได้แก่ อัตราการให้บริการแบบคงที่ (การให้บริการผู้รับบริการหรือลูกค้าแต่ละคนจะใช้เวลาเท่ากัน) และอัตราการให้บริการแบบสุ่ม (การให้บริการลูกค้าแต่ละรายจะใช้เวลาไม่เท่ากัน) ในการเก็บข้อมูลในการให้บริการ จะสามารถทราบได้เพียงระยะเวลาในการให้บริการ (Service Time) แต่ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องเปลี่ยนเวลาในการให้บริการเป็นอัตราการให้บริการ ซึ่งระบบแถวคอยส่วนใหญ่จะมีเวลาที่

ใช้ในการให้บริการเป็นแบบสุ่ม โดยมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเพราะสอดคล้องกับปัญหาแถวคอยที่มีค่าความน่าจะเป็นของเวลาที่ให้บริการซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้จึงได้เสนอสโตแคสติกเพทริเน็ตซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถจำลองการเข้าแถวคอยของผู้มารับบริการ, ผู้ให้บริการและลักษณะของการเข้าแถวคอยได้ ซึ่งที่ได้เสนอแบบจำลองนี้เนื่องจากว่าเป็นแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์การเข้าแถวคอยได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพตลอดจนช่วยทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการเข้าแถวคอยที่ได้จำลองเอาไว้ได้ แต่ด้วยข้อจำกัดของสโตแคสติกเพทริเน็ตที่ไม่สามารถคำนวณความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแต่ละสถานะได้ จึงไม่เพียงพอกับการวิเคราะห์ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ เพื่อที่จะสามารถคำนวณความน่าจะเป็นเพื่อวิเคราะห์หาโอกาสที่ผู้ใช้บริการเข้ามาใช้บริการที่แถวคอย และคาดการณ์การใช้บริการว่าจะสามารถแล้วเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดหรือไม่ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะถูกวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบของการคำนวณความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential Distribution) โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) หรือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) เพื่อให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าจำนวนของผู้ให้บริการเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้บริการหรือไม่อย่างไรและนำไปสู่การตัดสินใจและดำเนินการเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการการใช้บริการของผู้ใช้บริการได้อย่างเพียงพอและมีประสิทธิภาพต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อนำเสนอวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟได้
2) เพื่อพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนตามวิธีที่ได้นำเสนอได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) พัฒนาเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่มีขีดความสามารถ ดังนี้
   1.1) นำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลไฟล์ของสโตแคสติกเพทริเน็ต 1 รูปได้
   1.2) สร้างรีชอะบิลิตี้กราฟจากเอ็กซ์เอ็มแอลไฟล์ที่ได้นำเข้ามาได้
   1.3) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟจากรีชอะบิลิตี้กราฟได้
   1.4) กำหนดอัตราการฟายริงได้
   1.5) กำหนดเวลาที่ต้องการคำนวณความน่าจะเป็นได้
   1.6) คำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องไปที่ห่วงโซ่มาร์คอฟได้

2) ใช้กรณีศึกษาของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไปของระบบงานแถวคอยอย่างน้อย 1 ระบบงานได้

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
   1.1) ศึกษาระบบงานแถวคอย
   1.2) ศึกษาการทำงานของสโตแคสติกเพทริเน็ต
   1.3) ศึกษาการทำงานของริชอะบิลิตี้เซตและริชอะบิลิตี้กราฟ
   1.4) ศึกษาการทำงานของห่วงโซ่มาร์คอฟ
   1.5) ศึกษาการทำงานของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น
   1.6) ศึกษาการทำงานของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม
2) ศึกษาเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง
3) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4) กำหนดแนวคิดและขอบเขต
5) ออกแบบเครื่องมือสนับสนุน
   5.1) ออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้
   5.2) ออกแบบโครงสร้างเครื่องมือ
6) พัฒนาเครื่องมือแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ
7) ทดสอบเครื่องมือที่ได้พัฒนา
8) ปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือ
9) สรุปและประเมินผลการทดสอบ
10) จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอบทความทางวิชาการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) กฎสำหรับการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ
2) เครื่องมือสำหรับการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวกับการเข้าแถวคอยได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 1.6 บทความที่ตีพิมพ์จากงานวิจัย

ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการตีพิมพ์เป็นบทความวิชาการ คือเรื่อง “Formalism of Stochastic Queueing Network using Stochastic Petri Nets” โดย นางสาวเกศิณี สุมนาตย์ และ รศ.ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ ในงานประชุมวิชาการ 19th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (IEEE/ACIS SNPD 2018) จัดโดย IEEE and ACIS, USA เมื่อวันที่ 27 – 29 มิถุนายน พ.ศ.2561 ณ ปูซาน ประเทศเกาหลี



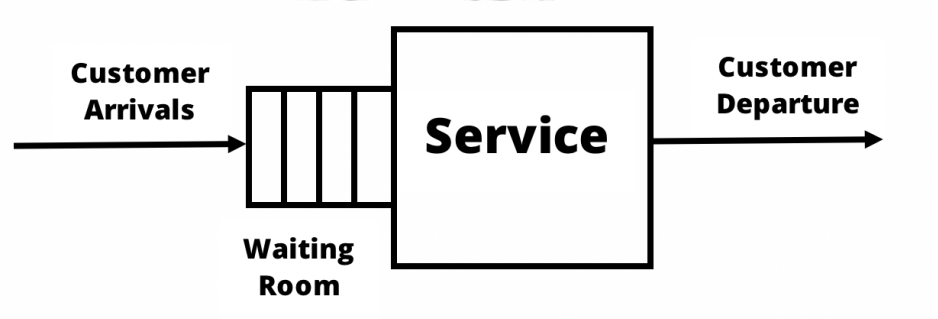
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 2ทฎษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ทฎษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1.1 แถวคอย

แถวคอย [1, 2] เป็นระบบที่ผู้ใช้บริการหรือลูกค้า (Customer) มาเพื่อรับบริการที่หน่วยให้บริการ (Service Station) ซึ่งหน่วยให้บริการอาจจะมี 1 หน่วยหรือมากกว่านั้น เมื่อหน่วยให้บริการไม่สามารถให้บริการได้ทันที ผู้ใช้บริการจำเป็นต้องรอในจุดที่รอรับบริการ (Waiting Slots) หากหน่วยให้บริการพร้อมให้บริการ ผู้ใช้บริการจึงสามารถเข้าไปใช้บริการได้ หากสิ้นสุดการให้บริการลูกค้าก็จะออกจากแถวคอย ตามรูปที่ 2.1




*รูปที่ 2.1 โครงสร้างของแถวคอย [2]*

1) องคประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอย

แถวคอยเป็นการอธิบายแบบจำลองความน่าจะเป็นที่ลูกค้าเข้ามาใช้บริการที่หน่วยให้บริการโดยใช้หน่วยให้บริการร่วมกัน ซึ่งองค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอยมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) กระบวนการสโตแคสติก

เป็นการอธิบายถึงลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการ (Arrival of customers) ซึ่งโดยปกติแล้วการเข้ามาใช้บริการของลูกค้าแต่ละคนไม่เท่ากันและเปนการยากที่จะบอกว่าลูกค้าจะมาใช้บริการเมื่อเวลาใด และมีทั้งหมดจำนวนกี่คน

2) ตัวแปรสุ่ม

เป็นการอธิบายถึงระยะเวลาที่ให้บริการกับลูกค้า (Customer service times) ซึ่งระยะเวลาในการให้บริการต่อลูกคาแต่ละคนเป็นเวลาที่ไม่แน่นอนเพราะโดยทั่วไปนั้นลูกคาแตละคนจะใชเวลาในการรับบริการไมเทากัน

3) จำนวนของหน่วยให้บริการ

4) ขนาดของจุดที่รอรับบริการ

5) จำนวนของลูกค้าที่มาใช้บริการ

ในที่นี้หมายถึงจำนวนลูกค้าที่อยู่ในแถวคอยกับจำนวนลูกค้าที่กำลังรับบริการที่หน่วยให้บริการ

6) เกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้าดังตารางที่ 2.1

*ตารางที่ 2.1 เกณฑในการใหบริการกับลูกคา*

| เกณฑในการใหบริการ | คำอธิบาย |
|---|---|
| First Come First Served (FCFS) | มากอนไดรับบริการก่อน |
| Last Come First Served (LCFS) | มาทีหลังไดรับบริการกอน |
| Service in Random Order (SIRO) | การใหบริการอยางสุม |
| Priorities (PRI) | การใหบริการเปนกรณีพิเศษกับลูกคาที่มีสิทธิพิเศษ |
| General Discipline (GD) | การให้บริการทั่วไป |

ในการกำหนดองค์ประกอบของแถวคอยมีการใช้สัญลักษณ์ที่เป็นสากลเรียกว่า แคนดอลโนเตชัน (Kendall Notation) โดยมีรูปแบบดังนี้

A/B/C/X/Y/Z

โดยสามารถอธิบายแต่ละสัญลักษณ์ตามตารางที่ 2.2 ดังนี้

*ตารางที่ 2.2 คำอธิบายความหมายของสัญลักษณ์แคนดอลโนเตชัน*

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | ค่าที่สามารถกำหนดได้ |
|---|---|---|
| A | การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเข้ามารับบริการของลูกค้าแต่ละรายที่ต่อเนื่องกัน | • M: การเข้ามารับบริการของลูกค้าแต่ละรายมีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียล<br>• D: การเข้ามารับบริการที่มีการแจกแจงแบบตายตัวหรือเป็นรูปแบบที่เป็นรูปแบบที่ตายตัวไม่เปลี่ยนแปลง<br>• $E_k$: การเข้ามารับบริการที่มีการแจกแจงแบบเออร์แลง (Erlang) ที่มี k ขั้นตอน |

*ตารางที่ 2.2 คำอธิบายความหมายของสัญลักษณ์แคนดอลโนเตชัน (ต่อ)*

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | ค่าที่สามารถกำหนดได้ |
|---|---|---|
| A | การแจกแจงความน่าจะเป็นของการเข้ามารับบริการของลูกค้าแต่ละรายที่ต่อเนื่องกัน | • G: การเข้ามารับบริการของลูกค้าแต่ละรายที่มีการแจกแจงแบบทั่วไป |
| B | การแจกแจงความน่าจะเป็นของเวลาในการให้บริการ | • M: เวลาในการให้บริการมีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียล<br>• D: เวลาในการให้บริการมีการแจกแจงแบบตายตัว<br>• $E_k$: เวลาในการให้บริการมีการแจกแจงแบบเออร์แลงที่มี k ขั้นตอน<br>• G: เวลาในการให้บริการมีการแจกแจงแบบทั่วไป |
| C | จำนวนหน่วยให้บริการ | 1,2,3,..... |
| X | ขนาดของจุดที่รอรับบริการ | ∞ |
| Y | เกณฑ์ในการใหบริการ | กำหนดค่าตามตารางที่ 2.1 ตามชื่อย่อ |
| Z | จำนวนของผู้มารับบริการที่สามารถใช้บริการได้ | ∞ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่าง หากกำหนดให้รูปแบบเป็น M/M/1/∞/FCFS/∞ จะสามารถอธิบายความหมายได้ดังนี้

1) รูปแบบการเข้ามาของผู้มารับบริการ : การแจกแจกแบบเอ็กโพเนนเชียล
2) รูปแบบการให้บริการ:  แบบเอ็กโพเนนเชียล
3) จำนวนหน่วยให้บริการ: 1 หน่วยให้บริการ
4) ขนาดของจุดที่รอรับบริการ: ไม่จำกัด
5) เกณฑ์ในการใหบริการ: มากอนไดรับบริการก่อน
6) จำนวนของผู้มารับบริการที่สามารถใช้บริการได้: ไม่จำกัด

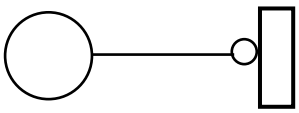
### 2.1.2 เพทริเน็ต

เพทริเน็ต [3-5] เป็นแบบจำลองสถานะการทำงานต่างๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งการศึกษาพฤติกรรมของแต่ละสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างสถานะการทำงานและเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ไม่มีเงื่อนไขของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง เพทริเน็ตสามารถอธิบายได้ 2 วิธี ได้แก่ การสร้างแบบจำลอง (Simulation model) และการวิเคราะห์ (Analytical model) โดยใช้คณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์

**1) ส่วนประกอบของเพทริเน็ต**

ส่วนประกอบของเพทริเน็ต [4] มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 5 ส่วน ได้แก่ เพลส, ทรานสิชัน, โทเค็น, อาร์กและอาร์กยับยั้ง ดังรายละเอียดตามตารางที่ 2.3

*ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของเพทริเน็ต*

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| | เพลส (Place) มีลักษณะเป็นวงกลมใช้แสดงสถานะของระบบ |
| | ทรานสิชัน (Transition) มีลักษณะเป็นกล่องหรือแท่งถูกใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนใหญ่ทรานสิชันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบโดยการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากการฟายริง (Firing) ของทรานสิชันในเพทริเน็ต |
| | โทเค็น (Token) มีลักษณะเป็นจุดสีดำอยู่ในเพลสใช้แทนเงื่อนไขของทรานสิชัน โดยการเคลื่อนย้ายของโทเค็นจะมีผลทำให้สถานะในระบบเปลี่ยนไป |
| | อาร์ก (Arc) มีลักษณะเป็นเส้นตรงมีหัวลูกศรที่เชื่อมต่อระหว่างเพลสกับทรานสิชัน เรียกอินพุตอาร์ก (Input Arc) หรือ ทรานสิชันกับเพลส เรียกเอาต์พุตอาร์ก (Output Arc) |
|  | อาร์กยับยั้ง (Inhibitor Arc) มีลักษณะเป็นเส้นตรงมีหัวเป็นวงกลมเล็กๆ สีขาวที่เชื่อมต่อระหว่างเพลสกับทรานสิชัน ใช้เมื่อต้องการดิสเอเบิล (Disable) ทรานสิชันไม่ให้ฟายริง หากมีโทเค็นในเพลส |

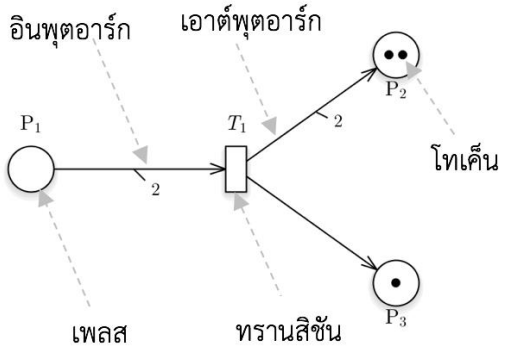
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**2) โครงสร้างของเพทริเน็ต**

โครงสร้างของเพทริเน็ต [2] ประกอบด้วย PN = (P, T, I, O, $M_0$) โดยกำหนดให้ m = {1,2,...}

- P = {$P_1$, $P_2$, $P_3$, ..., $P_m$} เป็นเซตของเพลส
- T = {$T_1$, $T_2$, $T_3$, ..., $T_m$} เป็นเซตของทรานสิชัน
- $I \subset P \times T$ เป็นเซตของอินพุตฟังก์ชัน ซึ่งแสดงโดยอาร์กจากเพลสไปสู่ทรานสิชัน
- $O \subset T \times P$ เป็นเซตของเอาต์พุตฟังก์ชัน ซึ่งแสดงโดยอาร์กจากทรานสิชันไปสู่เพลส
- $M_0$ เป็นมาร์กกิงเริ่มต้น (Initial Marking) ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนโทเค็นเริ่มต้นให้กับเพลสต่างๆ

จากโครงสร้างของเพทริเน็ตดังกล่าวสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.2

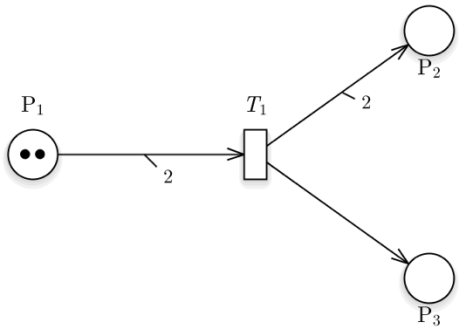



*รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเพทริเน็ต [4]*

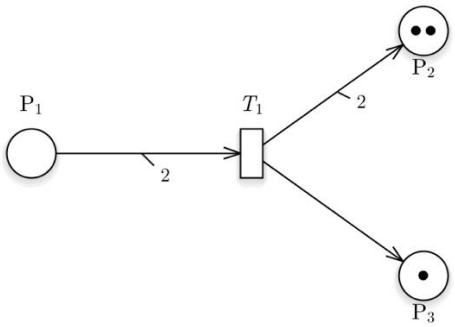
**3) การทำงานของเพทริเน็ต**

การทำงานของเพทริเน็ต [6] สามารถพิจารณาการเปลี่ยนแปลงโทเค็นภายในเพลสของระบบ โดยจะมีกฎการทำงาน 2 กฎ ดังนี้

1) กฎการอีนาเบิล (Enabling Rule) ทรานสิชันสามารถอีนาเบิลได้ก็ต่อเมื่อทุกๆ อินพุตเพลสของทรานสิชันมีโทเค็นภายในเพลสมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักของอาร์กจากเพลสไปที่ทรานสิชัน
2) กฎการฟายริง (Firing Rule) เมื่อทรานสิชันถูกอีนาเบิล ทรานสิชันอาจจะถูกฟายริงหรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบและเงื่อนไขของการฟายริงทรานสิชัน หลังจากทรานสิชันถูกฟายริง จะทำให้มาร์กกิงในเพทริเน็ตเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจำนวนโทเค็นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของอาร์กที่ต่อจากเพลสไปที่ทรานสิชันจากรูปที่ 2.4 จะถูกลบออกไป และจำนวนโทเค็นที่มีค่าเท่ากับน้ำหนักของอาร์กที่ต่อจากทรานสิชันไปที่เพลสจะถูกสร้างขึ้นใหม่ตามรูปที่ 2.4




*รูปที่ 2.3 ก่อนการฟายริงทรานสิชัน [4]*




*รูปที่ 2.4 หลังการฟายริงทรานสิชัน [4]*

จากรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างทรานสิชัน T1 ก่อนการฟายริง ทรานสิชัน T1 ถูกอีนาเบิล เนื่องจากอินพุตเพลส P1 มีจำนวนโทเค็นเท่ากับ 2 ซึ่งเท่ากับจำนวนน้ำหนักของอาร์กจากเพลส P1 ไปยังทรานสิชัน T1 เมื่อทรานสิชันถูกอีนาเบิล ทรานสิชัน T1 จะถูกฟายริงทำให้จำนวนโทเค็นจากเพลส P1 จำนวน 2 ถูกลบออกไปจาก P1 และโทเค็นจะถูกสร้างขึ้นใหม่ที่เพลส P2 และ P3 เท่ากับจำนวนน้ำหนักของอาร์กที่ต่อจากทรานสิชันไปยังเพลส ดังรูปที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**4) คุณสมบัติที่สำคัญของเพทริเน็ต**

คุณสมบัติที่สำคัญของเพทริเน็ต [6] ประกอบไปด้วยรายละเอียด ดังนี้

1) ความปลอดภัย (Safeness) เป็นคุณสมบัติที่จำนวนโทเค็นในแต่ละเพลสมีสูงสุดได้เพียง 1 โทเค็นตลอดกระบวนการทำงาน ส่วนใหญ่ใช้คุณสมบัตินี้ในการออกแบบอุปกรณ์เกี่ยวกับฮาร์ดแวร์ (Hardware)
2) ขอบเขต (Boundedness) เป็นคุณสมบัติที่จำนวนโทเค็นในแต่ละเพลสต้องไม่เกินความจุ (Capacity) ที่ได้กำหนดในเพลสตลอดกระบวนการทำงาน
3) ความคงอยู่ (Liveness) เป็นคุณสมบัติที่ทรานสิชันทุกทรานสิชันสามารถฟายริงได้ หากระบบไม่มีคุณสมบัตินี้ หมายความว่าอาจจะทำให้ระบบเกิด Deadlock ได้

### 2.1.3 สโตแคสติกเพรทิเน็ต

สโตแคสติกเพทริเน็ต [2, 7] เป็นแบบจำลองที่มีส่วนขยายออกมาจากเพทริเน็ต ซึ่งสโตแคสติกเพทริเน็ตสามารถจำลองสถานะของระบบเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนสถานะในระบบได้เช่นกัน เหมือนเพทริเน็ต แต่สำหรับสโตแคสติกจะมีเงื่อนไขของค่าหน่วงการฟายริง (Firing delay) ของทรานสิชันเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งทรานสิชันจะเกิดการฟายริงหรือไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าหน่วงการฟายริง

**1) โครงสร้างของสโตแคสติกเพทริเน็ต**

โครงสร้างของสโตแคสติกเพทริเน็ต [2] ประกอบด้วย SPN = (P, T, $\mathbf{I}$, O, $M_0$, $\boldsymbol{\Lambda}$) โดยกำหนดให้ m = {1,2,...}

- P = {$P_1$, $P_2$, $P_3$, ..., $P_m$} เป็นเซตของเพลส
- T = {$T_1$, $T_2$, $T_3$, ..., $T_m$} เป็นเซตของทรานสิชัน
- $\mathbf{I} \subset$ P x T เป็นเซตของอินพุตฟังก์ชัน ซึ่งแสดงโดยอาร์กจากเพลสไปสู่ทรานสิชัน
- O $\subset$ T × P เป็นเซตของเอาต์พุตฟังก์ชัน ซึ่งแสดงโดยอาร์กจากทรานสิชันไปสู่เพลส
- $M_0$ เป็นมาร์กกิงเริ่มต้น (Initial Marking) ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนโทเค็นเริ่มต้นให้กับเพลสต่างๆ
- $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ เป็นลำดับของอัตราการฟายริง (Array of firing rate) ที่มีความสัมพันธ์กับทรานสิชัน

ค่าหน่วงของฟายริง (Firing delay) มีความสัมพันธ์กับทรานสิชันโดยตรงต้องกำหนดลงไปก่อนที่ทรานสิชันจะฟายริง ซึ่งค่าหน่วงของฟายริงเป็นตัวแปรแบบสุ่ม (Random variable) โดยตัวแปรสุ่มมี 2 ประเภทได้แก่

1) ตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete random variable) ถ้า X มีค่าเป็นจำนวนที่นับได้ถ้วน เช่น การโยนเหรียญ 5 อัน โดย X แทนจำนวนหัวที่ได้ เพราะฉะนั้น X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีค่าเป็น 0, 1, 2, 3, 4, 5 ดังนั้น X เป็นตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่อง
2) ตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (continuous random variable) ถ้า X มีค่าต่อเนื่องกันได้หลายค่านับไม่ถ้วน เช่น ค่าของน้ำหนักของนักเรียนมัธยมศึกษา จะอยู่ในช่วง 40-90 กิโลกรัม เขียนได้ว่า 40 < X < 90 กิโลกรัม ดังนั้น X เป็นตัวแปรสุ่มต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยจะศึกษาตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องเพราะเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแถวคอยที่มีการแจกแจงแบบเอ็กโพเนนเชียลซึ่งถูกใช้ในการจำลองเวลาที่ลูกค้าเข้ามาใช้บริการและระยะเวลาที่ให้บริการกับลูกค้า ซึ่งในการคำนวณความน่าจะเป็นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ฟังก์ชันดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) ตามรูปสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$F(x) = \lambda e^{-\lambda x} \ , x \geq 0 \qquad (2.1)$$

โดยที่

- $F(x)$ คือ ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง ณ เวลาที่ X
- λ หรือ $\frac{1}{mean}$ คือ อัตราการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ
- $mean$ คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาในการให้บริการแต่ละจุดให้บริการ
- $x$ คือ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ณ หน่วยเวลานั้นๆ
- $e$ คือ เป็นค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ โดย e มีค่าประมาณ 2.71828

2) ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) ตามรูปสมการที่ 2.2 ดังนี้

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \ , x \geq 0 \qquad (2.2)$$

โดยที่

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในงานวิจัยจะใช้การคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงสะสม เป็นการคำนวณเพื่อศึกษาหรือคาดการณ์เกี่ยวกับสถานการณ์ในอนาคต ณ เวลาที่กำหนดวาเปนอยางไร เช่น การเข้าแถวคอยเพื่อเข้าไปตรวจรักษาสุขภาพที่โรงพยาบาล สมมุติวาเวลา 09.00 น. มีผู้ป่วยจำนวน 50 คน กำลังรอที่จุดรับบริการเพื่อรอเข้ารับการตรวจรักษากับแพทย์ ถ้าคำถามคือ ณ นาทีที่ 15 (กรณีใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น) หรือ ภายในเวลา 15 นาที (กรณีใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม) โอกาสที่ผู้ป่วยคนที่ 10 จะรักษาแล้วเสร็จมีค่าความน่าจะเป็นเป็นเท่าใด หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่าภายใน 15 นาที ผู้ป่วยคนนั้นไม่สามารถที่จะรักษาได้แล้วเสร็จ เป็นต้น

**2) แบบจำลองของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไป**

แบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไปเป็นแบบจำลองที่เป็นส่วนขยายของแบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตโดยมีการเพิ่มทรานสิชันที่ไม่ต้องกำหนดเวลา (Immediate Transitions) เข้ามาตามตารางที่ 2.4

*ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไป*

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
|  | ทรานสิชันที่ไม่ต้องกำหนดเวลา มีลักษณะเป็นแท่งเดียวใช้เพื่อกำหนดทรานสิชันที่ไม่ต้องการกำหนดเวลาและทรานสิชันนี้มีลำดับความสำคัญในการทำงานสูงกว่าทรานสิชันที่ต้องกำหนดเวลา |

**3) รูปแบบของทรานสิชัน**

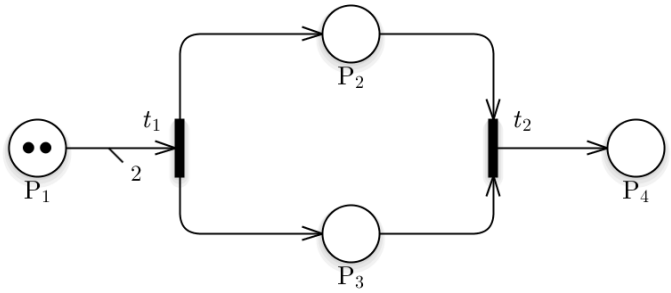
แบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตหรือแบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไปมีรูปแบบของทรานสิชัน [2] 2 รูปแบบ ดังนี้

1) ทรานสิชันที่ต้องกำหนดเวลา (Timed Transitions) ซึ่งทรานสิชันนี้จะมีคุณสมบัติเหมือนกับทรานสิชันที่ได้อธิบายในแบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ต โดยต้องกำหนดอัตราของการฟายริงเข้าไปที่ทรานสิชัน
2) ทรานสิชันที่ไม่ต้องกำหนดเวลา (Immediate Transitions) เป็นทรานสิชันที่สามารถฟายริงได้โดยไม่ต้องกำหนดอัตราการฟายริง แต่จะตรวจสอบจากจำนวนโทเค็นมีค่าเท่ากับน้ำหนักของอาร์กที่ต่อจากเพลสเคลื่อนย้ายจำนวนโทเค็นจากเพลสไปยังทรานสิชันโดยเคลื่อนย้ายโทเค็นเท่ากับจำนวนน้ำหนักของอาร์กที่ต่อจากทรานสิชันไปยังอีกเพลสหนึ่งโดยไม่ต้องรอเวลา และจะมีลำดับความสำคัญในการทำงานสูงกว่าทรานสิชันที่ต้องกำหนดเวลา

### 2.1.4 ริชอะบิลิตี้เซต

ริชอะบิลิตี้เซต [7, 8] เป็นตัวแทนของเซตของรีชเอเบิลมาร์กกิง (Reachable marking) ซึ่งเซตทั้งหมดที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงมาร์กกิงทั้งหมดของความเปลี่ยนแปลงของเพทริเน็ตนั้นจากมาร์กกิงเริ่มต้น $M_0$ ณ เวลาใดๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 2.5 แบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โดยใช้ริชอะบิลิตี้เซต*

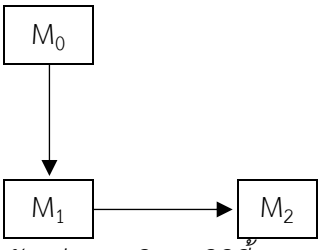
จากรูปที่ 2.5 ในตอนแรกกำหนดมาร์กกิงเริ่มต้นเป็น (2, 0, 0, 0) ซึ่งจะพบว่าทรานสิชัน $t_1$ สามารถยิงได้ โดยมาร์กกิงใหม่ที่เกิดขึ้นจากการยิงทรานสิชัน $t_1$ มีค่าเท่ากับ (0, 1, 1, 0) ทำการฟายริงทรานสิชันต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งการทำงานของระบบครบทุกขั้นตอนหรือสถานะของระบบซ้ำกับสถานะที่ผ่านมา และสุดท้ายมาร์กกิงชุดใหม่ที่เกิดขึ้นจากการยิง $t_2$ มีค่าเท่ากับ (0, 0, 0, 1) ก็จะได้เป็นริชอะบิลิตี้เซตทั้งหมดตามตารางที่ 2.5

*ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ต*

| **มาร์กกิงปัจจุบัน** | **เซตมาร์กกิงปัจจุบัน** | | | | **ทรานสิชันที่ฟายริง** | **มาร์กกิงถัดไป** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **$P_1$** | **$P_2$** | **$P_3$** | **$P_4$** | | |
| **$M_0$** | 2 | 0 | 0 | 0 | t1 | **$M_1$** |
| **$M_1$** | 0 | 1 | 1 | 0 | t2 | **$M_2$** |
| **$M_2$** | 0 | 0 | 0 | 1 | - | - |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในการแสดงความสัมพันธ์ของการลำดับการฟายริงทรานสิชันและมาร์กกิง เราสามารถใช้รีชอะบิลิตี้กราฟ (Reachability Graph) แสดงความสัมพันธ์ว่ามาร์กกิงที่เกิดขึ้นเกิดจากการฟายริงทรานสิชันของมาร์กกิงชุดใด โดยนำริชอะบิลิตี้เซตมาเขียนเป็นเส้นความสัมพันธ์ของแต่ละเซต ดังรูปที่ 2.6




*รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของริชอะบิลิตี้กราฟ*

### 2.1.5 ตัวแบบมาร์คอฟ (Markov Model)

ตัวแบบมาร์คอฟ [9-11] คือ ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่จะช่วยพยากรณ์ความน่าจะเป็น ในการเกิดสถานะใดสถานะหนึ่งในอนาคตเมื่อเหตุการณ์ต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป เช่น ลูกค้าชั้นดีชำระหนี้ตรงเวลาทุกเดือนไปเป็นลูกหนี้ค้างชำระราย 1 เดือน หรือเปลี่ยนไปเป็นลูกหนี้ค้างชำระราย 2 เดือน นั่นหมายถึง ลูกค้าสามารถเปลี่ยนสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่งในงวดถัดไปได้ หรือจะเรียกสภาพการเปลี่ยนจากลูกหนี้ลักษณะหนึ่งไปเป็นอีกลักษณะหนึ่งว่า “การเปลี่ยนแปลงสถานะ” ซึ่งจะมีประโยชน์มากขึ้นเมื่อนำตัวเลขหรือสถิติในอดีต มาคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อนำไปพยากรณ์การเกิดสถานะในอนาคต

**1) ลักษณะของตัวแบบมาร์คอฟ**

การใช้ตัวแบบมาร์คอฟในการวิเคราะห์เพื่อพยากรณ์ความน่าจะเป็นในการเกิดสถานะในอนาคตได้ จะต้องมีองค์ประกอบที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

1) สถานะ (State) คือ สภาพที่เป็นอยู่ในเวลาใดเวลาหนึ่ง กำหนดให้สถานะ i ใดๆ แทนด้วย “$S_i$” เช่น การชำระหนี้ตรงเวลาทุกเดือน แทนด้วย $S_1$, ค้างชำระราย 1 เดือน แทนด้วย $S_2$ และค้างชำระราย 2 เดือน แทนด้วย $S_3$ เป็นต้น
2) เหตุการณ์ (Event) คือ สิ่งที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เช่น เหตุการณ์วันนี้-วันพรุ่งนี้-วันมะรืน เป็นต้น
3) ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Transition Probability) คือ ค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง เมื่อเหตุการณ์หรือวันเวลาเปลี่ยนแปลงไปแทนความน่าจะเป็นใน การเปลี่ยนแปลงสถานะด้วย $P_{ij}$ โดยที่

   $P_{ij}$ หมายถึง ค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ i ($S_i$) ไปเป็นสถานะที่ j ($S_j$)

   โดยที่ i = 1,2,3,...,m

   j = 1,2,3,...,n

   ทั้งนี้การแสดงค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะจะอยู่ในรูปแบบของทศนิยม ซึ่งมี ค่าความน่าจะเป็นอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

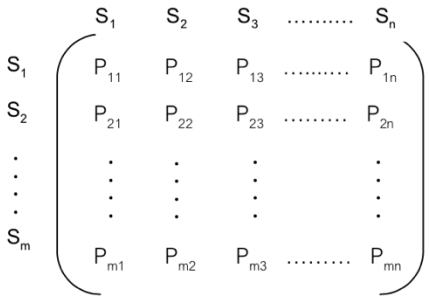
**2) รูปแบบการวิเคราะห์มาร์คอฟ**

ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะ สามารถแสดงได้ใน 2 รูปแบบ คือ แสดงในรูปแบบของเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง (Transition Matrix) และห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) รูปแบบของเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง คือ เมตริกซ์ที่แสดงให้ทราบถึงความน่าจะเป็นของการ เปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งเมื่อเหตุการณ์หรือวัน เวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

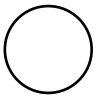
เปลี่ยนแปลงไป โดยมีวิธีใน การเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกจัตุรัส ที่มีจำนวนสถานะเท่ากันทั้งด้านแถวนอนและคอลัมน์ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่ง $P_{12}$ หมายถึง ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ 1 ($S_1$) ไปเป็นสถานะที่ 2 ($S_2$) ดังคอลัมน์ที่ 2



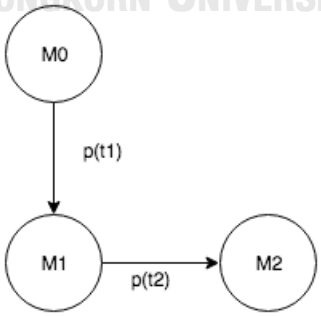

*รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของเมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง*

2) รูปแบบของห่วงโซ่มาร์คอฟ คือ การแสดงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนแปลงสถานะในอีกรูปแบบหนึ่งโดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.6

*ตารางที่ 2.6 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ*

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|---|---|
|  | แทนสถานะต่างๆ ของ $S_j$ (j = 1, 2, 3, ..., m) ซึ่งจำนวนของวงกลมจะขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในระบบ |
| | แทนความสัมพันธ์ของแต่ละสถานะว่าสถานะใดถูกเปลี่ยนไปเป็นสถานะใดในระบบ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 2.8 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟ*

จากรูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างของห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งในห่วงโซ่มาร์คอฟเป็นไปได้ที่มีเส้นแทนความสัมพันธ์มากกว่า 1 เส้นออกจากสถานะเดียวกัน เรียกเหตุการณ์นี้ว่า “การขัดกัน” (Conflict) [12, 13] ตามรูปที่ 2.9 ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์การขัดกันเกิดขึ้น ในการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะต้องถูกคำนวณโดยใช้สัดส่วน เช่น ทรานสิชัน $T_1$ และทรานสิชัน $T_2$ อีนาเบิลทั้งคู่ และสามารถที่จะฟายริงได้ทั้งคู่ ดังนั้น สมการที่ต้องใช้ในการคำนวณจะเป็นตามสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

$$p(T_1) = \frac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2} \tag{2.3}$$

$$p(T_2) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1+\alpha_2} \tag{2.4}$$

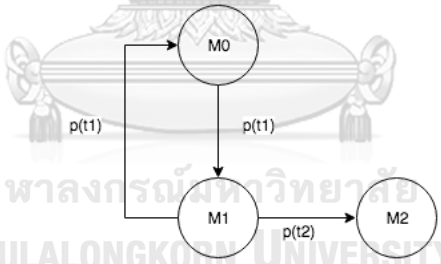
โดยที่

$P(T_1)$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน $T_1$ ได้ฟายริงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.3

$P(T_2)$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน $T_2$ ได้ฟายริงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.4

$\alpha_1$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน $T_1$ ได้ฟายริงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.1

$\alpha_2$ คือ ความน่าจะเป็นของทรานสิชัน $T_2$ ได้ฟายริงและคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.1




*รูปที่ 2.9 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟที่เกิดการขัดกัน*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 2.1.6 เอกซ์เอ็มแอล

ภาษาเอกซ์เอ็มแอล [14] เป็นภาษามาร์กอัปสำหรับใช้ในส่วนของการอธิบายเอต้องใช้งานกับระบบที่มีความแตกต่างกัน เช่น ใช้คอมพิวเตอร์มี่มีระบบปฏิบัติการคนละแบบหรืออาจจะเป็นคนละโปรแกรมประยุกต์ที่มีความต้องการสื่อสารข้อมูลถึงกัน ภาษาเอกซ์เอ็มแอลสามารถอ่านและทำความเข้าใจได้ง่าย มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถเขียนโปรแกรมภาษาเอกซ์เอ็มแอลได้โดยใช้บรรณาธิกรณ์ข้อความ (Text editor) ทั่วไป การดึงเอกสารมาใช้งานก็สามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากและยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

โครงสร้างภาษาเอกซ์เอ็มแอล

1. ส่วนของการการประกาศ

เป็นการบอกรุ่นของ เอกซ์เอ็มแอล และ รูปแบบการเข้ารหัสของเอกสาร

เช่น <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

2. ส่วนของป้ายระบุ (Tag) และส่วนย่อย (Element)

ตัวอย่างเช่น

```
<?xml version="1.0"?>
        <contact-info>
        <company>TutorialsPoint</company>
</contact-info>
```

- แท็กประกอบด้วย แท็กเปิดและแท็กปิด จากตัวอย่าง

  แท็กเปิด คือ <contact-info>

  แท็กปิด คือ </contact-info>

- อีลีเม็นสามารถมีได้หลายอีลีเม็น จากตัวอย่าง

  อีลีเม็น คือ <company>TutorialsPoint</company>

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 งานวิจัยชื่อ “Measure of Uncertainty in Process Models Using Stochastic Petri Nets and Shannon Entropy” โดย Martin Ibl * และ Jan C˘ apek ปี ค.ศ. 2015

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งานวิจัยนี้ **[10]** ได้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของการวัดความไม่แน่นอนของ Process Model ระหว่างสโตแคสติกเพทริเน็ตและ Shannon Entropy โดยขั้นตอนของการวิเคราะห์เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างสโตแคสติกเพทริเน็ต

ขั้นตอนที่ 2 สร้างริชเอเบิล มาร์กกิง (Reachable Marking) ของสโตแคสติกเพทริเน็ต

ขั้นตอนที่ 3 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ

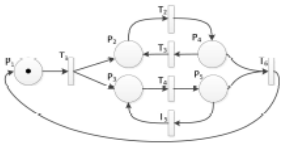
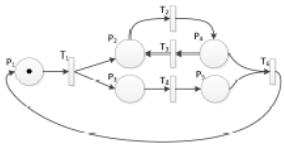
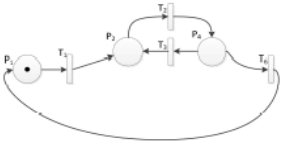
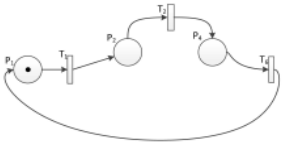
ขั้นตอนที่ 4 กำหนดอัตราของการฟายริงลงในห่วงโซ่มาร์คอฟ

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่าความน่าจะเป็นแบบ Steady-State ของแต่ละมาร์กกิง

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบคุณสมบัติของเพทริเน็ต 2 ตัว ได้แก่ Liveness และ Boundednes

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาความไม่แน่นอนของ Process Model โดยใช้ Entropy ของสโตแคสติกเพทริเน็ต

ขั้นตอนที่ 8 เปรียบเทียบค่าของความไม่แน่นอนที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 6 กับ วิธีคำนวณของ McCabe's และ Entropy-Based Uncertainty Measure Introduced ซึ่งสามารถสรุปได้จากรูปที่ 2.10

| Model | Entropy (Proposed Approach) | McCabe's Approach [13] | Entropy-Based Uncertainty Measure Introduced in [3] |
|---|---|---|---|
|  | 2.09 | 7 | 4 |
|  | 1.64 | 5 | 2 |
|  | 1.19 | 3 | 2 |
|  | 0.84 | 2 | 0 |

*รูปที่ 2.10 ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของงานวิจัยนี้กับวิธีของ McCabe's และ Entropy-Based Uncertainty Measure Introduced in [10]*

ซึ่งผู้วิจัยจะนำเอาแนวความคิดในการแปลงสโตแคสติกมาเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือและจะพัฒนาเพิ่มในส่วนของการแท็กโทเค็นที่เราสนใจก่อนจะได้ริชเอเบิล มาร์กกิง

**2.2.2 งานวิจัยชื่อ "Analytic Evaluation on Petri Net by Using Markov Chain Theory to Achieve Optimized Models" โดย H. Motameni, A. Movaghar, M. Siasifar, H. Montazeri and A. Rezaei ปี ค.ศ.2008**

งานวิจัยฐ์ **[9]** ได้นำเสนอแนวความคิดในการประเมินสมรรถนะของซอฟต์แวร์ที่ได้ออกแบบโดยใช้สโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไปและทฤษฎีของห่วงโซ่มาร์คอฟ เนื่องจากว่าในการออกแบบซอฟต์แวร์โดยใช้ Unified Model Language (UML) ไม่สามารถประเมินสมรรถนะของซอฟต์แวร์ที่เน้นในส่วนของข้อกำหนดด้านการใช้งาน (Non-Functional Requirement) ได้ จึงต้องนำแบบจำลองดังกล่าวข้างต้นมาช่วยในการประเมินเชิงสมรรถนะเพื่อที่จะได้ทราบว่าสิ่งที่ได้ออกแบบไว้ดีหรือไม่อย่างไร ขั้นตอนในการจัดทำเครื่องมือสามารถสรุปได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการแปลงแผนภาพกิจกรรม (Activity Diagram) เป็นสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไป โดยใช้หลักการในงานวิจัย "From UML Activity Diagrams to Stochastic Petri Nets: Application to Software Performance Engineering" ของ Merseguer, J., J.P. L´opezGrao และ J. Campos ซึ่งในการวาดแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตจะใช้เครื่องมือ "NFPG"

ขั้นตอนที่ 2 สร้างรีชเอบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วไป

ขั้นตอนที่ 3 รีดิวซ์ Vanishing State ให้เหลือเพียง Tangible State

ขั้นตอนที่ 4 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดอัตราการฟายริงลงในห่วงโซ่มาร์คอฟ

ขั้นตอนที่ 6 รีดิวซ์ห่วงโซ่มาร์คอฟ

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณสมรรถนะของแบบจำลองทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ ด้านความมั่นคง, ด้านความเชื่อถือได้, ด้านสภาพพร้อมใช้งานและด้านสมรรถนะของประสิทธิภาพ โดยรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณจะใช้เป็นลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มในเวลาที่ต่อเนื่องกันในห่วงโซ่มาร์คอฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งผู้วิจัยจะนำเอาแนวความคิดในการแปลงสโตแคสติกมาเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

**2.2.3 งานวิจัยชื่อ "Automated Customer-Centric Performance Analysis of Generalised Stochastic Petri Nets Using Tagged Tokens" โดย Nicholas J. Dingle and Willian J. Knottenbelt ปี ค.ศ.2009**

เนื่องจากว่าปัจจุบันนี้ในระบบแถวคอย **[15]** การตรวจสอบว่าลูกค้าท่านใดใช้บริการถึงจุดบริการใดแล้วนั้นทำด้วยมือ ดังนั้น ผู้จัดทำวิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการในการตรวจสอบว่าลูกค้าท่านนี้ได้ใช้บริการถึงจุดใดโดยเครื่องมืออัตโนมัติ และได้นำเสนอ Generalized Stochastic Petri Nets เพื่อจำลองระบบแถวคอยดังกล่าว แต่ว่าก็ยังคงติดปัญหาเนื่องจากว่า Generalized Stochastic Petri Nets ยังไม่สามารถแบ่งแยกได้ว่าใครเป็นใคร หรือลูกค้าท่านใดมาใช้บริการก่อนหรือหลัง ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีการแท็กโทเค็นเพื่อนำมาวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ในระบบแถวคอยเพื่อจะทำให้ทราบว่าลูกค้าท่านใดมาใช้บริการก่อนหรือหลัง โดยแนวทางการทดสอบจะทดสอบกับระบบแถวคอยของโรงพยาบาลที่ผู้ป่วยได้เข้ามารับการรักษา

ซึ่งผู้วิจัยจะนำเอาแนวความคิดในแท็กโทเค็นในสโตแคสติกเพทริเน็ตมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือและนำกรณีศึกษาของระบบโรงพยาบาลมาเป็นกรณีทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 3วิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

ในบทนี้จะอธิบายภาพรวมและรายละเอียดของวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งจะนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนต่อไป มีรายละเอียดดังนี้

## 3.1 การแท็กโทเค็นของสโตแคสติกเพทริเน็ต

การแท็กโทเค็นของสโตแคสติกเพทริเน็ต คือ การดัดแปลงการทำงานของสโตแคสติกที่มีอยู่เดิม โดยการที่เราสนใจในลำดับของผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการในระบบแถวคอยซึ่งสามารถแท็กโทเค็นได้ทีละ 1 โทเค็นเท่านั้น เมื่อทรานสิชันเกิดการฟายริงโทเค็นจะถูกลบจากเพลสต้นทางและถูกเพิ่มลงที่เพลสปลายทางตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งเป็นการทำงานของการฟายริงของสโตแคสติกแบบเดิม ทางผู้วิจัยได้มีการดัดแปลงของสโตแคสติกเพทริเน็ตด้วยกันอยู่ 2 ส่วน ได้แก่

1) เพลสของสโตแคสติก

ผู้ใช้งานสามารถกำหนดประเภทของเพลสได้ในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์ ซึ่งในเพลสแต่ละเภทสามารถมีได้หลายๆ เพลสได้ ดังตัวอย่างตามรูปที่ 3.1 ที่เป็นแบบจำลองสโตแคสติกเพทริเน็ตของการผลิตรถยนต์ โดยมีประเภทของเพลสเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- ประเภทเพลสที่เป็นกระบวนการทั่วๆ ไป ประกอบด้วย Foundry, Power_Train, Body_in_white, Final_assembly และ Deliver_product
- ประเภทเพลสที่เกี่ยวกับการปั้มชิ้นส่วนตัวถัง ประกอบด้วย Press และ WaitPress
- ประเภทเพลสที่เกี่ยวกับการพ่นสี ประกอบด้วย Pain และ WaitPaint

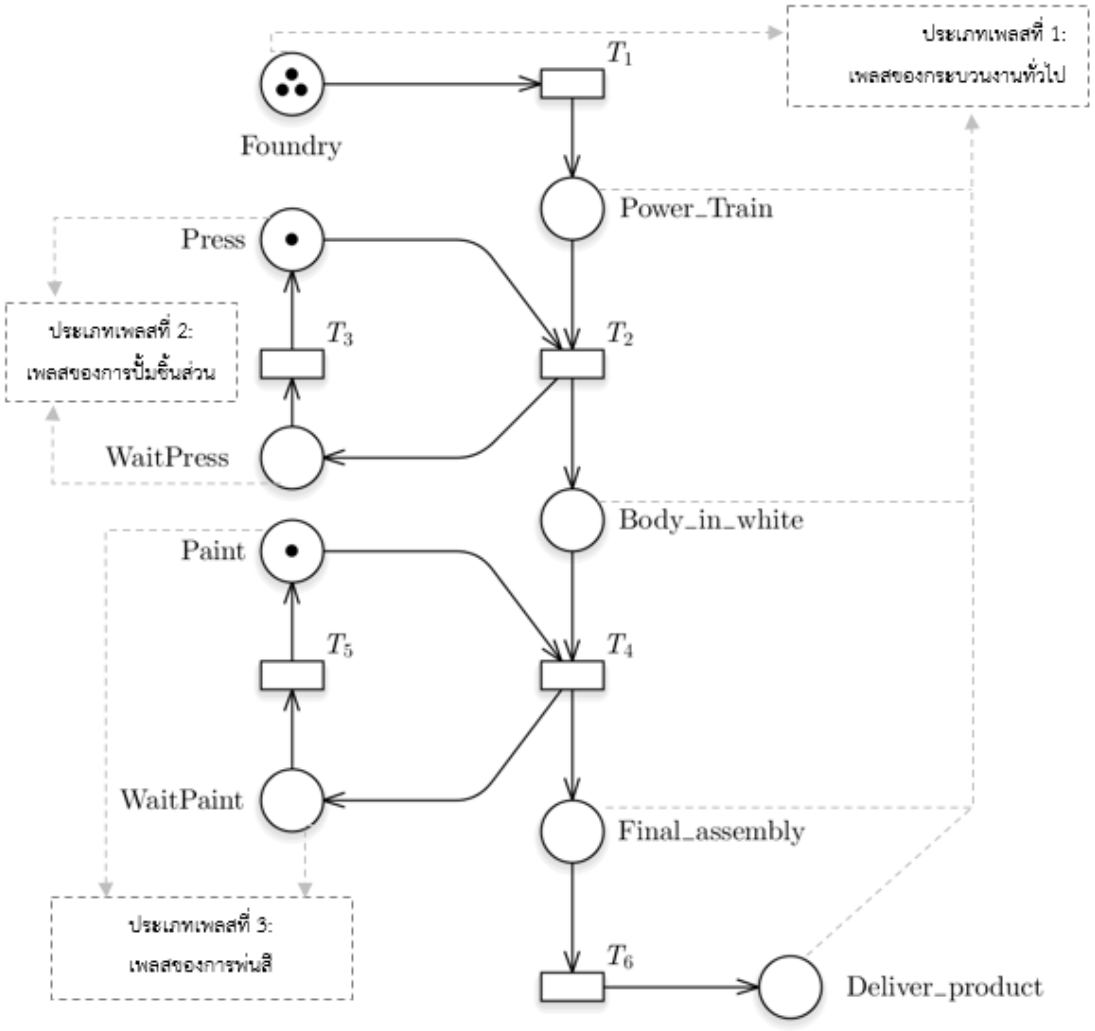
โดยแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการผลิตรถยนต์จะเริ่มจากการหลอมเหล็กหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ (Foundry) แล้วตามด้วยการสร้างเครื่องยนต์และระบบขับเคลื่อน (Power Train) ซึ่งทำไปพร้อมๆ กับการปั้มชิ้นส่วนตัวถังและแซสซี (Press) เมื่อแล้วเสร็จก็จะดำเนินการประกอบโครงรถยนต์ (Body_in_White) และพ่นสีรถยนต์ (Paint) หลังจากนั้นประกอบรถยนต์ (Final_assembly) สุดท้ายก็ทำการส่งมอบรถยนต์ให้ลูกค้า (Deliver_product)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) การฟายริงของสโตแคสติก

โทเค็นจะถูกลบจากเพลสต้นทางและถูกเพิ่มลงที่เพลสปลายทางเฉพาะเพลสที่มีประเภทของเพลสเป็นประเภทเดียวกันเท่านั้น

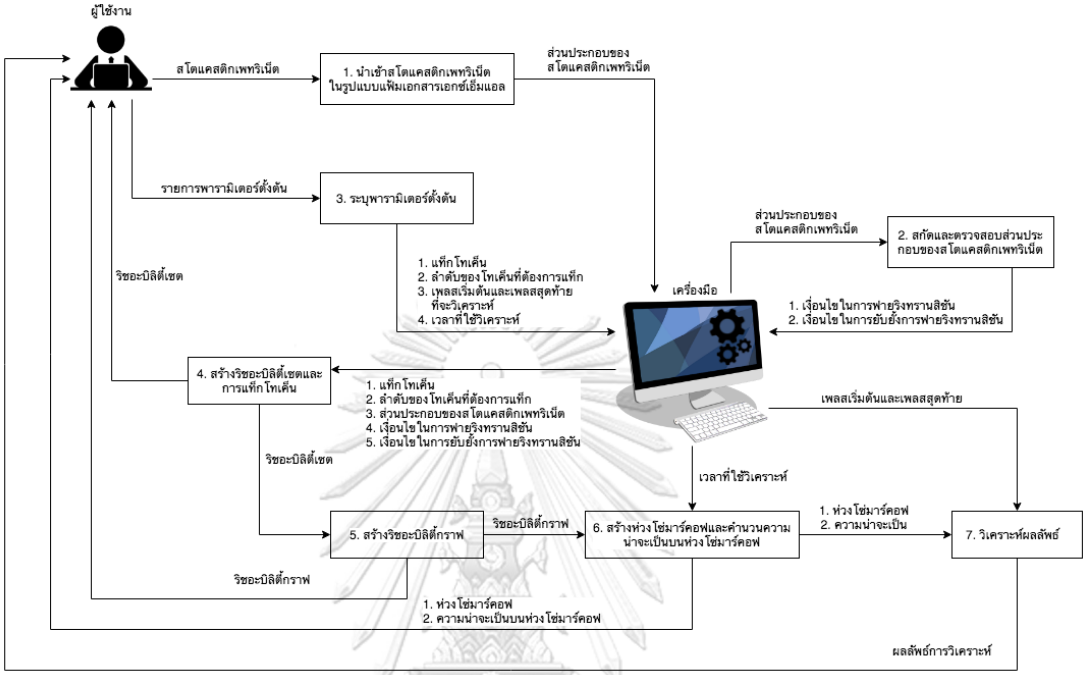
จากทั้ง 2 ส่วนที่ที่ได้กล่าวข้างต้น เราเรียกสโตแคสติกเพทริเน็ทที่ดัดแปลงว่า “Stochastic Petri Nets with Single Tagged Token” ในการแท็กโทเค็นเราจะทำไปพร้อมกับตอนสร้างริชอะบิลิตี้เซต ซึ่งเมื่อโทเค็นถูกแท็กจะถูกใส่วงเล็บ ( ) ครอบจำนวนโทเค็นที่อยู่ในเพลสนั้น




*รูปที่ 3.1 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตที่เป็นการผลิตรถยนต์ ที่มีเพลสเป็น 3 ประเภท*

## 3.2 ภาพรวมวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

ภาพรวมวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ประกอบด้วย 7 ส่วนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.2




*รูปที่ 3.2 ภาพรวมแสดงวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ*

รูปที่ 3.2 แสดงถึงภาพรวมวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 7 ส่วนการทำงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ผู้ใช้งานนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) เครื่องมือทำการสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต
3) ผู้ใช้งานต้องทำการระบุพารามิเตอร์ตั้งต้น
4) เครื่องมือสร้างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น
5) เครื่องมือสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ
6) เครื่องมือสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวนความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงสะสมบนห่วงโซ่มาร์คอฟได้
7) เครื่องมือทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์

ซึ่งรายละเอียดของวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟของทั้ง 7 ส่วนการทำงานจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป

## 3.3 รายละเอียดวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

สำหรับรายละเอียดของวิธีการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ มีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.1 นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล

ผู้ใช้งานต้องทำการจัดเตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลตามรูปแบบ ดังตารางที่ 3.1

*ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตและแท็กเอกซ์เอ็มแอล*

| สัญลักษณ์ | แท็กเอกซ์เอ็มแอล | คุณลักษณะ | คำอธิบาย |
|---|---|---|---|
| - | <SPN/> | - | ราก (Root) ของเอ็กซ์เอ็มแอล |
| เพลส | <place/> | id | กำหนดไอดีของเพลส |
| | | name | กำหนดชื่อของเพลส |
| | | initialMarking | กำหนดจำนวนโทเค็นเริ่มต้นของเพลส |
| | | capacity | กำหนดจำนวนโทเค็นที่สามารถจุได้ในเพลส |
| | | type | กำหนดประเภทของเพลส |
| ทรานสิชัน | <transition/> | id | กำหนดไอดีของทรานสิชัน |
| | | name | กำหนดชื่อของทรานสิชัน |
| | | type | กำหนดประเภทของทรานสิชัน โดยสามารถกำหนดได้ 2 ประเภท ได้แก่<br>• immediate<br>• timed |
| | | mean | กำหนดค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการบริการ |
| อาร์ก | <arc/> | id | กำหนดไอดีของอาร์ก |
| | | name | กำหนดชื่อของอาร์ก |
| | | source | กำหนดจุดเริ่มต้นของอาร์ก |
| | | target | กำหนดจุดสิ้นสุดของอาร์ก |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตและแท็กเอกซ์เอ็มแอล (ต่อ)*

| สัญลักษณ์ | แท็กเอกซ์เอ็มแอล | คุณลักษณะ | คำอธิบาย |
|---|---|---|---|
| อาร์ก | <arc/> | type | กำหนดประเภทของอาร์ก โดยสามารถกำหนดได้ 2 ประเภท ได้แก่<br>• normal<br>• inhibitor |
| | | weight | กำหนดน้ำหนักของอาร์ก |

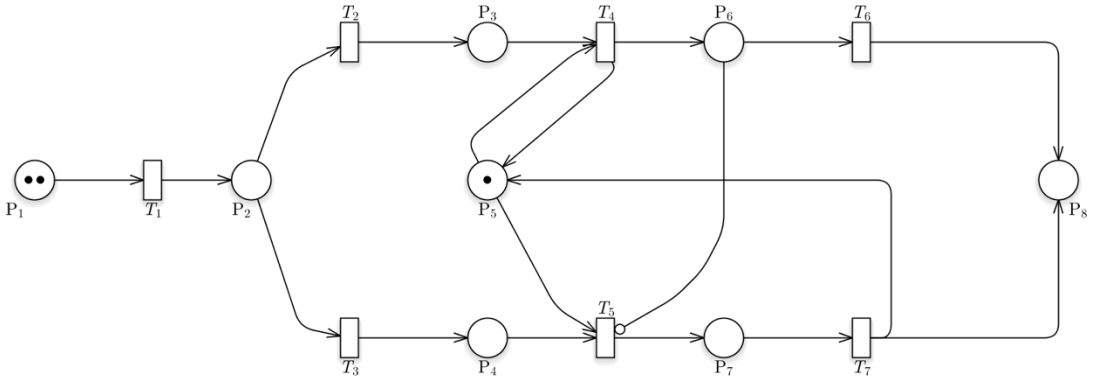
เมื่อผู้ใช้งานได้จัดเตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบเอกสารเอกซ์เอ็มแอลไฟล์ตามรูปแบบและเงื่อนไขที่ได้กำหนดในตารางที่ 3.1 เรียบร้อยแล้ว ผลลัพธ์จะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 3.3 ซึ่งเตรียมที่จะนำเข้าเครื่องมือในลำดับถัดไป

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="2" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P3" name="P3" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P4" name="P4" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P5" name="P5" initialMarking="1" capacity="5" type="Switch"/>
        <place id="P6" name="P6" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P7" name="P7" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P8" name="P8" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="4"/>
        <transition id="T2" name="T2" type="timed" mean="2"/>
        <transition id="T3" name="T3" type="timed" mean="3"/>
        <transition id="T4" name="T4" type="timed" mean="5"/>
        <transition id="T5" name="T5" type="timed" mean="15"/>
        <transition id="T6" name="T6" type="timed" mean="10"/>
        <transition id="T7" name="T7" type="timed" mean="8"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P2 to T2" name="P2 to T2" source="P2" target="T2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P2 to T3" name="P2 to T3" source="P2" target="T3" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P3 to T4" name="P3 to T4" source="P3" target="T4" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P4 to T5" name="P4 to T5" source="P4" target="T5" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P5 to T4" name="P5 to T4" source="P5" target="T4" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P5 to T5" name="P5 to T5" source="P5" target="T5" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P6 to T6" name="P6 to T6" source="P6" target="T6" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P6 to T5" name="P6 to T5" source="P6" target="T5" type="inhibitor" weight="1"/>
        <arc id="P7 to T7" name="P7 to T7" source="P7" target="T7" type="normal" weight="1"/>

        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T2 to P3" name="T2 to P3" source="T2" target="P3" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T3 to P4" name="T3 to P4" source="T3" target="P4" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T4 to P6" name="T4 to P6" source="T4" target="P6" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T4 to P5" name="T4 to P5" source="T4" target="P5" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T5 to P7" name="T5 to P7" source="T5" target="P7" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T6 to P8" name="T6 to P8" source="T6" target="P8" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T7 to P5" name="T7 to P5" source="T7" target="P5" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T7 to P8" name="T7 to P8" source="T7" target="P8" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

*รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอล*

จากรูปที่ 3.3 เป็นตัวอย่างของสโตแคสติกเพทริเน็ตที่อยู่ในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอล หากแสดงแทนด้วยแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตเชิงกราฟิกจะได้ตามรูปที่ 3.4




*รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ต*

### 3.3.2 สกัดและตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต

1) การสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต

จากที่ได้กล่าวถึงส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตในบทที่ 2 จะพบว่าองค์ประกอบเชิงสัญลักษณ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตมีทั้งหมด 6 องค์ประกอบ ได้แก่ เพลส, ทรานสิชัน, อินพุตฟังก์ชัน, เอาต์พุตฟังก์ชัน, มาร์กกิงเริ่มต้นและอัตราการฟายริง ซึ่งสามารถแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้ SPN = (P, T, I, O, $M_0$, **Λ**) ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อทำการสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตจากเอกซ์เอ็มแอลตามรูปที่ 3.3 แล้วจะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3.2

*ตารางที่ 3.2 การสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต*

| **ส่วนประกอบของ สโตแคสติกเพทริเน็ต** | **ผลลัพธ์การสกัดส่วนประกอบ** |
|---|---|
| เพลส | {P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8} |
| ทรานสิชัน | {T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7} |
| อินพุตฟังก์ชัน→น้ำหนักของอาร์ก | {(P1,T1) →1, (P2,T2) →1, (P2,T3) →1, (P3,T4) →1, (P4,T5) →1, (P5,T4) →1, (P5,T5) →1, (P6,T6) →1, (P6,T5) →1, (P7,T7) →1} |

*ตารางที่ 3.2 การสกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต (ต่อ)*

| **ส่วนประกอบของ สโตแคสติกเพทริเน็ต** | **ผลลัพธ์การสกัดส่วนประกอบ** |
|---|---|
| เอาต์พุตฟังก์ชัน→น้ำหนักของอาร์ก | {(T1,P2) →1, (T2,P3) →1, (T3,P4) →1, (T4,P6) →1, (T4,P5) →1, (T5,P7) →1, (T6,P8) →1, (T7,P5) →1, (T7,P8) →1} |
| มาร์กกิงเริ่มต้น | (2,0,0,0,1,0,0,0) |
| เวลาเฉลี่ยที่ใช้บริการ | {4,2,3,5,15,10,8} |

2) การตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต

จากตารางที่ 3.1 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตและแท็กของเอ็กซ์เอ็มแอล เครื่องมือจำเป็นต้องตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตว่าครบถ้วนและถูกต้องหรือไม่ โดยการตรวจสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ตรวจสอบส่วนประกอบตามกฎของสโตแคสติกเพทริเน็ท และ ตรวจสอบส่วนประกอบในเอ็กเอ็มแอลไฟล์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1) ตรวจสอบส่วนประกอบตามกฎของสโตแคสติกเพทริเน็ท

- ต้องมีการกำหนดโทเค็นในเพลสอย่างน้อย 1 โทเค็นในเพลสใดๆ
- ทรานสิชันต้องมีเส้นอาร์กชี้ไปที่เพลสเท่านั้น
- เพลสต้องมีเส้นอาร์กชี้ไปที่ทรานสิชันเท่านั้น

2.2) ตรวจสอบส่วนประกอบในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์ เช่น มีคุณลักษณะตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่, จำเป็นต้องระบุหรือไม่ และมีเงื่อนไขตามที่ได้ระบุเอาไว้ของแต่ละแท็กเอกซ์เอ็มแอลหรือไม่ โดยรายละเอียดสามารถตรวจสอบได้ในตารางที่ 3.3

หากพบข้อผิดพลาดเครื่องมือจะทำการแจ้งเตือนแก่ผู้ใช้งานและไม่สามารถดำเนินขั้นตอนต่อไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต*

| แท็กเอกซ์เอ็มแอล | คุณลักษณะ | จำเป็นต้องระบุ | เงื่อนไขการตรวจสอบ |
|---|---|---|---|
| <SPN/> | - | ใช่ | ต้องเป็น <SPN> เท่านั้น |
| <place/> | Id | ใช่ | |
| | name | ใช่ | |
| | initialMarking | ใช่ | ต้องเป็นตัวเลขเท่านั้น |
| | capacity | ใช่ | - ต้องเป็นตัวเลขเท่านั้น<br>- ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ initialMarking |
| | type | ใช่ | |
| <transition/> | id | ใช่ | |
| | name | ใช่ | |
| | type | ใช่ | - เป็นได้แค่ค่า immediate หรือ timed เท่านั้น |
| | mean | ใช่ | - ต้องเป็นตัวเลขเท่านั้น<br>- หากประเภทของทรานสิชันเป็น immediate ต้องเป็นค่า 0 เท่านั้น |
| <arc/> | id | ใช่ | |
| | name | ใช่ | |
| | source | ใช่ | ต้องเป็น id ของเพลสหรือ id ทรานสิชันที่เท่านั้น |
| | target | ใช่ | ต้องเป็น id ของเพลสหรือ id ทรานสิชันที่เท่านั้น |
| | type | ใช่ | เป็นได้แค่ค่า normal หรือ inhibitor เท่านั้น |
| | weight | ใช่ | - ต้องเป็นตัวเลขเท่านั้น<br>- ต้องมีค่ามากกว่า 0 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อได้สกัดส่วนประกอบและตรวจสอบสโตแคสติกเพทริเน็ตแล้ว จะสามารถสรุปเป็นเงื่อนไขในการฟายริงทรานสิชันจากตัวอย่างสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอกซ์เอ็มแอลได้ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

*ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างเงื่อนไขในการฟายริงทรานสิชันและการยับยั้งทรานสิชัน*

| เงื่อนไขที่ | เอกซ์เอ็มแอล | เพลสต้นทาง | ทรานสิชัน | เพลสปลายทาง |
|---|---|---|---|---|
| **ประเภททรานสิชัน: Normal** | | | | |
| 1 | `<arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>` | P1 | T1 | P2 |
| 2 | `<arc id="P2 to T2" name="P2 to T2" source="P2" target="T2" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T2 to P3" name="T2 to P3" source="T2" target="P3" type="normal" weight="1"/>` | P2 | T2 | P3 |
| 3 | `<arc id="P2 to T3" name="P2 to T3" source="P2" target="T3" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T3 to P4" name="T3 to P4" source="T3" target="P4" type="normal" weight="1"/>` | P2 | T3 | P4 |
| 4 | `<arc id="P3 to T4" name="P3 to T4" source="P3" target="T4" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="P5 to T4" name="P5 to T4" source="P5" target="T4" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T4 to P5" name="T4 to P5" source="T4" target="P5" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T4 to P6" name="T4 to P6" source="T4" target="P6" type="normal" weight="1"/>` | P3<br>P5 | T4 | P5<br>P6 |
| 5 | `<arc id="P4 to T5" name="P4 to T5" source="P4" target="T5" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="P5 to T5" name="P5 to T5" source="P5" target="T5" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T5 to P7" name="T5 to P7" source="T5" target="P7" type="normal" weight="1"/>` | P4<br>P5 | T5 | P7 |
| 6 | `<arc id="P6 to T6" name="P6 to T6" source="P6" target="T6" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T6 to P8" name="T6 to P8" source="T6" target="P8" type="normal" weight="1"/>` | P6 | T6 | P8 |
| 7 | `<arc id="P7 to T7" name="P7 to T7" source="P7" target="T7" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T7 to P5" name="T7 to P5" source="T7" target="P5" type="normal" weight="1"/>`<br>`<arc id="T7 to P8" name="T7 to P8" source="T7" target="P8" type="normal" weight="1"/>` | P7 | T7 | P5<br>P8 |
| **ประเภททรานสิชัน: Inhibitor** | | | | |
| 8 | `<arc id="P6 to T5" name="P6 to T5" source="P6" target="T5" type="inhibitor" weight="1"/>` | P6 | T5 | n/a |

### 3.3.3 ระบุพารามิเตอร์ตั้งต้น

ผู้ใช้งานจำเป็นต้องระบุพารามิเตอร์ตั้งต้นเพื่อให้เครื่องมือสามารถนำไปเป็นข้อมูลในส่วนของการทำงานอื่นๆ ได้ เช่น ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น เป็นต้น โดยรายการพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้งานต้องระบุมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แท็กโทเค็น ระบุเพื่อให้ทราบว่าเมื่อทรานสิชันฟายริงในแต่ละครั้งโทเค็นที่เราแท็กไปอยู่ที่เพลสใด โดยแท็กโทเค็นจะแสดงผลในในริชอะบิลิตี้เซต สัญลักษณ์ในการแสดงผลเพื่อให้ทราบว่าเป็นแท็กโทเค็นจะแสดงด้วยวงเล็บ ( )
2) ลำดับของแท็กโทเค็น ระบุเพื่อให้ทราบถึงลำดับของโทเค็นที่เราต้องการแท็ก
3) เพลสสิ้นสุด ระบุเพลสสิ้นสุดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ว่าจากเพลสเริ่มต้น (ได้จากข้อ 1 แท็กโทเค็น) จนถึงเพลสสิ้นสุดมีโอกาสที่แท็กโทเค็นจะไปอยู่ที่จุดสิ้นสุดภายในระยะเวลาที่กำหนดมีค่าความน่าจะเป็นเป็นเท่าใด
4) เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์แถวคอย ระบุเพื่อใช้ในการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

### 3.3.4 สร้างริชอะบิลิตี้เซตและแท็กโทเค็น

เมื่อได้เงื่อนไขในการฟายริงทรานสิชันและเงื่อนไขในการยับยั้งการฟายริงทรานสิชันแล้ว จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การสร้างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็นในริชอะบิลิตี้เซตดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 1) การสร้างริชอะบิลิตี้เซต

ก่อนเริ่มการสร้างริชอะบิลิตี้เซตจะกำหนดสถานะของเซตออกเป็น 3 สถานะ ได้แก่ เซตใหม่ (เซตที่ไม่ซ้ำกับเซตใดๆ ในริชอะบิลิตี้เซต), เซตซ้ำซ้อน (เซตที่เกิดขึ้นซ้ำกับริชอะบิลิตี้เซตที่ได้เกิดขึ้นแล้วและจะไม่สร้างเซตขึ้นมาใหม่) และเซตสิ้นสุด (เซตที่ไม่มีทรานสิชันใดสามารถยิงได้แล้ว) โดยมีขั้นตอนในการสร้างดังนี้

1) ให้เซตเริ่มต้นเป็นเซตของมาร์กกิงเริ่มต้น $M_0$ โดยถือว่าเป็น “เซตใหม่”
2) เมื่อมี “เซตใหม่” ให้ดำเนินการดังนี้
   2.1) ถ้าเซตใหม่มีจำนวนโทเค็นในทุกๆ เพลส ซ้ำกับเซตที่อยู่ในเซตก่อนหน้า ให้สถานะของเซตนั้นเป็น “เซตซ้ำซ้อน”
   2.2) ถ้าไม่มีทรานสิชันใดสามารถยิงได้จากเซตนี้ให้สถานะของเซตเป็น “เซตสิ้นสุด”
   2.3) สำหรับเซตที่เป็นเซตใหม่ที่ไม่ใช่เซตซ้ำซ้อนหรือเซตสิ้นสุดให้ดำเนินการดังนี้
      1) สร้างเซตใหม่ขึ้นมา 1 เซตที่เป็นผลจากการฟายริง 1 ทรานสิชันของมาร์กกิงนั้นๆ โดยทุกครั้งที่ทำการยิงจะตรวจสอบจากข้อ 2) ใหม่ ทุกครั้ง
      2) ทำการฟายริงทรานสิชันต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งการทำงานของระบบครบทุกขั้นตอนหรือสถานะของระบบซ้ำกับสถานะที่ผ่านมา ก็จะได้เป็นริชอะบิลิตี้เซตทั้งหมด

3) เมื่อมี “เซตซ้ำซ้อน” ให้ดำเนินการดังนี้

3.1) ต้องไม่สร้างเซตใหม่ขึ้นมา

จากขั้นตอนของการสร้างริชอะบิลิตี้เซตข้างต้นสามารถเขียนอธิบายด้วยรหัสจำลอง (Pseudo Code) ได้ดังนี้

```
Algorithm CreateReachabilitySet

START

  READ initialMarking marking
  READ firingCondition condition
  STORE initialMarking in reachabilitySet
  DO (Transition is able to firing in firingCondition or not) WHILE
    SET newMarking to newReachabilitySet
    IF (newReachabilitySet is not exists in reachabilitySet) THEN
      STORE newReachabilitySet in reachabilitySet
    ENDIF

  ENDDO

END
```

**2) การแท็กโทเค็น**

เมื่อผู้ใช้งานได้เลือกว่าจะแท็กโทเค็นที่เพลสใด นั่นหมายความว่าเราจะนำเอาโทเค็นทั้งหมดที่อยู่ในเพลสนั้นมาเข้าแถวคอย เมื่อทรานสิชันเกิดการฟายริงในการแท็กโทเค็นสามารถอธิบายรายละเอียดได้ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) ลบโทเค็นออกจากเพลสต้นทาง โดยลำดับที่จะลบเป็นลำดับที่น้อยที่สุด เช่น ถ้ามี ลำดับ 1, 2 และ 3 เครื่องมือจะทำการลบลำดับที่ 1 ก่อน
2) เพิ่มโทเค็นตัวที่ลบจากข้อ 1) ลงไปที่เพลสปลายทางที่มีประเภทของทรานสิชันเป็นประเภทเดียวกัน

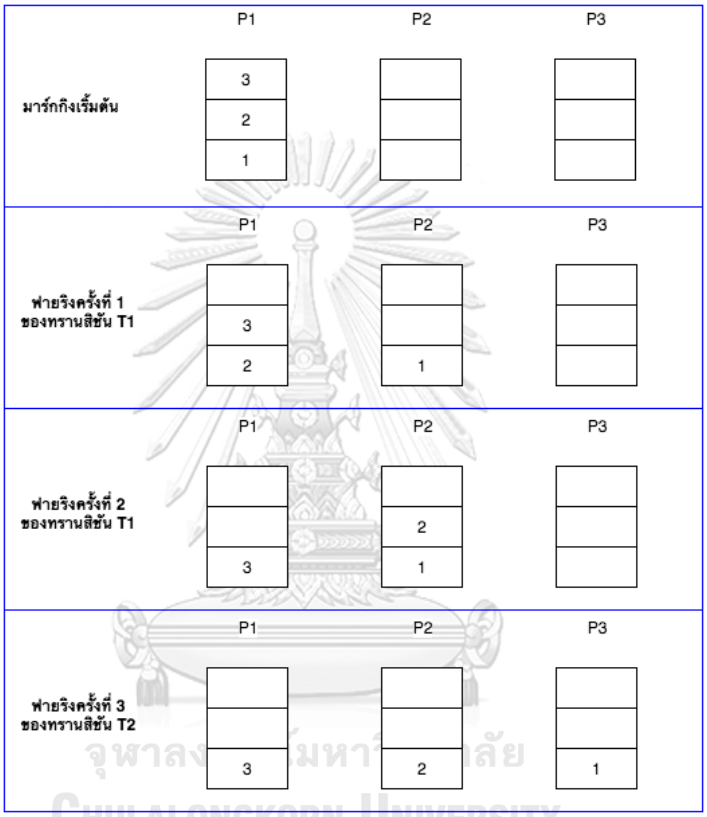
จากรูปที่ 3.1 ถ้าเราจะแท็กโทเค็นที่เพลส P1 สามารถอธิบายเรื่องการแท็กโทเค็นได้ตามรูปที่ 3.5 ซึ่งจะสามารถอธิบายเป็นลำดับการเกิดได้ดังนี้

1) เริ่มจากมาร์กกิงเริ่มต้น P1 มี 3 โทเค็น (1,2 และ 3), P2 ไม่มีโทเค็น และ P3 ไม่มีโทเค็น
2) เมื่อทรานสิชัน T1 (ฟายริงครั้งที่ 1) เกิดการฟายริงจะทำให้เกิด P1 เหลือ 2 โทเค็น (2 และ 3), P2 มี 1 โทเค็น (1), และ P3 ไม่มีโทเค็น

3) เมื่อทรานสิชัน T1 (ฟายริงครั้งที่ 2) เกิดการฟายริงจะทำให้เกิด P1 เหลือ 1 โทเค็น (3), P2 มี 2 โทเค็น (1,2), และ P3 ไม่มีโทเค็น

4) เมื่อทรานสิชัน T2 (ฟายริงครั้งที่ 3) เกิดการฟายริงจะทำให้เกิด P1 เหลือ 1 โทเค็น (3), P2 เหลือ 1 โทเค็น (2), และ P3 มี 1 โทเค็น (1)

จากลำดับการเกิดเป็นเพียงตัวอย่างเพื่อให้เห็นเข้าใจถึงการแท็กโทเค็นตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการแท็กโทเค็นในสโตแคสติกเพทริเน็ต*

สำหรับการสร้างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น สามารถสร้างเป็นริชอะบิลิตี้เซตจากสโตแคสติกเพทริเน็ตของรูปที่ 3.4 โดยสมมติว่าจะแท็กโทเค็นที่ P1 ในลำดับที่ 2 จะได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 3.5 ดังนี้

*ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น*

| มาร์กกิงปัจจุบัน | เซตมาร์กกิงปัจจุบัน | | | | | | | | ทรานสิชันที่ฟายริง | มาร์กกิงถัดไป |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ | | |
| $M_0$ | (2) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_1$ | $M_1$ |
| $M_1$ | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_1$<br>$T_2$<br>$T_3$ | $M_2$<br>$M_3$<br>$M_4$ |
| $M_2$ | 0 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_2$<br>$T_3$ | $M_5$<br>$M_6$ |
| $M_3$ | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_1$<br>$T_4$ | $M_5$<br>$M_7$ |
| $M_4$ | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_1$<br>$T_5$ | $M_6$<br>$M_8$ |
| $M_5$ | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_2$<br>$T_3$<br>$T_4$ | $M_9$<br>$M_{10}$<br>$M_{11}$ |
| $M_6$ | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_2$<br>$T_3$<br>$T_5$ | $M_{12}$<br>$M_{13}$<br>$M_{14}$ |
| $M_7$ | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | $T_1$<br>$T_6$ | $M_{11}$<br>$M_{15}$ |
| $M_8$ | (1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | $T_1$<br>$T_7$ | $M_{14}$<br>$M_{15}$ |
| $M_9$ | 0 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_4$ | $M_{16}$ |
| $M_{10}$ | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_4$<br>$T_5$ | $M_{17}$<br>$M_{18}$ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น (ต่อ)*

| มาร์กกิงปัจจุบัน | เซตมาร์กกิงปัจจุบัน | | | | | | | | ทรานสิชันที่ฟายริง | มาร์กกิงถัดไป |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ | | |
| $M_{11}$ | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | $T_2$<br>$T_3$<br>$T_6$ | $M_{16}$<br>$M_{17}$<br>$M_{19}$ |
| $M_{12}$ | 0 | 0 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_4$<br>$T_5$ | $M_{20}$<br>$M_{21}$ |
| $M_{13}$ | 0 | 0 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | $T_5$ | $M_{22}$ |
| $M_{14}$ | 0 | (1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | $T_2$<br>$T_3$<br>$T_7$ | $M_{21}$<br>$M_{22}$<br>$M_{19}$ |
| $M_{15}$ | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $T_1$ | $M_{19}$ |
| $M_{16}$ | 0 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | $T_4$<br>$T_6$ | $M_{23}$<br>$M_{24}$ |
| $M_{17}$ | 0 | 0 | 0 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | $T_6$ | $M_{25}$ |
| $M_{18}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | (1) | 0 | $T_7$ | $M_{26}$ |
| $M_{19}$ | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $T_2$<br>$T_3$ | $M_{24}$<br>$M_{25}$ |
| $M_{20}$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | 0 | 0 | $T_6$ | $M_{27}$ |
| $M_{21}$ | 0 | 0 | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | $T_7$ | $M_{24}$ |
| $M_{22}$ | 0 | 0 | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | $T_7$ | $M_{25}$ |
| $M_{23}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 0 | $T_6$ | $M_{28}$ |
| $M_{24}$ | 0 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | $T_4$ | $M_{28}$ |
| $M_{25}$ | 0 | 0 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | $T_5$ | $M_{29}$ |
| $M_{26}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | $T_4$ | $M_{30}$ |
| $M_{27}$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | (1) | $T_5$ | $M_{31}$ |
| $M_{28}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | $T_6$ | $M_{32}$ |
| $M_{29}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | (1) | 1 | $T_7$ | $M_{32}$ |
| $M_{30}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | $T_6$ | $M_{32}$ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้เซตและการแท็กโทเค็น (ต่อ)*

| มาร์กกิงปัจจุบัน | เซตมาร์กกิงปัจจุบัน | | | | | | | | ทรานสิชันที่ฟายริง | มาร์กกิงถัดไป |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ | $P_7$ | $P_8$ | | |
| $M_{31}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | $T_7$ | $M_{32}$ |
| $M_{32}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | - | - |

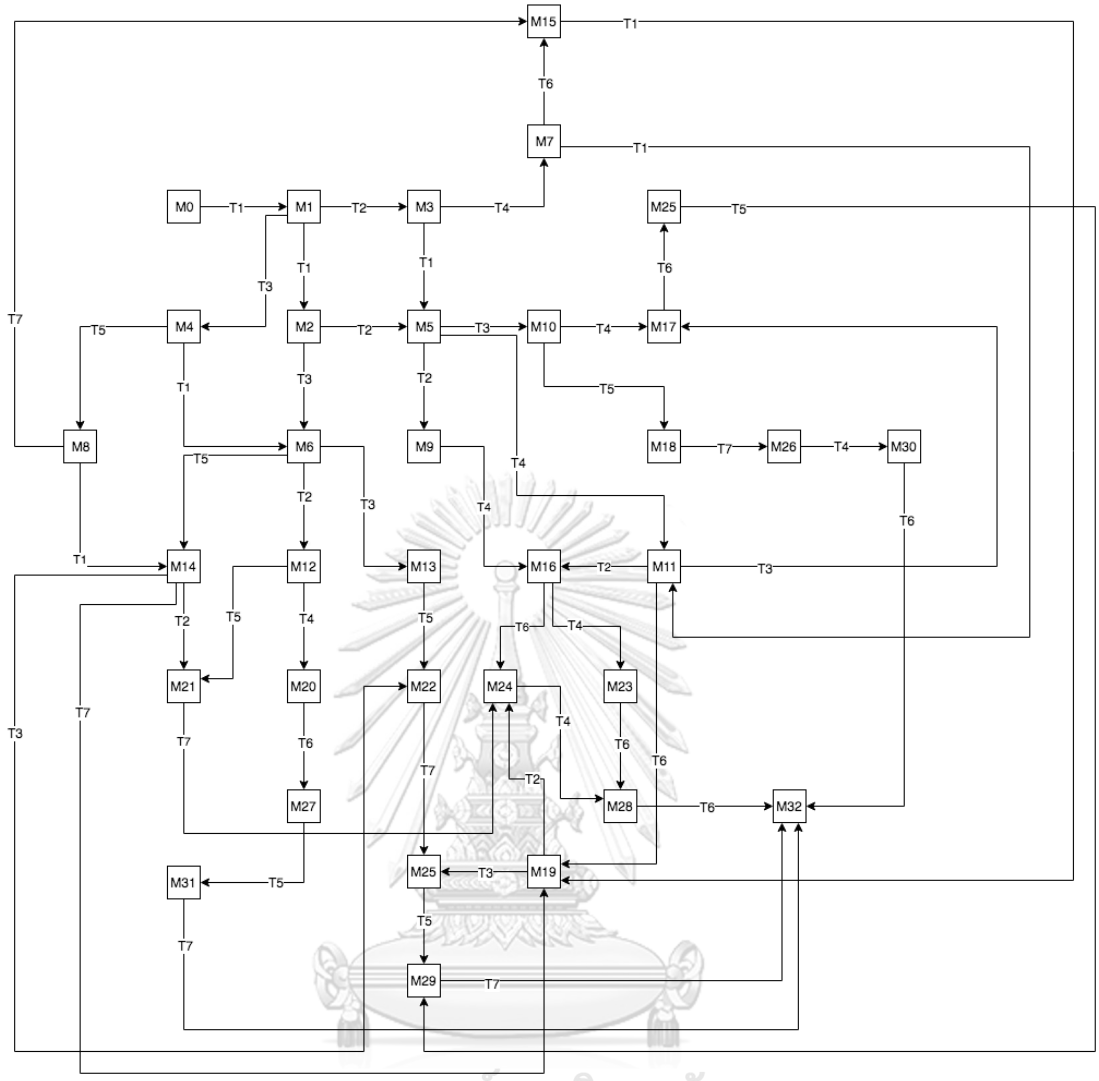
### 3.3.5 สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ

หลังจากสร้างริชอะบิลิตี้เซตเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้ง่ายแก่ความเข้าใจและเห็นความสัมพันธ์ของแต่ละมาร์กกิงว่าแต่ละมาร์กกิงเกิดจากการฟายริงทรานสิชันใดของมาร์กกิงตัวใด ดังนั้น เครื่องมือจะแสดงผลเป็นแผนภาพริชอะบิลิตี้กราฟตามขั้นตอนต่อไปนี้

1) วาด “รูปสี่เหลี่ยม” ขึ้นมาเท่ากับจำนวนมาร์กกิงที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 3.5 ในที่นี้คือ 33 รูป (มาร์กกิง $M_0$ – $M_{32}$)
2) ลากเส้นเพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างมาร์กกิง พร้อมทั้งระบุทรานสิชันที่ได้ฟายริงที่ทำให้เกิดเป็นมาร์กกิงชุดใหม่ลงไปในเส้นความสัมพันธ์ โดยหลักการในการลากเส้น เครื่องมือจะตรวจสอบจากตารางที่ 3.5 ซึ่ง คอลัมภ์ “มาร์กกิงปัจจุบัน” คือมาร์กกิงต้นทาง และ คอลัมภ์ “มาร์กกิงถัดไป” คือมาร์กกิงปลายทาง ส่วนคอลัมภ์ “ทรานสิชันที่ฟายริง” คือชื่อทรานสิชันที่จะระบุลงไปในเส้นความสัมพันธ์ระหว่างมาร์กกิงต้นทางและมาร์กกิงปลายทาง

จากขั้นตอนดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถสร้างเป็นริชอะบิลิตี้กราฟจากตารางริชอะบิลิตี้เซตของตารางที่ 3.5 ได้ดังรูปที่ 3.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*รูปที่ 3.6 ตัวอย่างริชอะบิลิตี้กราฟ*

### 3.3.6 สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณความน่าจะเป็นบนห่วงโซ่มาร์คอฟ

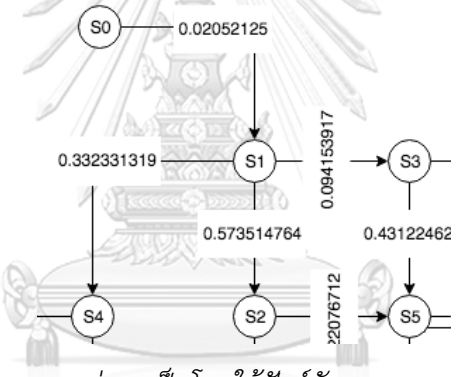
เมื่อได้ริชอะบิลิตี้กราฟแล้วจะทำการแปลงไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟพร้อมทั้งคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันตามที่ผู้ใช้งานได้เลือกเอาไว้ (ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น หรือฟังก์ชันการแจกแจงสะสม) ตามขั้นตอนดังนี้

1) ปรับ “รูปสี่เหลี่ยม” ของทุกมาร์กกิงในริชอะบิลิตี้กราฟเป็น “รูปวงกลม”
2) หากผู้ใช้งานเลือกวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะใช้สูตรในการคำนวณจากสมการที่ 2.1 ดังตัวอย่างที่ 1 แต่หากผู้ใช้งานเลือกวิธีการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสมจะใช้สูตรในการคำนวณจากสมการที่ 2.2 ในบทที่ 2 ดังตัวอย่างที่ 3 และหากเกิดเส้นความสัมพันธ์ที่ออกมาจาก “สถานะ” เดียวกันมากกว่า 1 เส้นความสัมพันธ์ นั่นคือมาร์กกิงนั้นมีทรานสิชันที่สามารถ

ฟายริงได้มากกว่า 1 ทรานสิชัน เรียกว่าเกิด “Conflict” เช่น ทรานสิชัน T1 และทรานสิชัน T2 มีโอกาสที่ทรานสิชัน T1 จะอีนาเบิลหรือมีโอกาสที่ทรานสิชัน T2 จะอีนาเบิล ได้เช่นกัน เมื่อเกิด “Conflict” ต้องใช้การคำนวนความน่าจะเป็นจากสมการที่ 2.3 และ สมการที่ 2.4 ดังตัวอย่างที่ 2 และ ตัวอย่างที่ 4

3) สำหรับค่าความน่าจะเป็นของห่วงโซ่มาร์คอฟที่มีเส้นความสัมพันธ์วนกลับเข้าหาสถานะของตัวเอง เครื่องมือจะไม่ได้วาดเนื่องจากจะทำให้เกิดหลายเส้นและพันกันมากเกินไป แต่จะละเอาไว้ว่าความน่าจะเป็นของความสัมพันธ์วนกลับเข้าหาสถานะของตัวเองมีค่าเท่ากับ 1 ลบด้วยผลรวมของความน่าจะเป็นของทุกเส้นที่ออกจากสถานะนั้น

**ตัวอย่างที่ 1** การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น *(กรณีไม่เกิดการขัดกัน)* ตามรูปที่ 3.7 จากสถานะ S0 ไปที่สถานะ S1 จะคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณจากสมการที่ 2.1




*รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (กรณีไม่เกิดการขัดกัน)*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กำหนดให้ $mean$ = 4 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

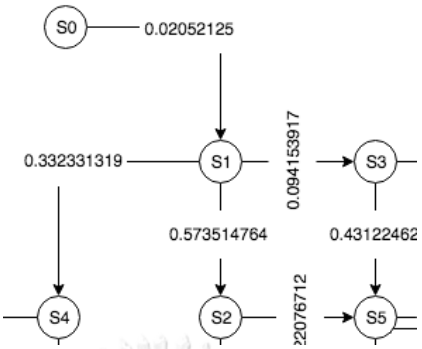
ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.1 จะได้ ดังนี้

$F(x) = \frac{1}{4}(2.71828)^{-\frac{1}{4}(10)}$

ดังนั้น $F(x) = 0.02052125$

**ตัวอย่างที่ 2** การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น *(กรณีเกิดการขัดกัน)* ตามรูปที่ 3.8 โดยเกิดการขัดกันที่สถานะ S1 โดยจุดที่เกิด ได้แก่ จากสถานะ S1 ไปที่

สถานะ S4, สถานะ S1 ไปที่สถานะ S2 และสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3 จะคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณจากสมการที่ 2.3 และ 2.4




*รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (กรณีเกิดการขัดกัน)*

ในขั้นตอนการคำนวณต้องคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S4

กำหนดให้ $mean$ = 3 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมการที่ 2.1 จะได้ ดังนี้

$$F(x) = \frac{1}{3}(2.71828)^{-\frac{1}{3}(10)}$$

ดังนั้น $F(x) = 0.011891331$

2) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S2

กำหนดให้ $mean$ = 4 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมการที่ 2.1 จะได้ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$F(x) = \frac{1}{4}(2.71828)^{-\frac{1}{4}(10)}$$

ดังนั้น $F(x) = 0.02052125$

3) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3

กำหนดให้ $mean$ = 2 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.1 จะได้ ดังนี้

$$F(x) = \frac{1}{2}(2.71828)^{-\frac{1}{2}(10)}$$

ดังนั้น $F(x) = 0.0033689734$

4) เนื่องจากเกิดการขัดกัน ดังนั้น การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะถูกคำนวณโดยใช้สัดส่วนตามสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้

4.1 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S4

$$p(S1 \rightarrow S4) = \frac{0.011891331}{0.011891331+0.02052125+0.0033689734}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S4) = 0.332331319$

4.2 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S2

$$p(S1 \rightarrow S2) = \frac{0.02052125}{0.011891331+0.02052125+0.0033689734}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S2) = 0.573514764$

4.3 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3

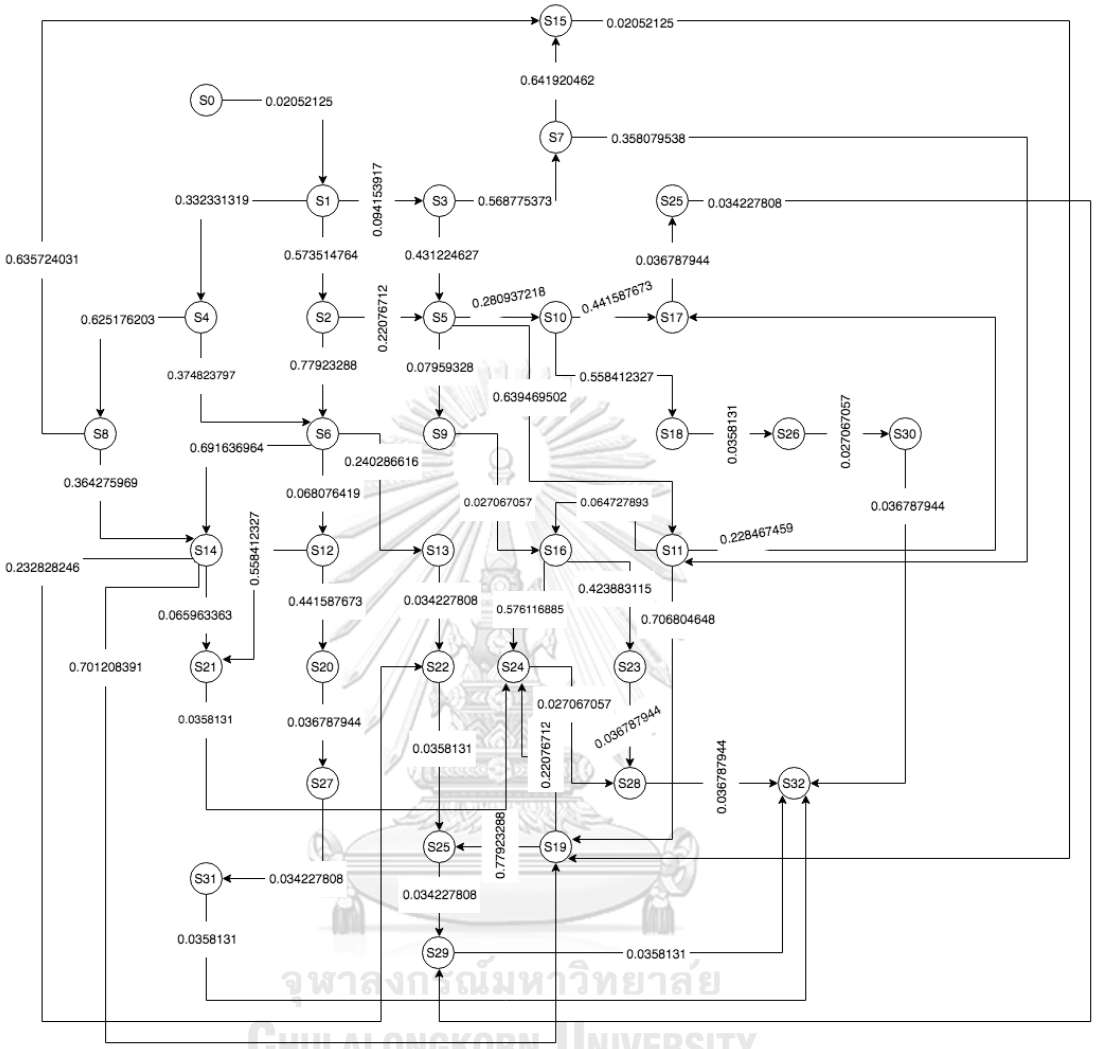
$$p(S1 \rightarrow S3) = \frac{0.0033689734}{0.011891331+0.02052125+0.0033689734}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S3) = 0.094153917$

จากตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ให้ทำการคำนวณเช่นนี้จนครบทุกสถานะในห่วงโซ่มาร์คอฟ และจะได้ผลลัพธ์ทั้งหมดดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในที่นี้สมมติให้เวลาที่ใช้ในการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

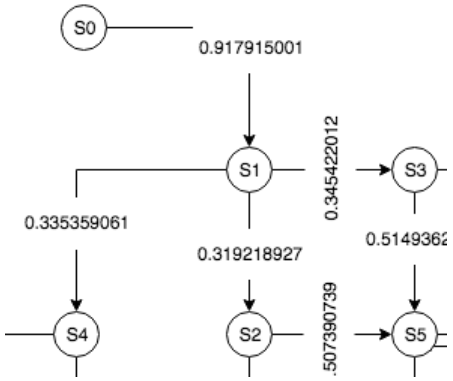
วิเคราะห์เป็น 10 นาทีและใช้วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นโดยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น




*รูปที่ 3.9 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟกับค่าความน่าจะเป็นบนเส้นความสัมพันธ์ในแต่ละโหนดโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น*

**ตัวอย่างที่ 3** การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม *(กรณีไม่เกิดการขัดกัน)* ตามรูปที่ 3.10 จากสถานะ S0 ไปที่สถานะ S1 จะคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณจากสมการที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (กรณีไม่เกิดการขัดกัน)*

กำหนดให้ $mean$ = 4 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

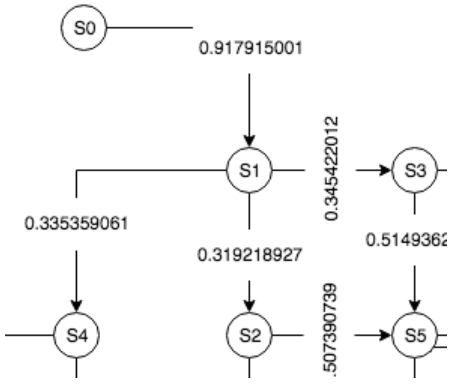
ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.2 จะได้ ดังนี้

$$F(x) = (1 - 2.71828)^{-\frac{1}{4}(10)}$$

ดังนั้น $F(x) = 0.917915001$

**ตัวอย่างที่ 4** การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม *(กรณีเกิดการขัดกัน)* ตามรูปที่ 3.11 โดยเกิดการขัดกันที่สถานะ S1 โดยจุดที่เกิด ได้แก่ จากสถานะ S1 ไปที่ สถานะ S4, สถานะ S1 ไปที่สถานะ S2 และสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3 จะคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณจากสมการที่ 2.3 และ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY




*รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (กรณีเกิดการขัดกัน)*

ในขั้นตอนการคำนวณต้องคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S4

กำหนดให้ $mean$ = 3 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.2 จะได้ ดังนี้

$F(x) = (1 - 2.71828)^{-\frac{1}{3}(10)}$

ดังนั้น $F(x) = 0.964326007$

2) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S2

กำหนดให้ $mean$ = 4 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

$x$ = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.2 จะได้ ดังนี้

$F(x) = (1 - 2.71828)^{-\frac{1}{4}(10)}$

ดังนั้น $F(x) = 0.917915001$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) หาความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3

กำหนดให้ $mean$ = 2 นาที (สามารถกำหนดค่าเฉลี่ยของการให้บริการในเอกซ์เอ็มแอลไฟล์)

e = 2.71828 โดยประมาณ

x = 10 นาที

ซึ่ง $\lambda = \frac{1}{mean}$ แทนค่าจากสมาการที่ 2.2 จะได้ ดังนี้

$F(x) = (1 - 2.71828)^{-\frac{1}{2}(10)}$

ดังนั้น $F(x) = 0.993262053$

4) เนื่องจากเกิดการขัดกัน ดังนั้น การคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมจะถูกคำนวณโดยใช้สัดส่วนตามสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้

4.1 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S4

$$p(S1 \rightarrow S4) = \frac{0.964326007}{0.964326007 + 0.917915001 + 0.993262053}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S4) = 0.335359061$

4.2 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S2

$$p(S1 \rightarrow S2) = \frac{0.917915001}{0.964326007 + 0.917915001 + 0.993262053}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S2) = 0.319218927$

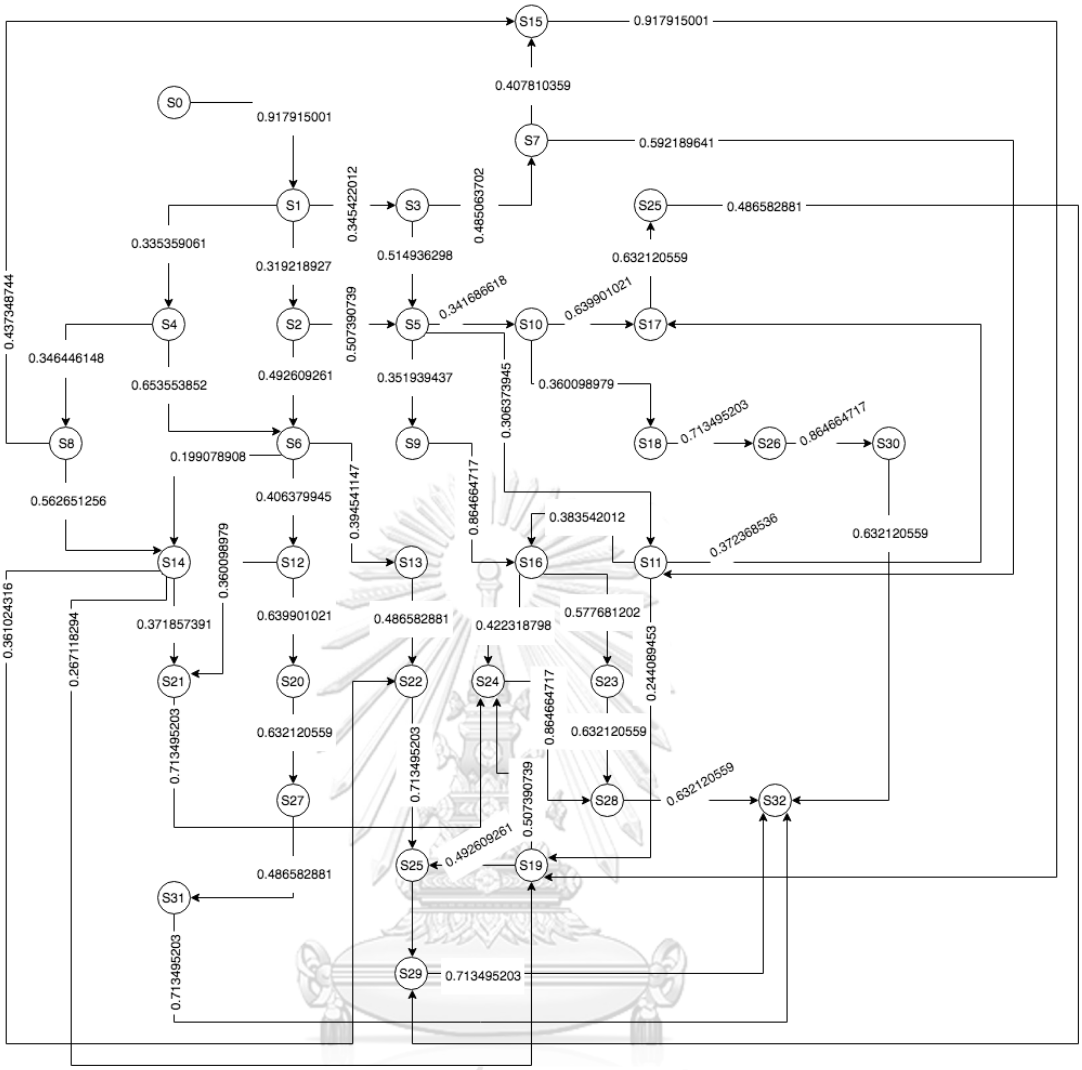
4.3 ) คำนวณความน่าจะเป็นจากสถานะ S1 ไปที่สถานะ S3

$$p(S1 \rightarrow S3) = \frac{0.993262053}{0.964326007 + 0.917915001 + 0.993262053}$$

ดังนั้น $p(S1 \rightarrow S3) = 0.345422012$

จากตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 4 ตัวอย่างดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ให้ทำการคำนวณเช่นนี้จนครบทุกสถานะในห่วงโซ่มาร์คอฟ และจะได้ผลลัพธ์ทั้งหมดดังรูปที่ 3.12 ซึ่งในที่นี้สมมติให้เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็น 10 นาทีและใช้วิธีการคำนวณความน่าจะเป็นโดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




*รูปที่ 3.12 ตัวอย่างห่วงโซ่มาร์คอฟกับค่าความน่าจะเป็นบนเส้นความสัมพันธ์ในแต่ละโหนดโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 3.3.7 วิเคราะห์ผลลัพธ์

ในการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็น จากข้อ 3.3.2 ที่ผู้ใช้งานได้กำหนดแท็กโทเค็น (เป็นที่มาให้ได้เพลสเริ่มต้น) และเพลสสิ้นสุดเพื่อตรวจสอบว่าแท็กโทเค็นที่ได้ระบุเอาไว้มีโอกาสที่โทเค็นจากเพลสเริ่มต้นไปจนถึงโทเค็นที่เพลสสิ้นสุด ณ นาทีที่ 10 หากทำการวิเคราะห์โดยผู้ใช้งานเลือกใช้ฟังก์ชันในการคำนวณที่ต่างกันก็จะได้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน โดยต้องหาเส้นทาง (path) ทั้งหมดที่เป็นไปได้จากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุด ซึ่งจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 เพลสเริ่มต้นสามารถแทนได้ด้วยมาร์กกิง $M_0$ ได้เลย

ส่วนที่ 2 เพลสสิ้นสุดสามารถเป็นได้หลายมาร์กกิงที่แท็กโทเค็นอยู่ที่เพลสสิ้นสุด ในกรณีนี้เราจะเลือกเอามาร์กกิงที่เกิดขึ้นก่อนมาใช้ในการวิเคราะห์

จากตารางที่ 3.5 ที่แสดงริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ต สมมติว่ากำหนดเพลสเริ่มต้นจาก P1 – P8 นั่นหมายความว่าต้องหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดจากจุด $M_0$ (แทน P1) ถึง $M_{26}$ (แทน P8) และลำดับของการแท็กโทเค็นเป็น 2 จะได้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นได้ตามตารางที่ 3.6 และ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมได้ตามตารางที่ 3.7 ซึ่งสามารถตรวจสอบริชอะบิลิตี้เซตได้จากตารางที่ 3.5

*ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแต่ละเส้นทาง*

| เส้นทางที่ | เส้นทาง | ค่าความน่าจะเป็น |
|---|---|---|
| 1 | S0⟶S1⟶S3⟶S5⟶S10⟶S18⟶S26 | 0.0000046811 |
| 2 | S0⟶S1⟶S2⟶S5⟶S10⟶S18⟶S26 | 0.0000145978 |

หลังจากได้เส้นทางทุกเส้นทางแล้วเราต้องคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นทีละเส้นทาง เช่น เส้นทางที่ 1 จะนำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละมาร์กกิงมาคูนกัน M0 x M1 x M3 x M5 x M10 x M18 x M26 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ตามคอลัมภ์ “ค่าความน่าจะเป็น” ในตารางที่ 3.6

หลังจากนั้นนำค่าความน่าจะเป็นของทุกเส้นทางมารวมกัน (2 เส้นทาง) = 0.0000192789 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจาก “ความน่าจะเป็นที่โทเค็นในลำดับที่ 2 ณ นาทีที่ 10 เดินทางจากเพลส P1 ถึง เพลส P8 มีค่าเท่ากับ 0.0000192789”

*ตารางที่ 3.7 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของแต่ละเส้นทาง*

| เส้นทางที่ | เส้นทาง | ค่าความน่าจะเป็น |
|---|---|---|
| 1 | S0⟶S1⟶S3⟶S5⟶S10⟶S18⟶S26 | 0.01433332344 |
| 2 | S0⟶S1⟶S2⟶S5⟶S10⟶S18⟶S26 | 0.013051924554665 |

หลังจากได้เส้นทางทุกเส้นทางแล้วเราต้องคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทีละเส้นทาง เช่น เส้นทางที่ 1 จะนำค่าความน่าจะเป็นของแต่ละมาร์กกิงมาคูนกัน M0 x M1 x M3 x M5 x M10 x M18 x M26 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ตามคอลัมภ์ “ค่าความน่าจะเป็น” ในตารางที่ 3.7

หลังจากนั้นนำค่าความน่าจะเป็นของทุกเส้นทางมารวมกัน (2 เส้นทาง) = 0.027385247994665 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจาก “ความน่าจะเป็นที่โทเค็นในลำดับที่ 2 ภายใน 10 นาทีเดินทางจากเพลส P1 ถึง เพลส P8 มีค่าเท่ากับ 0.027385247994665”



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 4การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

สำหรับบทนี้จะนำวิธีการที่ได้อธิบายไว้ในบทก่อนหน้ามาพัฒนาเป็นเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบการโปรแกรมเชิงวัตถุด้วยภาษายูเอ็มแอลเพื่ออธิบายฟังก์ชันการทำงานของเครื่องมือประกอบไปด้วย แผนภาพยูสเคส (Use Case Diagram), แผนภาพกิจกรรม (Activity Diagram) แผนภาพแพ็คเกจ (Package) และแผนภาพคลาส (Class Diagram) รวมถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือและโครงสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานของเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 4.1 การออกแบบเครื่องมือสนับสนุน

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการออกแบบเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ โดยเริ่มจากการใช้ แผนภาพยูสเคสอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันงานของเครื่องมือและปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ จากนั้นอธิบายขั้นตอนของกิจกรรมในแต่ละยูสเคสด้วยแผนภาพกิจกรรม อธิบายโครงสร้างข้อมูลของเครื่องมือด้วยแผนภาพคลาส ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 4.1.1 แผนภาพยูสเคส

แผนภาพยูสเคสของเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยผู้ใช้งานจะทำการนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลและทำการอัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต หลังจากนั้นผู้ใช้งานต้องทำการป้อนพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น เมื่อทำการใส่พารามิเตอร์เรียบร้อยแล้วก็ทำการสร้างริชอะบิลิตี้เซต และนำไปสร้างริชอะบิลิตี้กราฟต่อไป หลังจากนั้นจะดำเนินการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟพร้อมทั้งคำนวนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น และสุดท้ายผู้ใช้งานต้องทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่เครื่องมือได้ทำการวิเคราะห์

*รูปที่ 4.1* แผนภาพยูสเคสของเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

จากรูปที่ 4.1 รายละเอียดเกี่ยวกับยูสเคสของการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ สามารถอธิบายได้ดังในตารางที่ 4.1 – ตารางที่ 4.6

*ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของยูสเคสของการนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-01 |
| **ชื่อยูสเคส** | นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลเพื่อนำเข้าระบบ |
| **ยูสเคสที่สัมพันธ์** | Include: อัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | |

*ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของยูสเคสของการนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล (ต่อ)*

| | |
|---|---|
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างสำหรับเลือกไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล<br>2. ผู้ใช้งานกดปุ่ม Browse<br>3. ผู้ใช้งานเลือกไฟล์ที่ต้องการนำเข้า<br>4. ผู้ใช้งานกดปุ่ม Upload |
| **ทางเลือก** | 1. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง<br>2. ผู้ใช้งานต้องการย่อหน้าต่างการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “--” เพื่อย่อหน้าต่างการใช้งานเครื่องมือการแปลง<br>3. ผู้ใช้งานต้องการขยายหน้าต่างการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “+” เพื่อขยายหน้าต่างการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | เครื่องมืออัพโหลดไฟล์ไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลเข้าสู่ระบบ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของยูสเคสของการอัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต*

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-02 |
| **ชื่อยูสเคส** | อัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | อัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ตเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล, ความถูกต้องและครบถ้วนของส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ตและความถูกต้องของแอทรริบิวต์ของส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ต |
| **ยูสเคสฐ์สัมพันธ์** | - |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | ผู้ใช้งานต้องนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล |

*ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของยูสเคสของการอัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ต (ต่อ)*

| | |
|---|---|
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างสำหรับเลือกไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล<br>2. เครื่องมืออ่านไฟล์ไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบแฟ้มเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล<br>3. เครื่องมือตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบเอ็กซ์เอ็มแอล<br>4. เครื่องมือตรวจสอบส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต ผู้ใช้งานกดปุ่ม Upload |
| **ทางเลือก** | 1. ระบบพบข้อผิดพลาดของรูปแบบเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล<br>ระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งานเกี่ยวกับข้อผิดพลาดของเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล<br>2. ระบบพบข้อผิดพลาดของส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ต<br>ระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งานเกี่ยวกับข้อผิดพลาดของส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ต<br>3. ระบบพบข้อผิดพลาดของการระบุแอททริบิวต์ในส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ต<br>ระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งานเกี่ยวกับข้อผิดพลาดของแอททริบิวต์ในส่วนประกอบสโตแคสติกเพทริเน็ต<br>4. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | เครื่องมือตรวจสอบความถูกต้องของเอกสารในรูปแบบเอ็กซ์เอ็มแอลและส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ต |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของยูสเคสของการป้อนพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับคำนวณความน่าจะเป็น*

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-03 |
| **ชื่อยูสเคส** | ป้อนพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับคำนวณความน่าจะเป็น |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | ป้อนพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับคำนวณความน่าจะเป็น |
| **ยูสเคสฐ์สัมพันธ์** | - |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | สโตแคสติกเพทริเน็ตที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว |
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างสำหรับป้อนพารามิเตอร์<br>2. ผู้ใช้งานเลือกโทเค็นที่ต้องการแท็ก<br>3. ผู้ใช้งานระบุตำแหน่งที่ต้องการแท็ก<br>4. ผู้ใช้งานระบุเพลสเริ่มต้นที่ต้องการวิเคราะห์<br>5. ผู้ใช้งานระบุเพลสสิ้นสุดต้องการวิเคราะห์<br>6. ผู้ใช้งานระบุเวลาที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์<br>7. ผู้ใช้งานกดปุ่ม Generate Reachability Set |
| **ทางเลือก** | 1. ระบบพบข้อผิดพลาดของการระบุตำแหน่งที่ต้องการแท็ก<br>ระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งานเกี่ยวกับข้อผิดพลาดของการระบุตำแหน่งที่ต้องการแท็ก<br>2. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | เก็บค่าเริ่มต้นที่ต้องใช้ในการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ห่วงโซ่มาร์คอฟ และคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างริชอะบิลิตี้เซต*

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-04 |
| **ชื่อยูสเคส** | สร้างริชอะบิลิตี้เซต |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | สร้างริชอะบิลิตี้เซตเพื่อเตรียมค่าเริ่มต้นใช้ในการสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ |
| **ยูสเคสฐ์สัมพันธ์** | - |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | ริชอะบิลิตี้เซต |
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างพร้อมกับแสดงผลริชอะบิลิตี้เซต<br>2. ผู้ใช้งานตรวจสอบริชอะบิลิตี้เซต<br>3. ผู้ใช้งานกดปุ่ม Generate Reachability Graph |
| **ทางเลือก** | 1. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | เก็บค่าเริ่มต้นที่ต้องใช้ในการสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ |

*ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ*

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-05 |
| **ชื่อยูสเคส** | สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | สร้างริชอะบิลิตี้กราฟเพื่อเตรียมค่าเริ่มต้นใช้ในการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ |
| **ยูสเคสฐ์สัมพันธ์** | - |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | ริชอะบิลิตี้เซต |
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างพร้อมกับแสดงผลริชอะบิลิตี้กราฟ<br>2. ผู้ใช้งานตรวจสอบริชอะบิลิตี้กราฟ<br>3. ผู้ใช้งานกดปุ่ม Generate Markov Chain |
| **ทางเลือก** | 1. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | เก็บค่าเริ่มต้นที่ต้องใช้ในการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ |

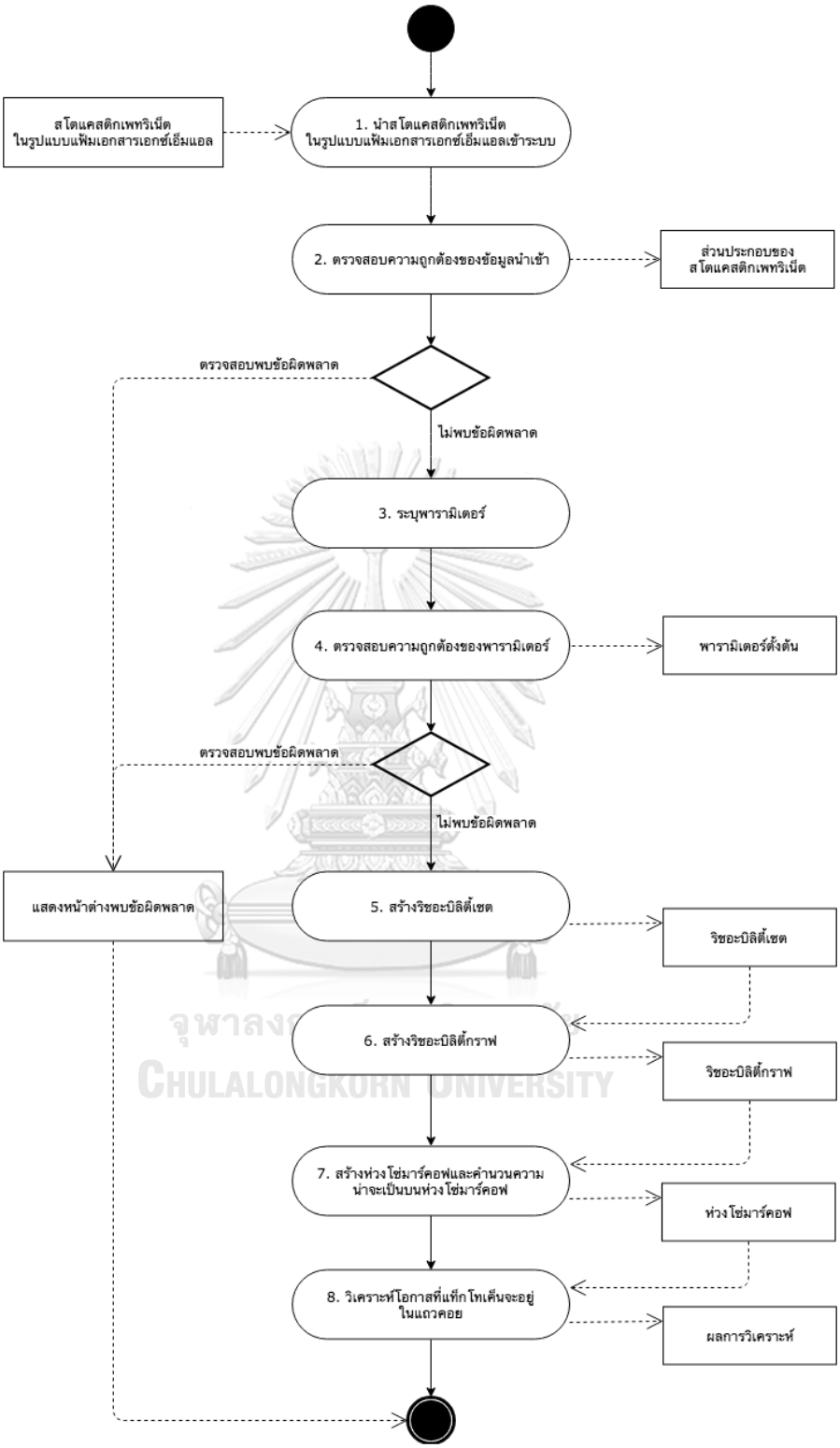
*ตารางที่ 4.6 รายละเอียดของยูสเคสของการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณความน่าจะเป็น*

| | |
|---|---|
| **หมายเลขยูสเคส** | UC-06 |
| **ชื่อยูสเคส** | สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณความน่าจะเป็น |
| **แอคเตอร์** | ผู้ใช้งาน |
| **รายละเอียดยูสเคส** | สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสมเพื่อทำการวิเคราะห์โอกาสที่โทเค็นจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุดในเวลาที่ได้ระบุไว้มีค่าเท่ากับเท่าใด |
| **ยูสเคสที่สัมพันธ์** | - |
| **เงื่อนไขก่อนหน้า** | ริชอะบิลิตี้กราฟ |
| **ขั้นตอน** | 1. เครื่องมือแสดงหน้าต่างเพื่อทำการสอบถามฟังก์ชันการคำนวณความน่าจะเป็นว่าจะคำนวนโดยใช้ฟังก์ชันความหนานแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงสะสม<br>2. แสดงผลห่วงโซ่มาร์คอฟพร้อมทั้งแสดงค่าของความน่าจะเป็นที่เกิดจากการคำนวณฟังก์ชันที่ได้เลือกเอาไว้ในข้อที่ 1<br>3. ผู้ใช้งานตรวจสอบห่วงโซ่มาร์คอฟ<br>4. ผู้ใช้งานตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นบนห่วงโซ่มาร์คอฟ<br>5. ผู้ใช้งานตรวจสอบผลการวิเคราะห์โอกาสที่โทเค็นจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุดในเวลาที่ได้ระบุไว้ |
| **ทางเลือก** | 1. ผู้ใช้งานต้องการยกเลิกการใช้งานของเครื่องมือการแปลง<br>ผู้ใช้เลือกปุ่ม “X” เพื่อยกเลิกการใช้งานเครื่องมือการแปลง |
| **เงื่อนไขภายหลัง** | ผลการวิเคราะห์โอกาสที่โทเค็นจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุดในเวลาที่ได้ระบุไว้ |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 4.1.2 แผนภาพกิจกรรม

แผนภาพกิจกรรมเป็นแผนภาพที่ใช้แสดงขั้นตอนของกระบวนการทำงานของเครื่องมือเพื่ออธิบายกิจกรรมที่เกิดขึ้นในลักษณะกระแสการไหลของการทำงาน โดยแสดงให้เห็น ถึงว่าในเครื่องมือมีกิจกรรมอะไรที่ต้องทำบ้าง ซึ่งเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพกิจกรรมดังรูปที่ 4.2



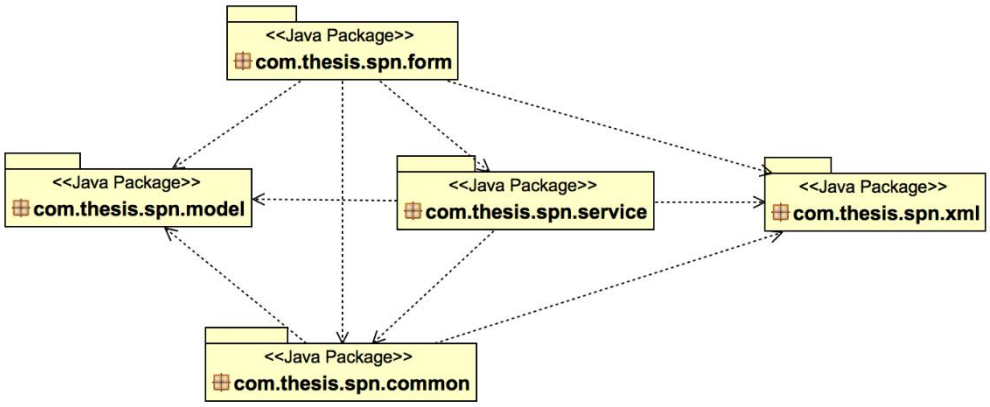

*รูปที่ 4.2 แผนภาพกิจกรรมการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ*

สำหรับการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟดังรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1) ผู้ใช้งานได้นำเข้าไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอล
2) เครื่องมือการแปลงได้ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า หากพบข้อผิดพลาดก็จะทำการแจ้งเตือนแก่ผู้ใช้งาน
3) ผู้ใช้งานต้องระบุพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าตั้งต้นในการทำงานของเครื่องมือ
4) เครื่องมือจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของพารามิเตอร์ หากพบข้อผิดพลาดก็จะทำการแจ้งเตือนแก่ผู้ใช้งาน
5) เครื่องมือจะทำการสร้างริชอะบิลิตี้เซต
6) เครื่องมือจะทำการสร้างริชอะบิลิตี้กราฟ
7) เครื่องมือที่แปลงจะทำการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวนความน่าจะเป็นบนห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสม
8) วิเคราะห์โอกาสที่แท็กโทเค็นจะอยู่ในแถวคอยตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ในพารามิเตอร์มีค่าเป็นเท่าใด

### 4.1.3 แผนภาพแพ็คเกจ

แผนภาพแพ็คเกจเพื่อรวมคลาสที่สัมพันธ์กันเอาไว้ด้วยกัน เพื่อสะดวกต่อการเรียกใช้งานจากโปรแกรมอื่น ๆ และเพื่อให้เห็นภาพรวมโครงสร้างทั้งหมดของโครงสร้างการพัฒนาเครื่องมือ จึงได้นำเสนอแผนภาพแพ็คเกจซึ่งแบ่งออกเป็น 5 แพ็คเกจ ได้แก่ Common, XML, Form, Service และ Model ดังรูปที่ 4.3 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้




*รูปที่ 4.3 แผนภาพแพ็คเกจเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ*

แผนภาพแพ็คเกจที่แสดงโครงสร้างข้อมูลภายในของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 4.3 มีรายละเอียดของแพ็คเกจในแต่ละส่วน ดังนี้

1) แพ็คเกจ Common เป็นแพ็คเกจที่ประกอบด้วยคลาสที่ทำหน้าที่ตรวจสอบค่าพื้นฐานต่างๆ ของออปเจกต์ เช่น สตริงมีค่าเป็นว่างหรือไม่, ตัวเลขมีค่าเป็นว่างหรือไม่, ตรวจสอบค่า

พื้นฐานของสโตแคสติกเพทริเน็ต เช่น การหาอาร์กของเพลสปลายทาง เป็นต้น โดยแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วยคลาส BeanUtils และ SPNUtils

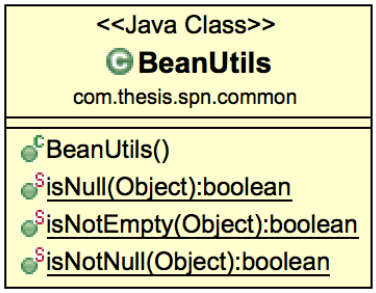
2) แพ็คเกจ XML เป็นแพ็คเกจที่ประกอบด้วยคลาสที่ทำหน้าที่เก็บออปเจกต์ของสโตแคสติกซึ่งถูกแปลงจากรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลมาเป็นออปเจกต์ ได้แก่ SPN, เพลส, ทรานสิชันและ อาร์ก โดยแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วยคลาส SPN, Place, Transition และ Arc
3) แพ็คเกจ Form เป็นแพ็คเกจที่ประกอบด้วยคลาสที่ทำหน้าที่แสดงผลส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานทั้งหมด เช่น หน้าต่างของ Import SPN XML, Input Parameter, Reachability Set, Reachability Graph และ Markov Chain โดยแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วยคลาส SPNFileUploadForm, InputParameterForm, ReachabilitySetForm, ReachabilityGraphForm และ MarkovChainForm
4) แพ็คเกจ Service เป็นแพ็คเกจที่ประกอบด้วยคลาสที่ทำหน้าที่เป็นส่วนของการจัดการและการตรวจสอบเอกซ์เอ็มแอล, ริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟ ตลอดถึงการคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น โดยแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วยคลาส ImportXML, Reachability, MarkovChain และ AllPathsFromASource
5) แพ็คเกจ Model เป็นแพ็คเกจที่ประกอบด้วยคลาสที่ทำหน้าที่เก็บเงื่อนไขของการฟายริงของทรานสิชัน, เงื่อนไขของการยับยั้งทรานสิชัน, ค่าที่ผู้ใช้งานได้ใส่ข้อมูลมาจากส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานในรูปแบบของออปเจกต์ โดยแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วยคลาส ReachabilitySetRole, StateMarking และ InputParameter

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 4.1.4 แผนภาพคลาส

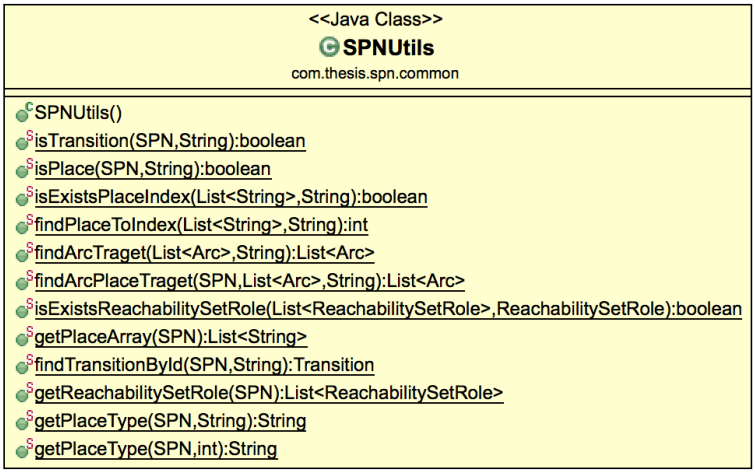
จากแผนภาพแพ็คเกจที่แสดงโครงสร้างข้อมูลภายในของเครื่องมือตามรูป 4.3 มีรายละเอียดของแผนภาพคลาสที่อยู่ในแต่ละแพ็คเกจ ดังนี้

1) คลาส BeanUtils ใน แพ็คเกจ Common ทำหน้าที่ตรวจสอบออปเจกต์ว่ามีค่าว่าง, ค่า null หรือไม่ เป็นต้น ดังรูปที่ 4.4



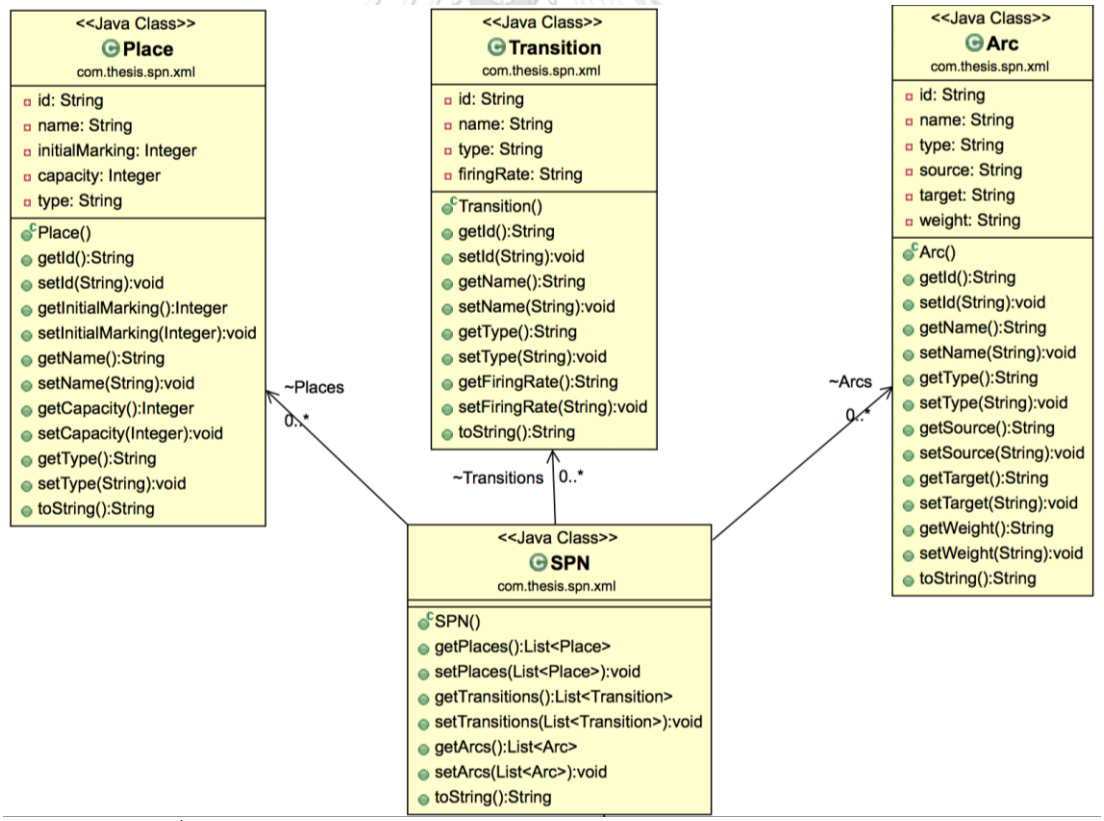

*รูปที่ 4.4 รายละเอียดของคลาส BeanUtils*

2) คลาส SPNUtils ใน แพ็คเกจ Common ทำหน้าที่ตรวจสอบออปเจกต์ของสโตแคสติกเพทริเน็ต เช่น ออปเจกต์ที่ส่งเข้ามาเป็นเพลสหรือเป้นทรานสิชัน เป็นต้น ดังรูปที่ 4.5



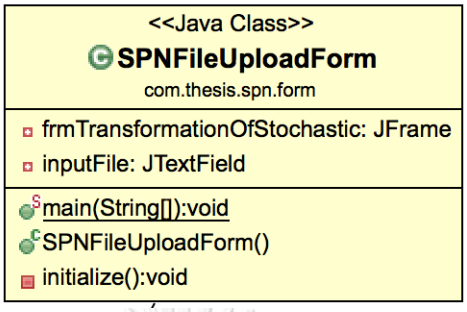

*รูปที่ 4.5 รายละเอียดของคลาส SPNUtils*

3) คลาส SPN, Place, Transition, Arc ในแพ็คเกจ XML ทำหน้าที่สกัดส่วนประกอบของสโตแคสติกเพทริเน็ตและแปลงไปเป็นออปเจกต์ของแต่ละส่วน ดังรูปที่ 4.6



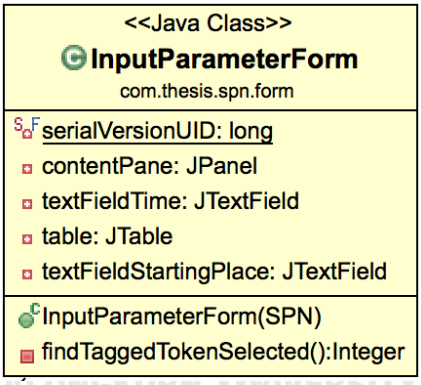

*รูปที่ 4.6 รายละเอียดของแผนภาพคลาส SPN, Place, Transition และ Arc*

4) คลาส SPNFileUploadForm ในแพ็คเกจ Form ทำหน้าที่แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งาน เพื่อให้ผู้ใช้งานได้เลือกไฟล์และอัพโหลดสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอล ดังรูปที่ 4.7



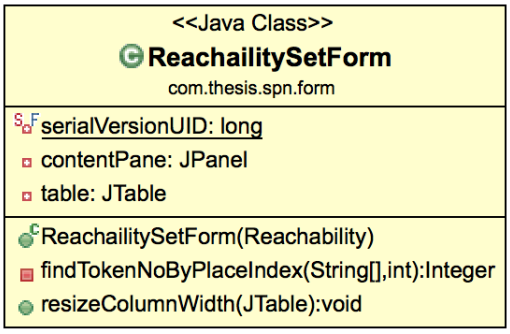

*รูปที่ 4.7 รายละเอียดของคลาส SPNFileUploadForm*

5) คลาส InputParameterForm ในแพ็คเกจ Form ทำหน้าที่แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานเพื่อให้ผู้ใช้งานได้ระบุพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการทำงานของเครื่องมือ เช่น แท็กโทเค็น, ลำดับของแท็กโทเค็น, เพลสเริ่มต้น, เพลสสิ้นสุด และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ เป็นต้น ดังรูปที่ 4.8



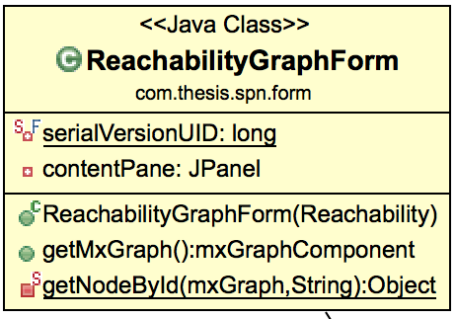

*รูปที่ 4.8 รายละเอียดของคลาส InputParameterForm*

6) คลาส ReachabilitySetForm ในแพ็คเกจ Form ทำหน้าที่แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานเพื่อให้ผู้ใช้งานเพื่อแสดงผลของริชอะบิลิตี้เซต ดังรูปที่ 4.9



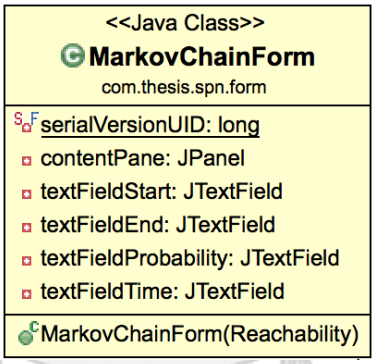

*รูปที่ 4.9 รายละเอียดของคลาส ReachabilitySetForm*

7) คลาส ReachabilityGraphForm ในแพ็คเกจ Form ทำหน้าที่แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานเพื่อให้ผู้ใช้งานเพื่อแสดงผลของริชอะบิลิตี้กราฟ ดังรูปที่ 4.10



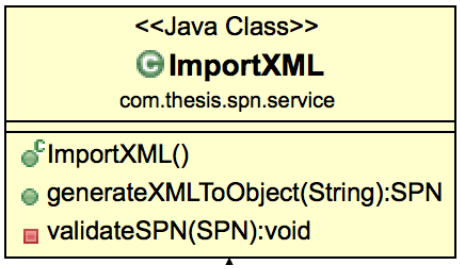

*รูปที่ 4.10 รายละเอียดของคลาส ReachabilityGraphForm*

8) คลาส MarkovChainForm ในแพ็คเกจ Form ทำหน้าที่แสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานเพื่อให้ผู้ใช้งานเพื่อแสดงผลของห่วงโซ่มาร์คอฟพร้อมกับแสดงผลการวิเคราะห์ของเครื่องมือ ดังรูปที่ 4.11



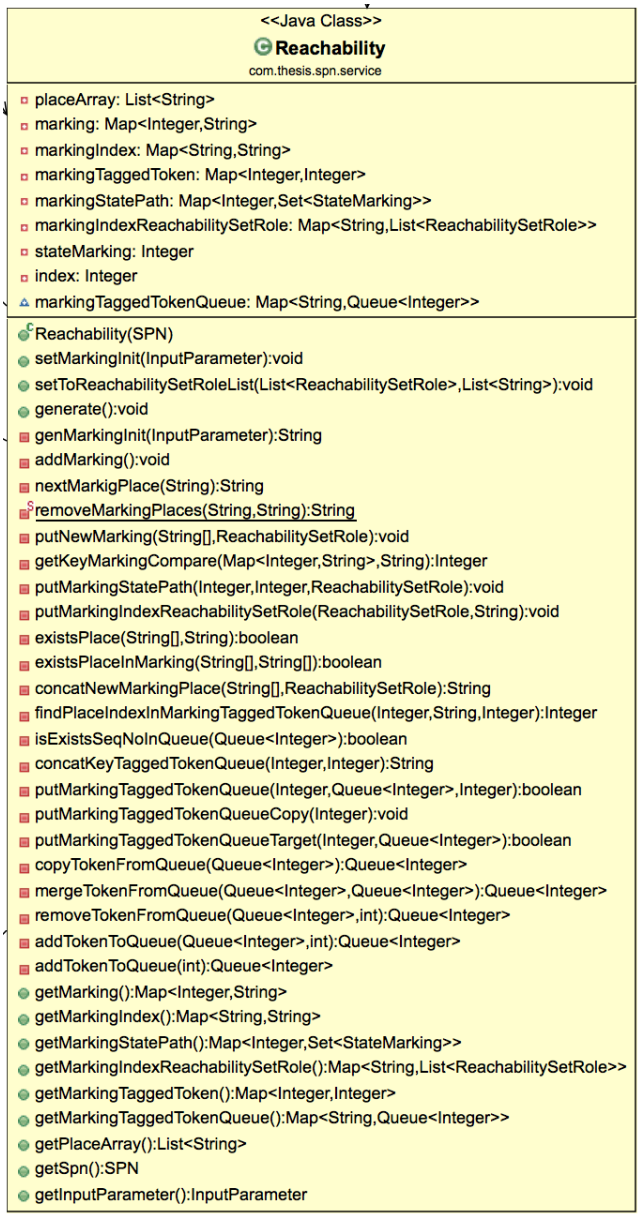

*รูปที่ 4.11 รายละเอียดของคลาส MarkovChainForm*

9) คลาส ImportXML ในแพ็คเกจ Service ทำหน้าที่ตรวจสอบเอกซ์เอ็มแอลที่ถูกอัพโหลดเข้ามา ถ้าหากถูกต้องและครบถ้วนหมดแล้ว จะดำเนินการส่งเอกซ์เอ็มแอลที่ได้ไปแมพลงเป็นออปเจกต์ ดังรูปที่ 4.12



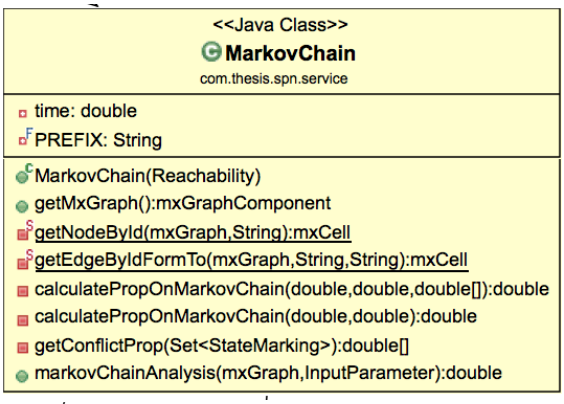

*รูปที่ 4.12 รายละเอียดของคลาส ImportXML*

10) คลาส Reachability ในแพ็คเกจ Service ทำหน้าที่ทั้งหาเซตของริชอะบิลิตี้, มาร์กโทเค็นที่ถูกแท็ก, สร้างริชอะบิลิ้กราฟ เป็นต้น ดังรูปที่ 4.13



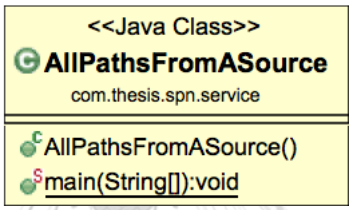

*รูปที่ 4.13 รายละเอียดของคลาส Reachability*

11) คลาส MarkovChain ในแพ็คเกจ Service ทำหน้าที่ในการสร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ, คำนวณความน่าจะเป็นบนห่วงโซ่มาร์คอฟ, หาเส้นทางทั้งหมดที่เป็นไปได้จากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุด และทำการสรุปผลการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น ดังรูปที่ 4.14



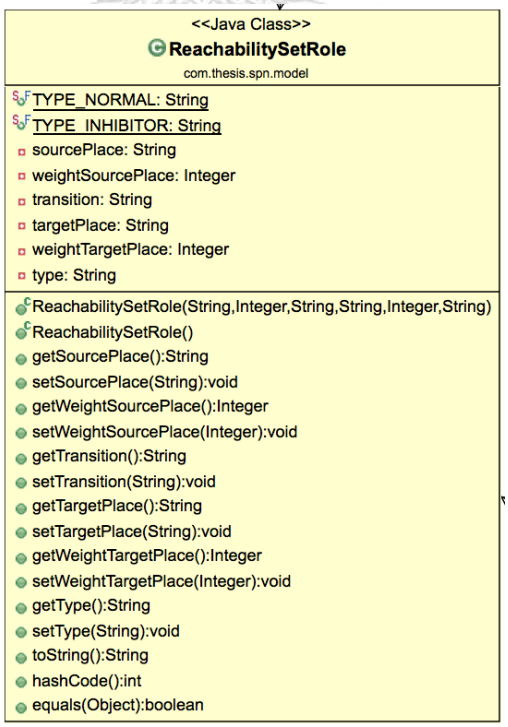

*รูปที่ 4.14 รายละเอียดของคลาส MarkovChain*

12) คลาส AllPathsFromASource ในแพ็คเกจ Service ทำหน้าที่ในการหาเส้นทางทั้งหมดในห่วงโซ่มาร์คอฟที่เป็นไปได้จากจุดเริ่มต้นจนถึงสุดสิ้นสุด ดังรูปที่ 4.15



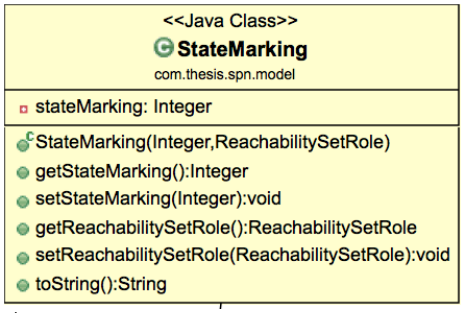

*รูปที่ 4.15 รายละเอียดของคลาส AllPathsFromASource*

13) คลาส ReachabilitySetRole ในแพ็คเกจ Model ทำหน้าที่ในการกำหนดเงื่อนไขในการฟายริงของทรานสิชันและเงื่อนไขของการยับยั้งทรานสิชัน ดังรูปที่ 4.16



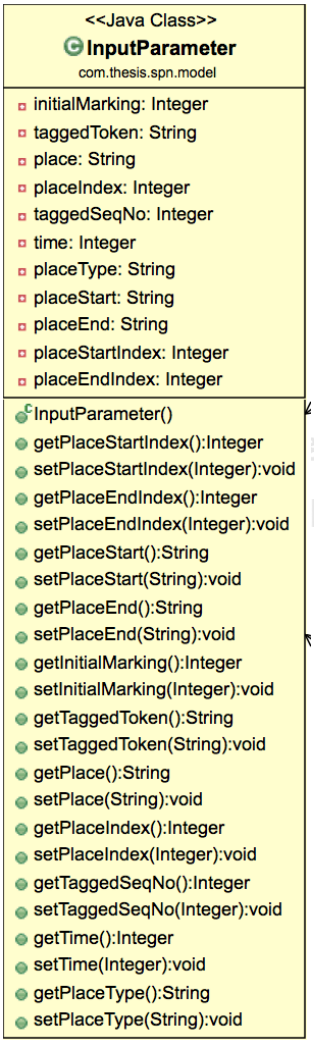

*รูปที่ 4.16 รายละเอียดของคลาส ReachabilitySetRole*

14) คลาส StateMarking ในแพ็คเกจ Model ทำหน้าที่ในการเก็บออปเจกต์ของทรานสิชันที่ฟายริงและมาร์กกิงถัดไปที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.17




*รูปที่ 4.17 รายละเอียดของคลาส StateMarking*

15) คลาส InputParameter ในแพ็คเกจ Model ทำหน้าที่ในการแมพพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้งานได้ใส่เข้ามาในหน้าต่าง “InputParameter” ลงไปในออปเจกต์เพื่อให้ใช้งานได้ง่าย ดังรูปที่ 4.18




*รูปที่ 4.18 รายละเอียดของคลาส Input Parameter*

## 4.2 การพัฒนาเครื่องมือสนับสนุน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟประกอบด้วย สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ และการพัฒนาส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของแต่ละหน้าจอการทำงาน ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

### 4.2.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ฮาร์ดแวร์
   - เครื่องคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ก หน่วยประมวลผลอินเทลคอร์ไฟต์ 2.30 กิกะเฮิร์ทซ์ (2.3 GHz Intel Core i5)
   - หน่วยความจำสำรอง (RAM) 8.0 กิกะไบต์ (8.0 GB)
   - ฮาร์ดดิสก์ (Harddisk) 250 กิกะไบต์ (250 GB)
2) ซอฟต์แวร์
   - ระบบปฏิบัติการ (Mac OS) High Sierra เวอร์ชั่น 10.13.4 (17E202)
   - เครื่องมือที่ใช้พัฒนาประกอบด้วย
     - Eclipse Java EE IDE for Web Developers Version: Oxygen.2 R (4.7.2)
     - Sublime Text
   - ภาษาที่ใช้พัฒนา
     - จาวา (Java)
     - เอกซ์เอ็มแอล (XML)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

### 4.2.2 โครงสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของเครื่องมือสนับสนุน

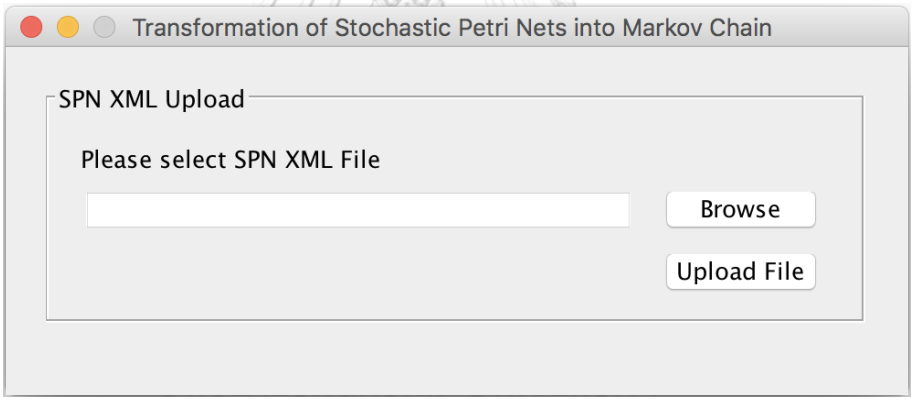
โครงสร้างส่วนต่อประสานของเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ เป็นส่วนที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้และการทำงานร่วมกัน โดยแต่ละหน้าต่างจะใช้อธิบายรายละเอียดของการทำงานของส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานของเครื่องมือ สนับสนุน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) หน้าต่าง “SPN XML Upload” เป็นหน้าต่างเริ่มต้นของการใช้งานเครื่องมือการแปลงเพื่อทำการเลือกไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอลและทำ

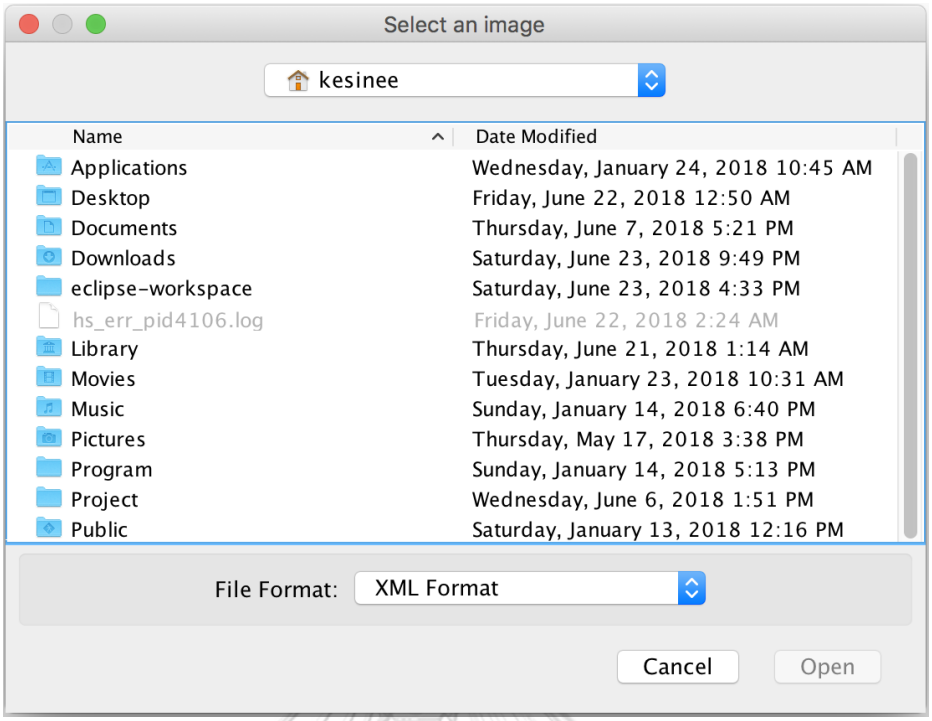
การอัพโหลด ดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.7 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.19

*ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของหน้าต่าง "SPN XML Upload"*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| SPN XML File | กล่องข้อความ | เพื่อแสดงที่อยู่ที่เก็บเอกสารของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอลภาย โดยจะแสดงผลหลังจากกดปุ่ม "Browse" และเลือกไฟล์เรียบร้อยแล้ว |
| Browse | ปุ่ม | เมื่อกดจะแสดงหน้าต่างตามรูปที่ 4.20 เพื่อให้เลือกที่อยู่เก็บเอกสารของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอล |
| Upload File | ปุ่ม | เมื่อกดจะทำการตรวจสอบเอกสารของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกสารเอกซ์เอ็มแอลว่าถูกต้องหรือไม่ |




*รูปที่ 4.19 หน้าต่าง "SPN XML Upload"*




*รูปที่ 4.20 หน้าต่างสำหรับหาที่อยู่ของแฟ้มเอกสารสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบเอกซ์เอ็มแอล*

2) หน้าต่าง “Input Required Parameter” เป็นหน้าต่างที่ให้สำหรับผู้ใช้งานกำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นที่ต้องใช้ในการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟ, คำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น และวิเคราะห์โอกาสที่แท็กโทเค็นจะอยู่ในแถวคอยตามเวลาที่ได้กำหนดไว้ในพารามิเตอร์มีค่าเป็นเท่าใด ซึ่งในหน้าต่างนี้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

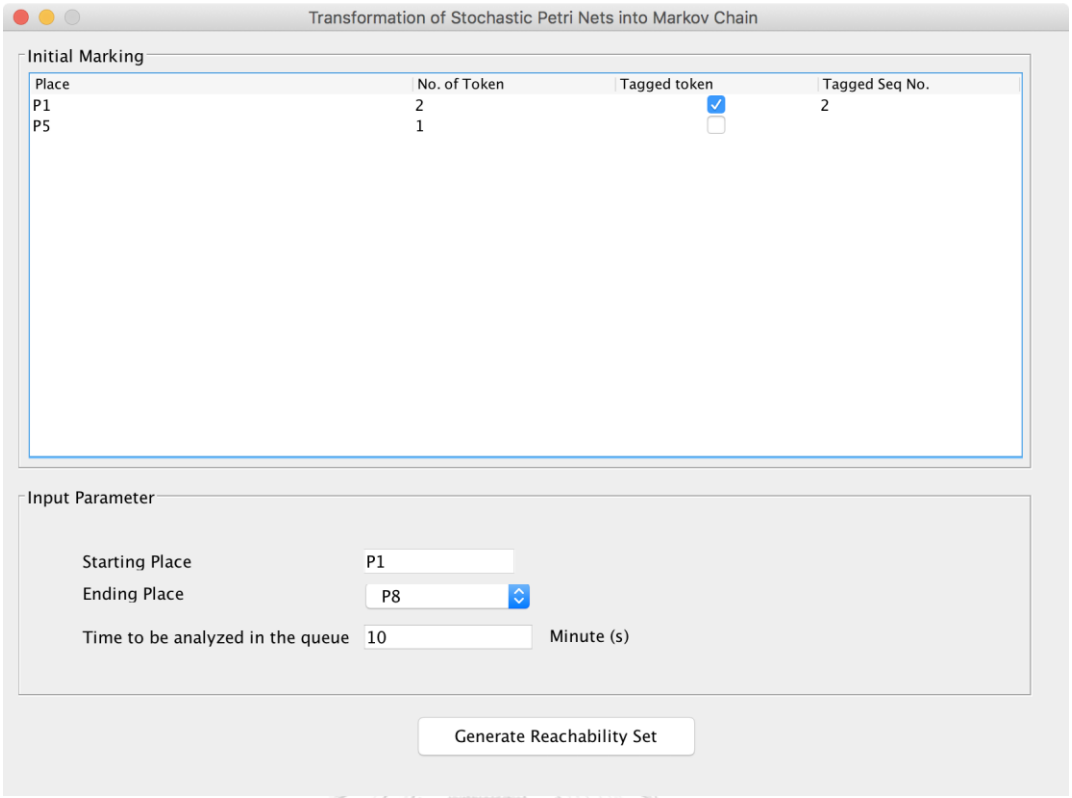
- ส่วนแรก: “Initial Marking” ซึ่งส่วนนี้เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานต้องเลือกโทเค็นที่จะแท็กว่าต้องการแท็กที่เพลสใด พร้อมทั้งระบุลำดับของโทเค็นที่ต้องการแท็กเข้าไปด้วย โดยลิสต์ของเพลสที่ให้ผู้ใช้งานเลือกจะเป็นลิสต์ที่ได้กำหนดมาร์กิงเริ่มต้นมาในไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ต เช่น Initial Marking มีทั้งหมด 2 เพลส ได้แก่ $P_1$ และ $P_2$ ซึ่งผู้ใช้ต้องการแท็กโทเค็นที่เพลส $P_1$ ซึ่งในเพลส $P_1$ มีจำนวนโทเค็นในเพลสทั้งหมด 3 โทเค็น และผู้ใช้งานต้องการแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ดังนั้น ให้เลือกที่ “Tagged Token” ของเพลส $P_1$ และระบุ Tagged Seq. เป็น “2” เป็นต้น
- ส่วนที่สอง: “Input Parameter” ส่วนนี้เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานต้องระบุเพลสสิ้นสุดและ เวลาที่ต้องใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ Tagged Seq. จะอยู่ในแถวคอยมีค่าเป็นเท่าใด

ซึ่งรายละเอียดจะเป็นตามตารางที่ 4.8 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.21

*ตารางที่ 4.8 รายละเอียดของหน้าต่าง "Input Required Parameter"*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| **Initial Marking** | | |
| Place | ข้อความ | แสดงชื่อของเพลส |
| No. of Token | ข้อความ | แสดงจำนวนของโทเค็นที่ได้ระบุมาตั้งแต่เริ่มต้น |
| Tagged Token | ช่องสี่เหลี่ยมกาเครื่องหมาย | แสดงช่องสี่เหลี่ยมเพื่อให้ผู้ใช้งานกาเครื่องหมายว่าต้องการจะแท็กโทเค็นที่อยู่ในเพลสนี้หรือไม่ |
| Tagged Seq. | กล่องข้อความ | ให้ผู้ใช้งานใส่ลำดับของโทเค็นที่ต้องการจะแท็ก |
| **Input Parameter** | | |
| Start Place | ข้อความ | แสดงเพลสเริ่มต้น ซึ่งจะได้มาจากการเลือกแท็กโทเค็นในหัวข้อ "Initial Marking" |
| End Place | รายการเลือกแบบดึงลง | แสดงรายการเลือกแบบดึงลงของเพลสทั้งหมดที่อยู่ในไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบเอกซ์เอ็มแอล |
| Time to be analyzed in the queue | กล่องข้อความ | ให้ผู้ใช้งานระบุเวลาเพื่อใช้นำไปวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่โทเค็นที่แท็กมีโอกาสอยู่ในระบบแถวคอยเป็นเท่าใด |
| | ข้อความ | แสดง Minutes |
| Generate Reachability Set | ปุ่ม | เมื่อกดจะทำการสร้างริชอะบิลิตี้เซต |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




*รูปที่ 4.21 หน้าต่าง "Input Required Parameter"*

3) หน้าต่าง "Reachability Set" เป็นหน้าต่างแสดงริชอะบิลิเซตทั้งหมด ซึ่งสามารถตรวจสอบแท็กโทเค็นได้จากตาราง หากจำนวนโทเค็นใดในเพลสได้ถูกแท็กจะมีวงเล็บ () กำกับอยู่ ซึ่งรายละเอียดจะเป็นตามตารางที่ 4.9 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.22

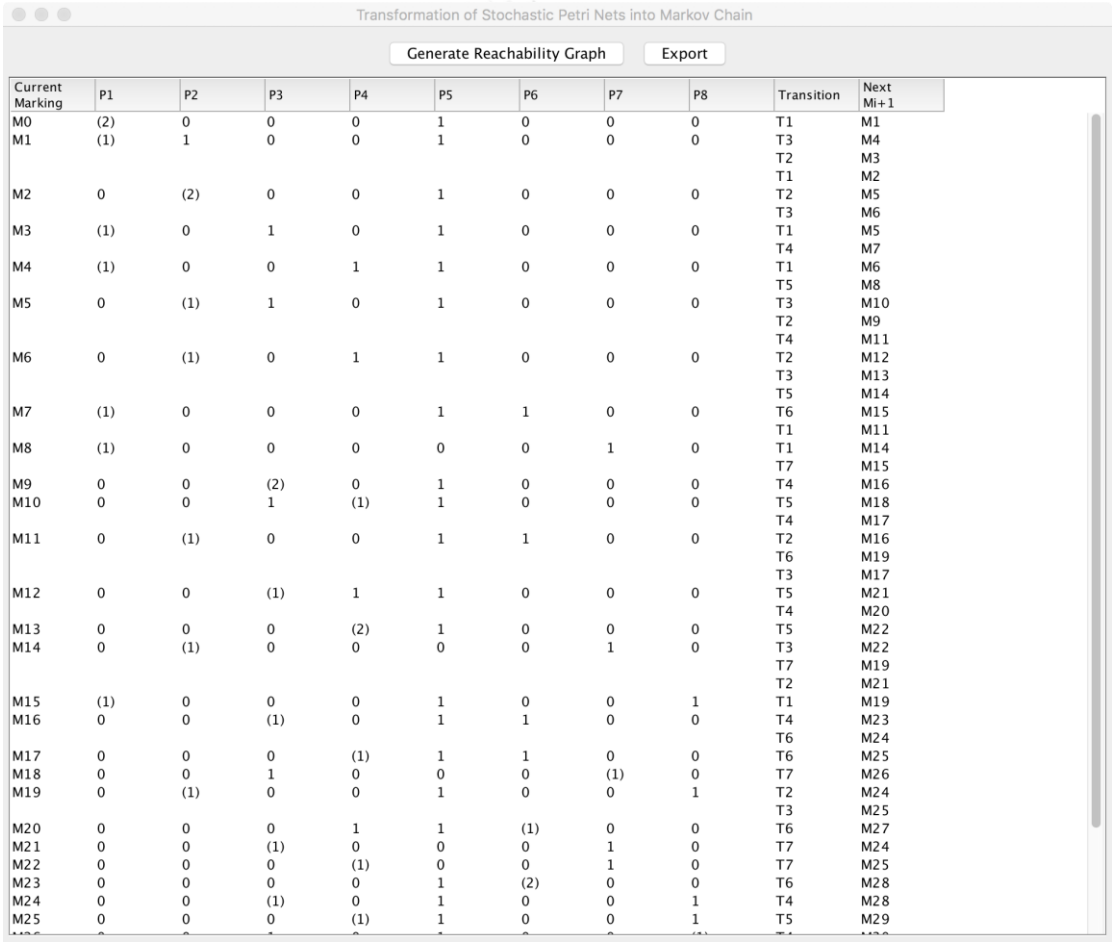
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของหน้าต่าง "Reachability Set"*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| Current Marking ($M_i$) | ข้อความ | แสดงรายการของมาร์กกิง เช่น $M_0$, $M_1$ เป็นต้น |
| Marking | ข้อความ | แสดงจำนวนโทเค็นของแต่ละเพลสตามแต่ละมาร์กกิง หากจำนวนโทเค็นของเพลสใดมีวงเล็บ () กำกับ แสดงว่าโทเค็นที่ถูกแท็กอยู่ ณ ตำแหน่งนั้น |
| Transition ($T_i$) | ข้อความ | แสดงทรานสิชันที่จะฟายริงเพื่อทำให้เกิด Next Marking |

*ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของหน้าต่าง “Reachability Set” (ต่อ)*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| Next Marking ($M_i$+1) | ข้อความ | แสดงมาร์กกิงถัดไปหลังจากที่ทรานสิชันที่อยู่ในคอลัมภ์ (Transition $T_i$) ได้ฟายริง |
| Generate Reachability Graph | ปุ่ม | เมื่อกดจะทำการแสดงหน้าต่าง “Reachability Graph” พร้อมทั้งทำการแสดงผลริชอะบิลิตี้กราฟ |



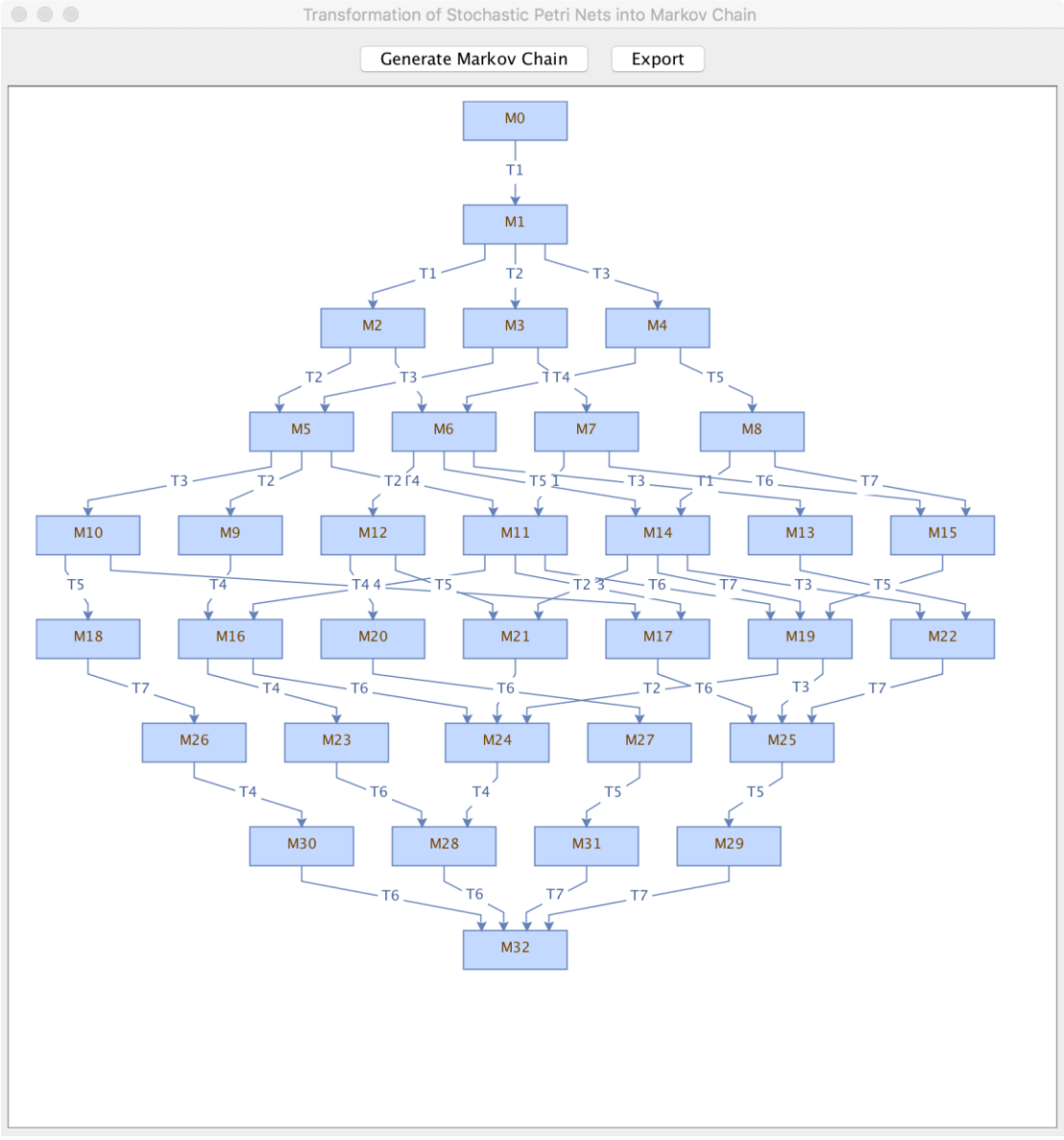

| Current Marking | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (2) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M1 |
| M1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M4 |
| | | | | | | | | | T2 | M3 |
| | | | | | | | | | T1 | M2 |
| M2 | 0 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M5 |
| | | | | | | | | | T3 | M6 |
| M3 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M5 |
| | | | | | | | | | T4 | M7 |
| M4 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M6 |
| | | | | | | | | | T5 | M8 |
| M5 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M10 |
| | | | | | | | | | T2 | M9 |
| | | | | | | | | | T4 | M11 |
| M6 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M12 |
| | | | | | | | | | T3 | M13 |
| | | | | | | | | | T5 | M14 |
| M7 | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | T6 | M15 |
| | | | | | | | | | T1 | M11 |
| M8 | (1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | T1 | M14 |
| | | | | | | | | | T7 | M15 |
| M9 | 0 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M16 |
| M10 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T5 | M18 |
| | | | | | | | | | T4 | M17 |
| M11 | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | T2 | M16 |
| | | | | | | | | | T6 | M19 |
| | | | | | | | | | T3 | M17 |
| M12 | 0 | 0 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T5 | M21 |
| | | | | | | | | | T4 | M20 |
| M13 | 0 | 0 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T5 | M22 |
| M14 | 0 | (1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | T3 | M22 |
| | | | | | | | | | T7 | M19 |
| | | | | | | | | | T2 | M21 |
| M15 | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M19 |
| M16 | 0 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | T4 | M23 |
| | | | | | | | | | T6 | M24 |
| M17 | 0 | 0 | 0 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | T6 | M25 |
| M18 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | (1) | 0 | T7 | M26 |
| M19 | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T2 | M24 |
| | | | | | | | | | T3 | M25 |
| M20 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | 0 | 0 | T6 | M27 |
| M21 | 0 | 0 | (1) | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | T7 | M24 |
| M22 | 0 | 0 | 0 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | T7 | M25 |
| M23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 0 | T6 | M28 |
| M24 | 0 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M28 |
| M25 | 0 | 0 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | T5 | M29 |

*รูปที่ 4.22 หน้าต่าง “Reachability Set”*

4) หน้าต่าง “Reachability Graph” เป็นหน้าต่างที่แสดงริชอะบิลิตี้กราฟ ให้เห็นความสัทพันธ์ของแต่ละมาร์กกิงว่าเกิดมาร์กิงชุดนี้ขึ้นเพราะว่าทรานสิชันใดฟายริง ซึ่งรายละเอียดจะเป็นตามตารางที่ 4.10 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.23

*ตารางที่ 4.10 รายละเอียดของหน้าต่าง “Reachability Graph”*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| ริชอะบิลิตี้กราฟ | รูปภาพ | แสดงริชอะบิลิตี้กราฟ |
| Generate Markov Chain | ปุ่ม | เมื่อกดจะทำการแสดงหน้าต่าง “Markov Chain and Analysis Result” พร้อมทั้งทำการแสดงผลห่วงโซ่มาร์คอฟและคำนวนความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น |

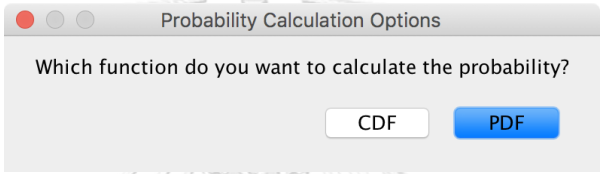



*รูปที่ 4.23 หน้าต่าง “Reachability Graph”*

5) หน้าต่าง “Probability Calculation Options” เป็นหน้าต่างที่ให้ผู้ใช้งานได้เลือกฟังก์ชันการคำนวณความน่าจะเป็น โดยสามารถเลือกได้ 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมรายละเอียดจะเป็นตามตารางที่ 4.11 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.24

*ตารางที่ 4.11 รายละเอียดของหน้าต่าง “Probability Calculation Option”*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| เลือกฟังก์ชันการคำนวณความน่าจะเป็น | ปุ่ม | แสดงทางเลือกในการคำนวณเพื่อให้ผู้ใช้งานได้เลือก ได้แก่ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (CDF) |



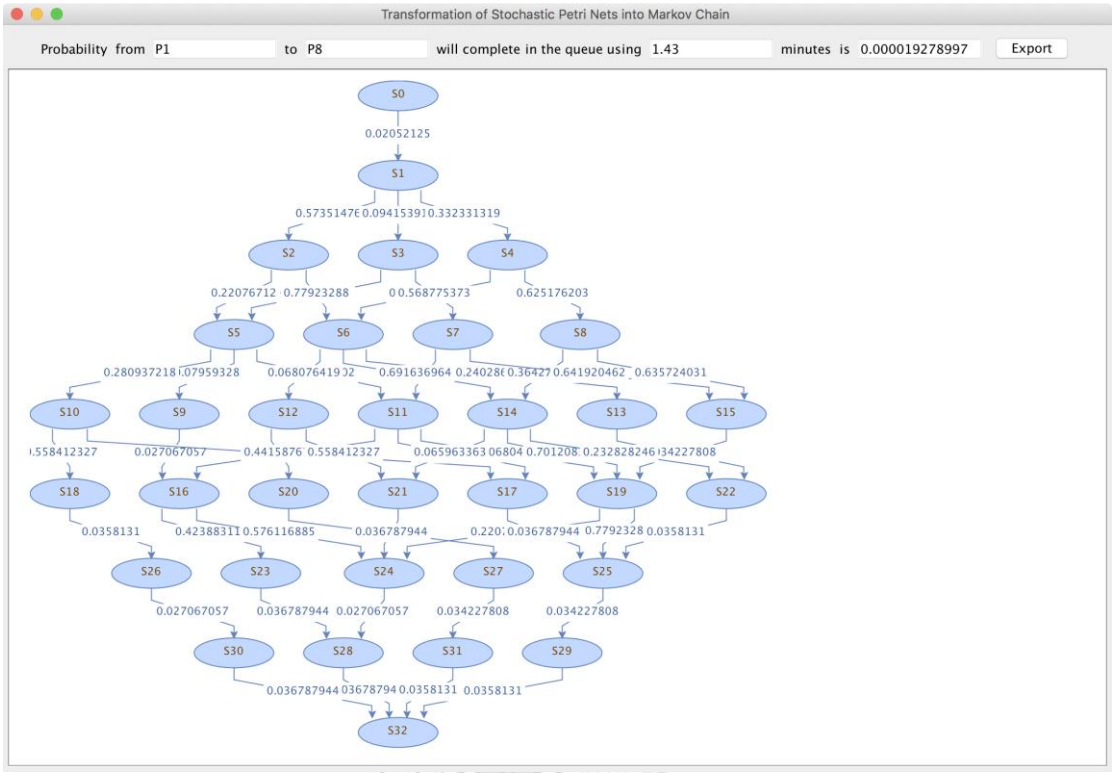

*รูปที่ 4.24 หน้าต่าง “Probability Calculation Options"*

6) หน้าต่าง “Markov Chain and Analysis Result” เป็นหน้าต่างที่แสดงห่วงโซ่มาร์คอฟพร้อมกับแสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โอกาสที่โทเค็นที่แท็กจากเพลสเริ่มต้นถึงเพลสสิ้นสุดภายในระยะเวลาที่ผู้ใช้งานได้กำหนดเอาไว้มีค่าเป็นเท่าใด ซึ่งรายละเอียดจะเป็นตามตารางที่ 4.12 และหน้าต่างแสดงส่วนประกอบจะเป็นดังรูปที่ 4.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

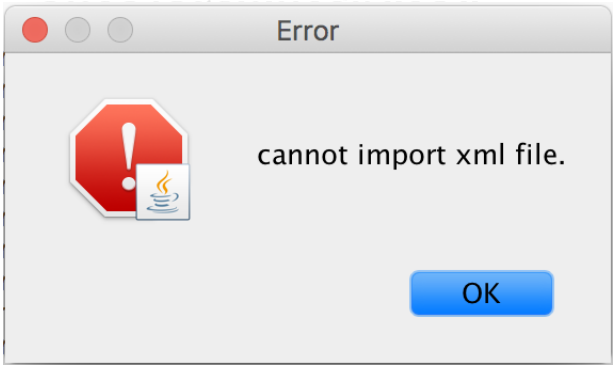
*ตารางที่ 4.12 รายละเอียดของหน้าต่าง “Markov Chain and Analysis Result”*

| หัวข้อ | รูปแบบ | รายละเอียด |
|---|---|---|
| ห่วงโซ่มาร์คอฟ | รูปภาพ | แสดงห่วงโซ่มาร์คอฟ |
| Probability from :Start Place to :End Place will complete in the queue using X minutes is ..... | ข้อความ | แสดงผลการวิเคราะห์ “ความน่าจะเป็นที่โทเค็นที่ได้แท็กจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสิ้นสุดภายในระยะเวลาที่กำหนดมีค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเป็นเท่าใด” |




*รูปที่ 4.25 หน้าต่าง "Markov Chain and Analysis Result"*

7) หน้าต่างแจ้งข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นของเครื่องมือ เป็นหน้าต่างที่แสดงข้อความแจ้งเตือนเมื่อเกิดข้อผิดพลาดขึ้น เช่น ผู้ใช้งานใส่แอททริบิวต์ที่เครื่องมือไม่ได้รองรับ ซึ่งเครื่องมือจะแสดงข้อความแจ้งเตือนดังรูปที่ 4.26




*รูปที่ 4.26 หน้าต่างแจ้งเตือนข้อผิดพลาด*

# บทที่ 5 การทดสอบเครื่องมือการแปลงสโตแคสติกไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งจะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ, การทดสอบเครื่องมือกับกรณีศึกษา โดยจะทดสอบเครื่องมือจาก 3 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีศึกษาของแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป, การเข้าแถวคอยและการผลิตรถยนต์ สุดท้ายจะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบเครื่องมือโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 5.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบ สามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 5.1.1 ฮาร์ดแวร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ก หน่วยประมวลผลอินเทลคอร์ไฟต์ 2.30 กิกะเฮิร์ทซ์ (2.3 GHz Intel Core i5)
- หน่วยความจำสำรอง (RAM) 8.0 กิกะไบต์ (8.0 GB)
- ฮาร์ดดิสก์ (Harddisk) 250 กิกะไบต์ (250 GB)

### 5.1.2 ซอฟต์แวร์

- ระบบปฏิบัติการ (Mac OS) High Sierra เวอร์ชั่น 10.13.4 (17E202)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 5.2 แนวทางในการทดสอบเครื่องมือ

1) จัดเตรียมไฟล์สโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลของกรณีศึกษาที่จะทำการทดสอบ
2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1)
3) ใส่พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น
4) สร้างริชอะบิลิตี้เซต
5) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ

6) เลือกฟังก์ชันที่จะใช้คำนวณความน่าจะเป็น

7) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด

### 5.3 การทดสอบเครื่องมือ

การทดสอบเครื่องมือเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของเครื่องมือว่าสามารถแปลงสโตแคสติกไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟได้ถูกต้องหรือไม่ เมื่อแปลงมาเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟแล้วหากทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเป็นอย่างไร โดยจะแบ่งกรณีทดสอบออกเป็น 3 กรณีทดสอบ โดยใช้จาก 3 กรณีศึกษา ได้แก่

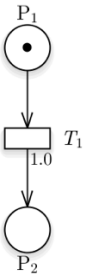
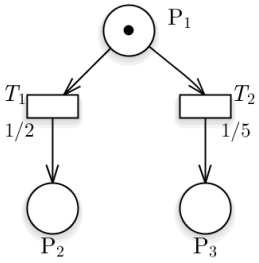
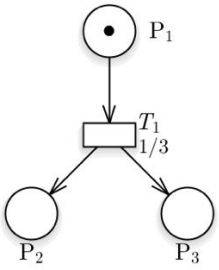
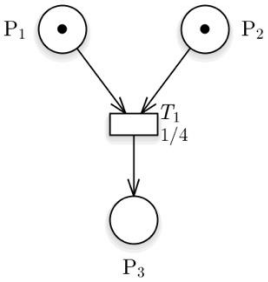
*ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดของกรณีทดสอบ*

| **กรณีทดสอบที่** | **รายละเอียดกรณีทดสอบ** | **ใช้กรณีศึกษา** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป** | **การเข้าแถวคอย** | **การผลิตรถยนต์** |
| 1 | ทดสอบการคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมบนห่วงโซ่มาร์คอฟว่าคำนวณถูกต้องหรือไม่ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือกับการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันในโปรแกรมของไมโครซอฟต์เอกซ์เซล | √ | | |
| 2 | วิเคราะห์ความน่าจะเป็นจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสุดท้ายของการแท็กโทเค็นลำดับที่ 1, 2 และ 3 | | √ | |
| 3 | วิเคราะห์ความน่าจะเป็นจากเพลสเริ่มต้นจนถึงเพลสสุดท้ายของการแท็กโทเค็นลำดับที่ 1, 2 และ 3 | | | √ |

### 5.3.1 กรณีทดสอบโดยใช้แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป

แผนภาพของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไปมีทั้งหมด 4 รูปแบบ ตามตารางที่ 5.2 ดังนี้

*ตารางที่ 5.2 รูปแบบของสโตแคสติกเพทริเน็ต*

| แบบลำดับ (Sequence) | แบบขัดกัน (Conflict) | แบบทางแยก (Concurrent) | แบบประสาน (Join) |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |









ซึ่งในการทดสอบการคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมบนห่วงโซ่มาร์คอฟว่าคำนวณถูกต้องหรือไม่ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือกับการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันในโปรแกรมของไมโครซอฟต์เอกซ์เซล การทดสอบจะดำเนินการทดสอบกับแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของทั้ง 4 รูปแบบข้างต้น โดยจะเริ่มทำการทดสอบตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้ตามขั้นตอน ดังนี้

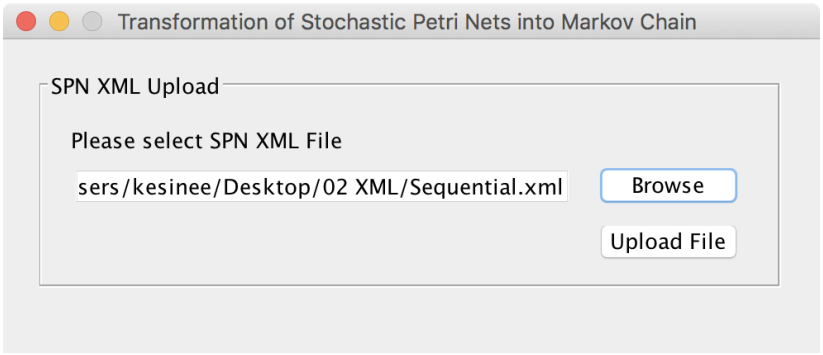
**ทดสอบกรณีสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ**

1) เตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตของรูปแบบลำดับในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลตามรูปที่ 5.1

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="1" capacity="5" type="Sequential"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="Sequential"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="1"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

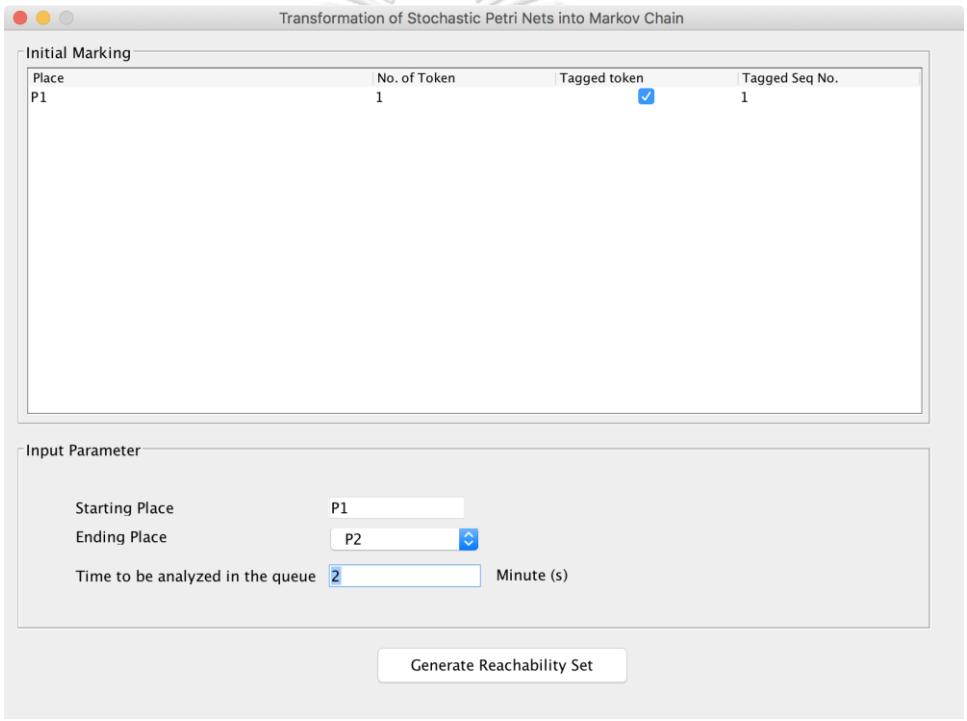
*รูปที่ 5.1 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.2



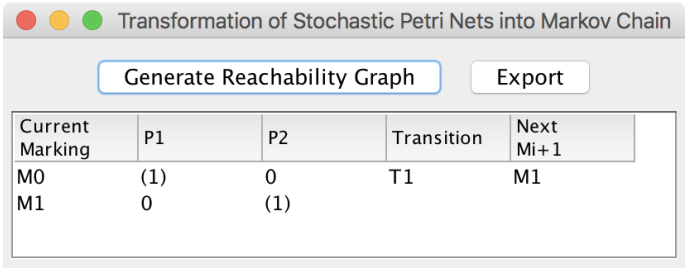

*รูปที่ 5.2 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

3) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: P1, Tagged Seq. No.: 1, Ending Place: P2 และ Time to be analyzed in the queue: 2 minutes) ตามรูปที่ 5.3



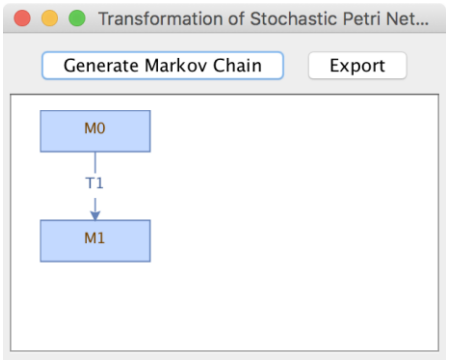

*รูปที่ 5.3 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

4) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.4



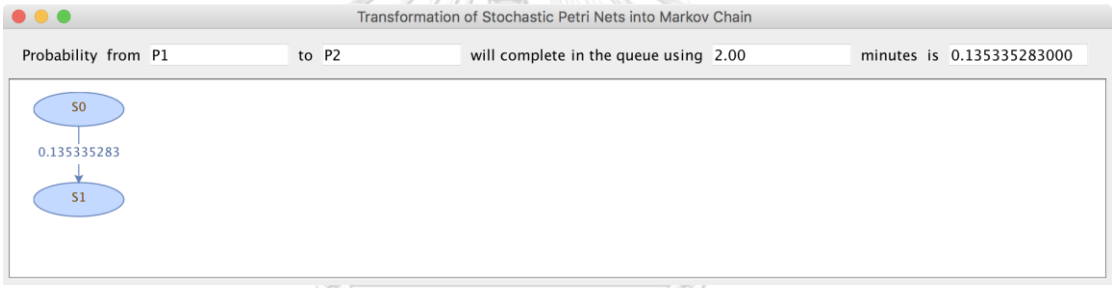

*รูปที่ 5.4 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

5) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.5




*รูปที่ 5.5 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

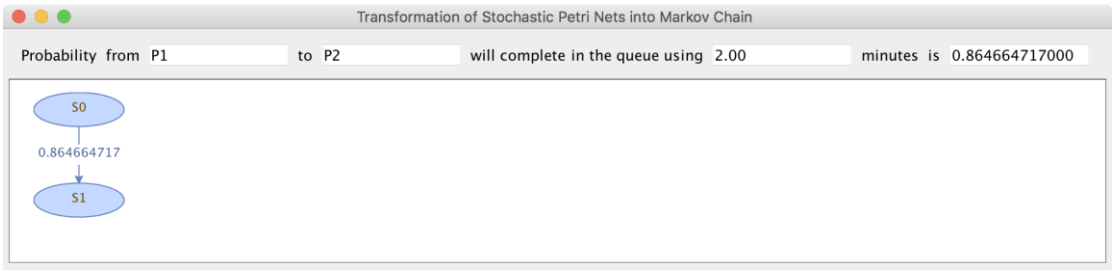
6) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.6




*รูปที่ 5.6 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

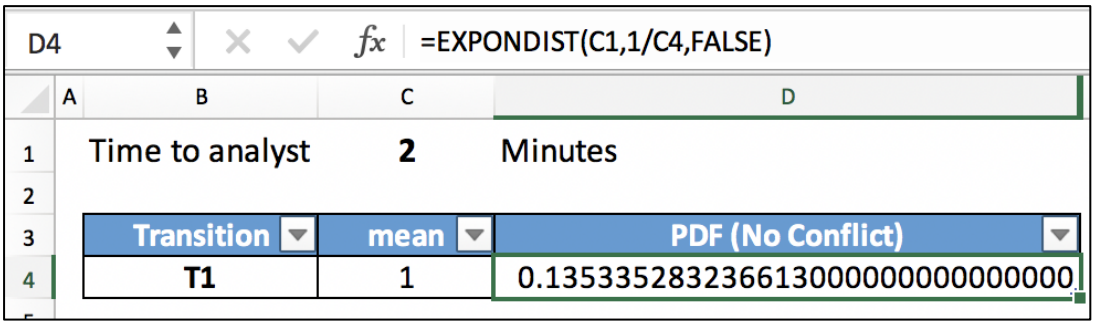
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.7



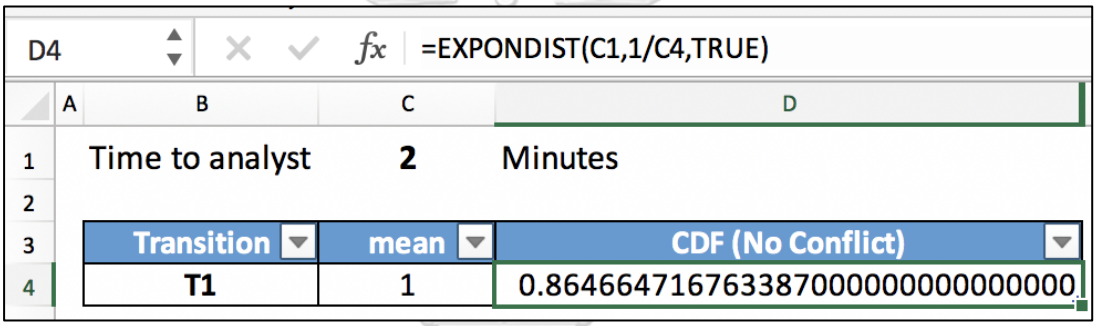

*รูปที่ 5.7 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

8) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.8




*รูปที่ 5.8 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

9) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.9




*รูปที่ 5.9 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

**ทดสอบกรณีสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน**

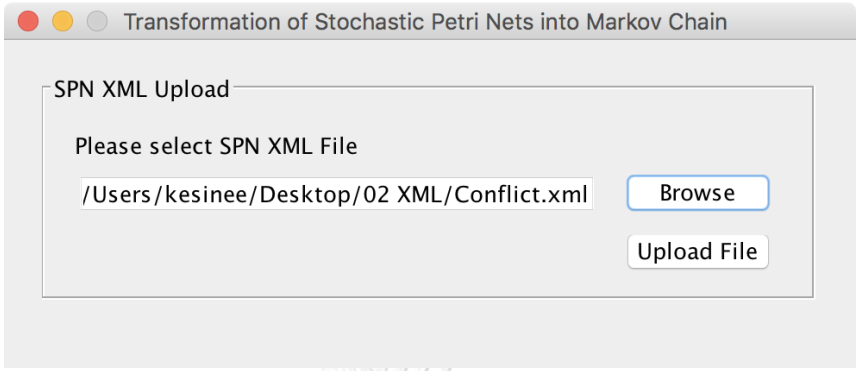
1) เตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตของรูปแบบขัดกันในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลตามรูปที่ 5.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="1" capacity="5" type="Conflict"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="Conflict"/>
        <place id="P3" name="P3" initialMarking="0" capacity="5" type="Conflict"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="2"/>
        <transition id="T2" name="T2" type="timed" mean="5"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P1 to T2" name="P1 to T2" source="P1" target="T2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T2 to P3" name="T2 to P3" source="T2" target="P3" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

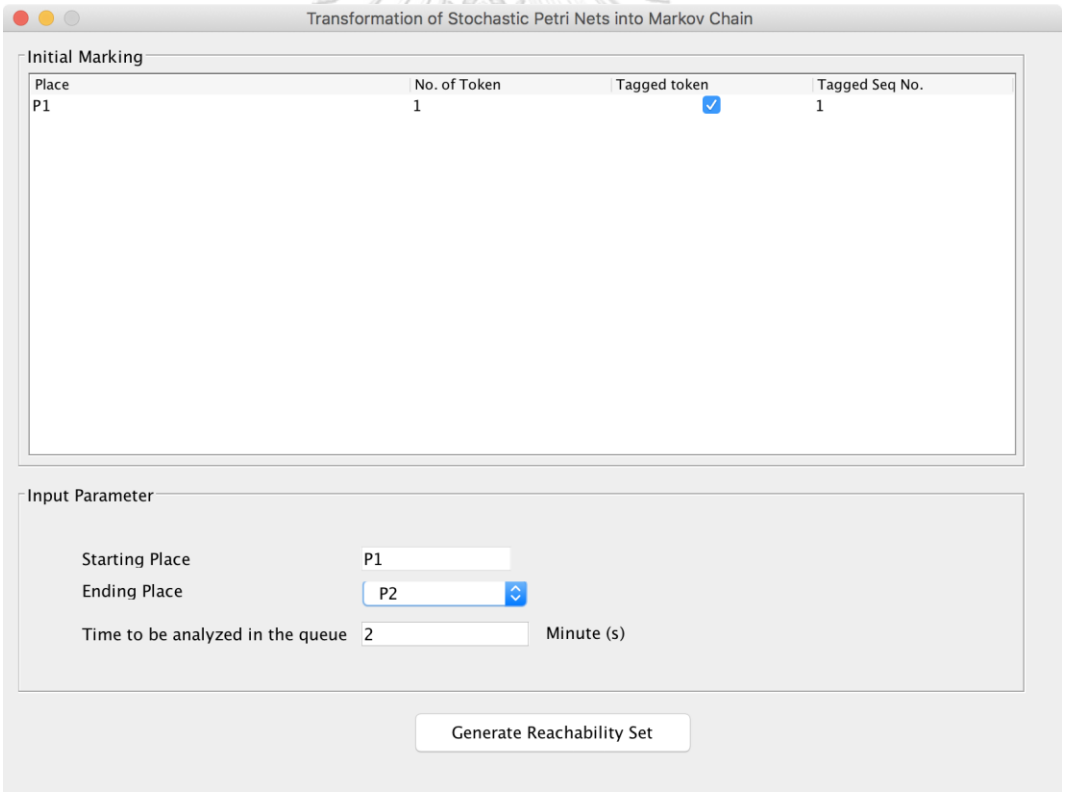
*รูปที่ 5.10 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.11



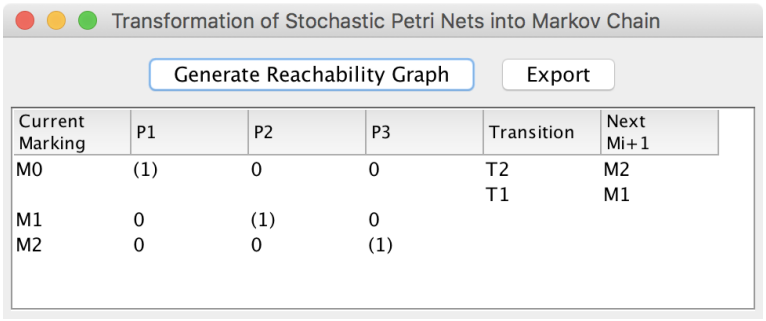

*รูปที่ 5.11 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

3) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: P1, Tagged Seq. No.: 1, Ending Place: P2 และ Time to be analyzed in the queue: 2 minutes) ตามรูปที่ 5.12



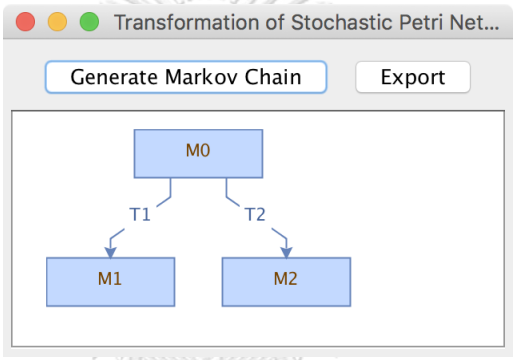

*รูปที่ 5.12 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

4) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.13



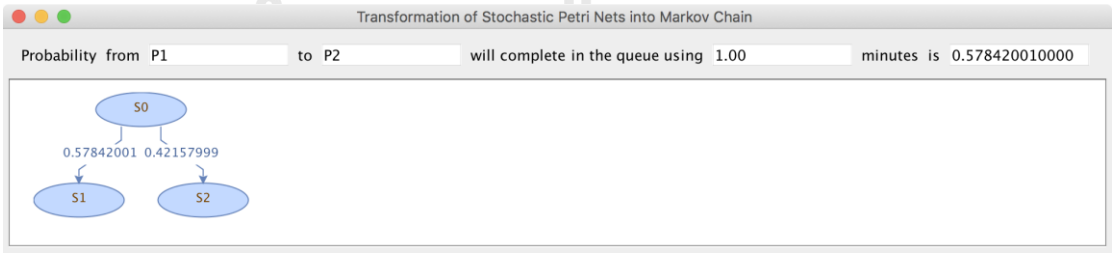

*รูปที่ 5.13 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

5) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.14



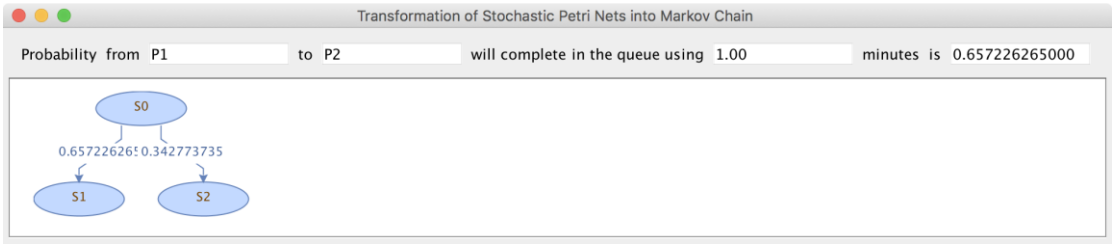

*รูปที่ 5.14 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

6) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.15




*รูปที่ 5.15 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

7) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.16




*รูปที่ 5.16 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

8) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.17

D8 =Table1357[PDF (No Conflict)]/(Table1357[PDF (No Conflict)]+D5)

Time to analyst 2 Minutes

| Transition | mean | PDF (No Conflict) |
|---|---|---|
| T1 | 2 | 0.183939720585721000000000000000 |
| T2 | 5 | 0.134064009207128000000000000000 |

| Transition | PDF (Conflict) |
|---|---|
| T1 | 0.57842001 |
| T2 | 0.42157999 |

*รูปที่ 5.17 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

9) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.18

D8 =Table1357[CDF (No Conflict)]/(Table1357[CDF (No Conflict)]+D5)

Time to analyst 2 Minutes

| Transition | mean | CDF (No Conflict) |
|---|---|---|
| T1 | 2 | 0.632120558828558000000000000000 |
| T2 | 5 | 0.329679953964361000000000000000 |

| Transition | CDF (Conflict) |
|---|---|
| T1 | 0.657226265 |
| T2 | 0.342773735 |

*รูปที่ 5.18 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบขัดกัน*

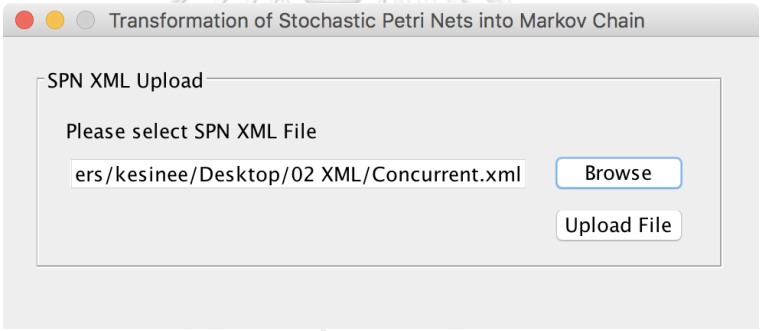
**ทดสอบกรณีสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก**

1) เตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตของรูปแบบขัดกันในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลตามรูปที่ 5.19

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="1" capacity="5" type="Concurrent"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="Concurrent"/>
        <place id="P3" name="P3" initialMarking="0" capacity="5" type="Concurrent"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="3"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P3" name="T1 to P3" source="T1" target="P3" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

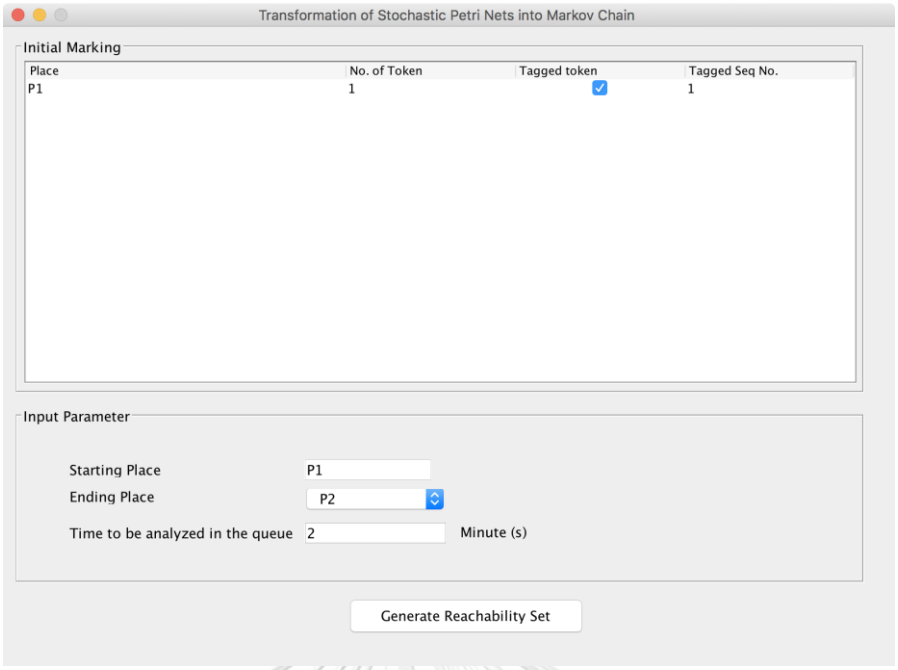
*รูปที่ 5.19 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.20



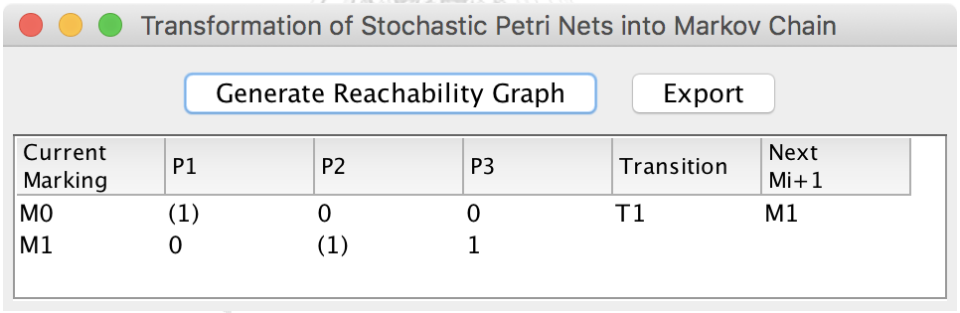

*รูปที่ 5.20 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

3) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: P1, Tagged Seq. No.: 1, Ending Place: P2 และ Time to be analyzed in the queue: 2 minutes) ตามรูปที่ 5.21



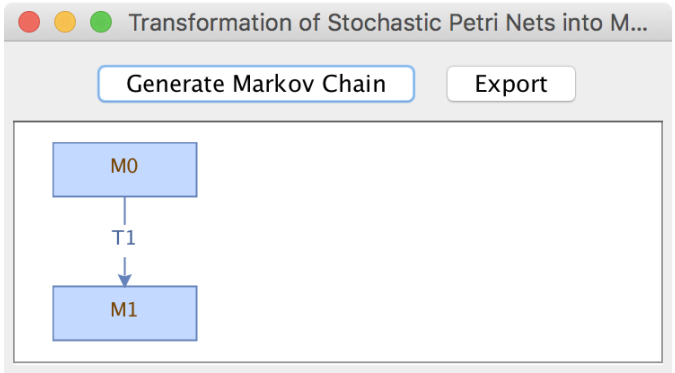

*รูปที่ 5.21 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

4) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.22



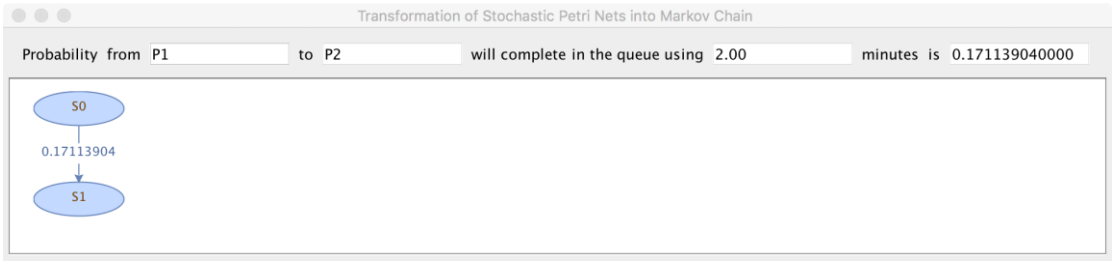

*รูปที่ 5.22 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

5) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.23



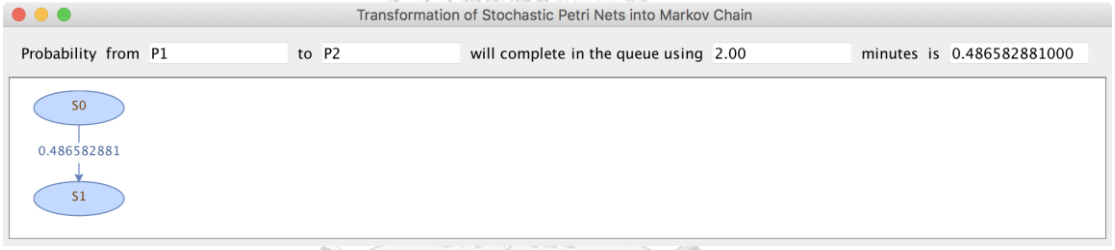

*รูปที่ 5.23 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

6) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.24



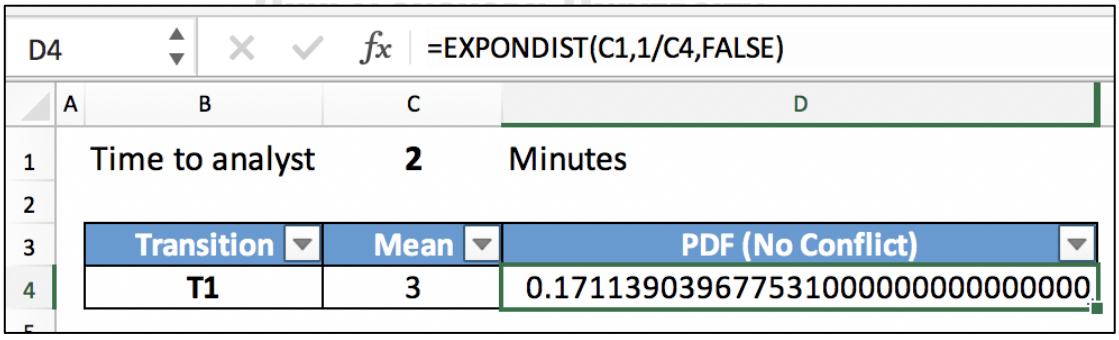

*รูปที่ 5.24 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

7) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.25



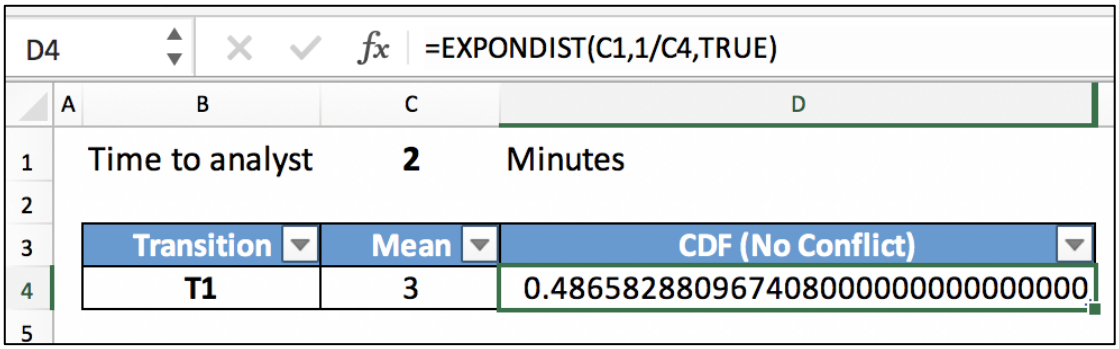

*รูปที่ 5.25 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

8) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.26




*รูปที่ 5.26 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

9) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.27




*รูปที่ 5.27 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบทางแยก*

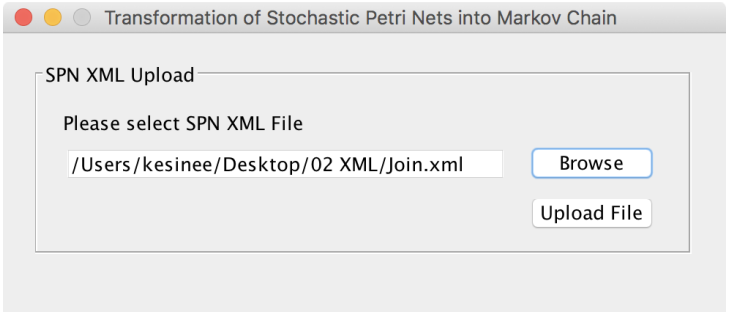
**ทดสอบกรณีสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน**

1) เตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตของรูปแบบประสานในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลตามรูปที่ 5.28

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="1" capacity="5" type="Join"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="1" capacity="5" type="Join"/>
        <place id="P3" name="P3" initialMarking="0" capacity="5" type="Join"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="4"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="P2 to T1" name="P2 to T1" source="P2" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P3" name="T1 to P3" source="T1" target="P3" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

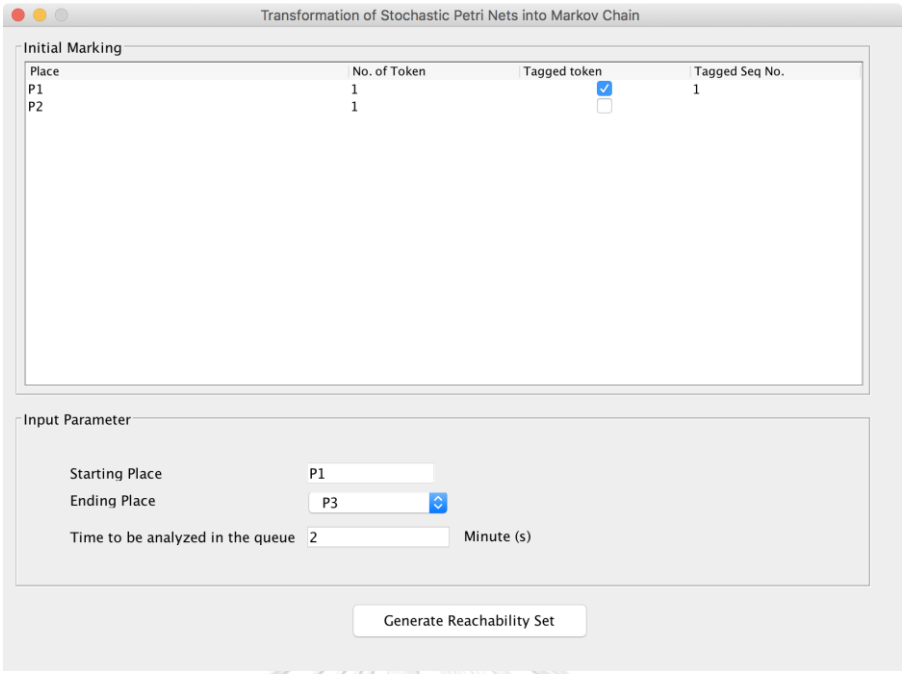
*รูปที่ 5.28 เอกซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.29



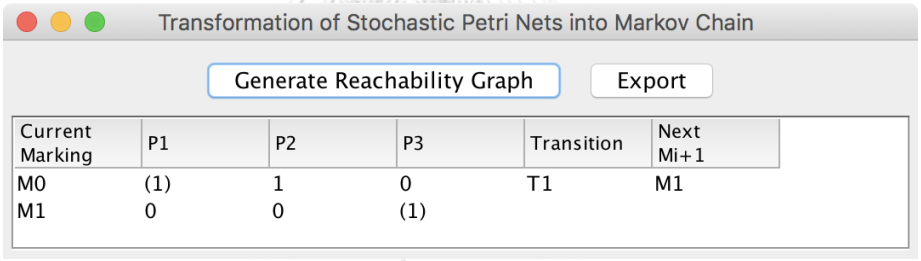

*รูปที่ 5.29 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

3) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: P1, Tagged Seq. No.: 1, Ending Place: P3 และ Time to be analyzed in the queue: 2 minutes) ตามรูปที่ 5.30



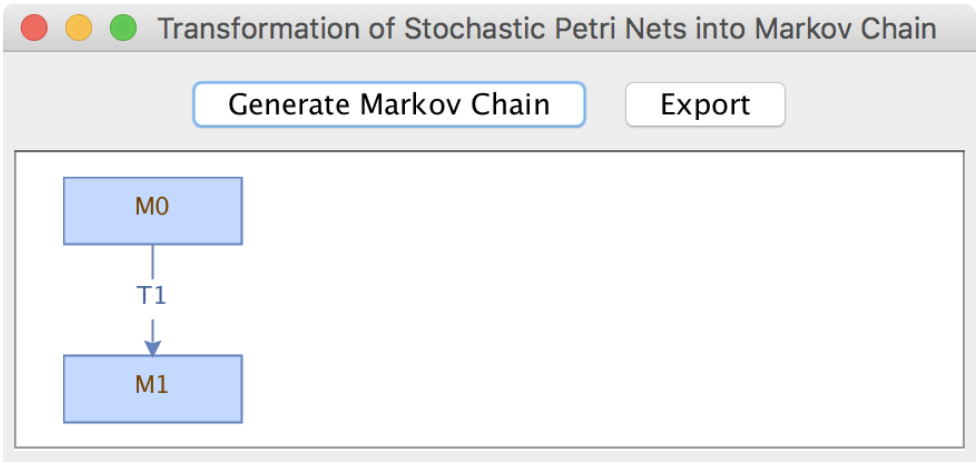

*รูปที่ 5.30 ระบุพารามิเตอร์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

4) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.31



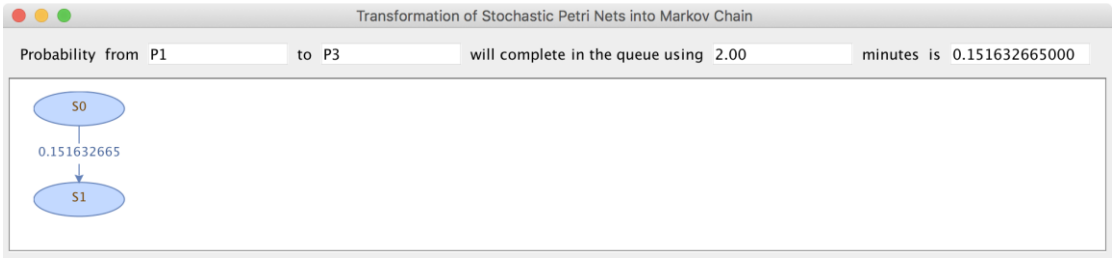

*รูปที่ 5.31 ริชอะบิลิตี้เซตของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

5) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.32



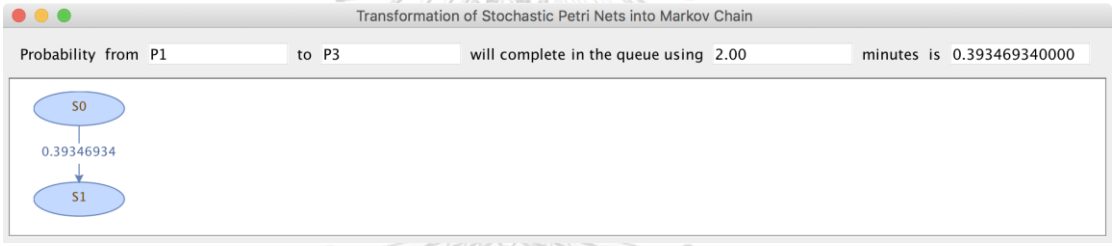

*รูปที่ 5.32 ริชอะบิลิตี้กราฟของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

6) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.33



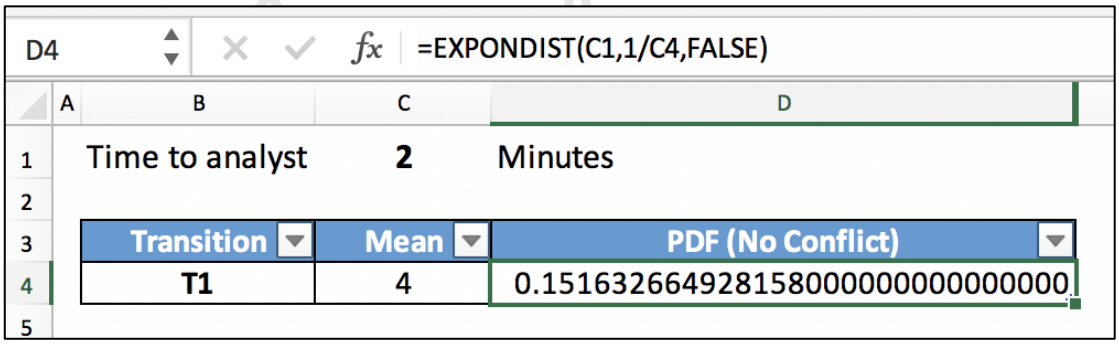

*รูปที่ 5.33 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

7) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.34



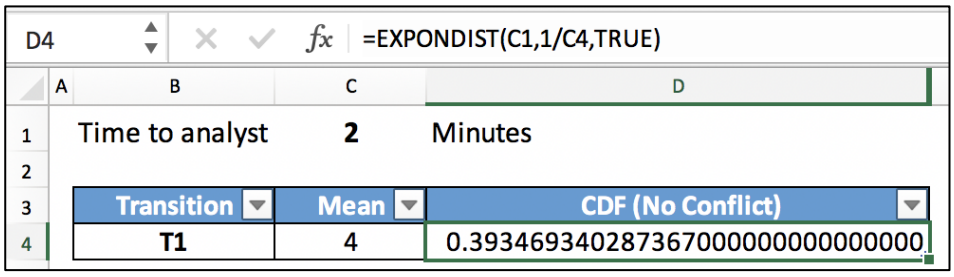

*รูปที่ 5.34 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

8) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.35




*รูปที่ 5.35 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบประสาน*

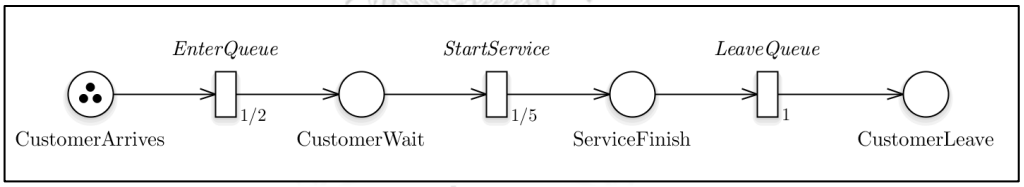
9) ทดสอบการคำนวณความน่าจะเป็นของโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล ตามรูปที่ 5.36




*รูปที่ 5.36 ความน่าจะเป็นของการใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซลของสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบลำดับ*

### 5.3.2 กรณีทดสอบของกรณีศึกษาการเข้าแถวคอย

โดยแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการเข้าแถวคอยซึ่งเริ่มจากลูกค้ามาถึง ณ จุดที่ใช้บริการหลังจากนั้นลูกค้าจะทำการลงทะเบียนในการเข้าใช้บริการเมื่อลงทะเบียนเสร็จแล้วจะไปรอที่จุดรอใช้บริการ หลังจากที่ผู้ให้บริการพร้อมก็จะเข้าใช้บริการเมื่อเสร็จสิ้นการใช้บริการก็จะ ออกจากการเข้าแถวคอยเป็นดังรูปที่ 5.37 การทดสอบเราจะเริ่มทำการทดสอบตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้เบื้องต้นตามขั้นตอน ดังนี้




*รูปที่ 5.37 แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการเข้าแถวคอย*

หลังจากนั้นให้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

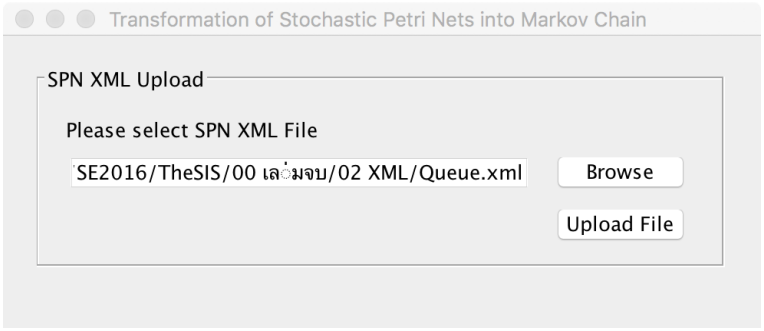
1) จัดเตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอยตามรูปที่ 5.38

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="CustomerArrives" name="CustomerArrives" initialMarking="3" capacity="5" type="Queue"/>
        <place id="CustomerWait" name="CustomerWait" initialMarking="0" capacity="5" type="Queue"/>
        <place id="ServiceFinish" name="ServiceFinish" initialMarking="0" capacity="5" type="Queue"/>
        <place id="CustomerLeave" name="CustomerLeave" initialMarking="0" capacity="5" type="Queue"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="EnterQueue" name="EnterQueue" type="timed" mean="2"/>
        <transition id="StartService" name="StartService" type="timed" mean="5"/>
        <transition id="LeaveQueue" name="LeaveQueue" type="timed" mean="1"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="EnterQueue to CustomerWait" name="EnterQueue to CustomerWait" source="EnterQueue" target="CustomerWait" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="StartService to ServiceFinish" name="StartService to ServiceFinish" source="StartService" target="ServiceFinish" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="LeaveQueue to CustomerLeave" name="LeaveQueue to CustomerLeave" source="LeaveQueue" target="CustomerLeave" type="normal" weight="1"/>

        <arc id="CustomerArrives to EnterQueue" name="CustomerArrives to EnterQueue" source="CustomerArrives" target="EnterQueue" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="CustomerWait to StartService" name="CustomerWait to StartService" source="CustomerWait" target="StartService" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="ServiceFinish to LeaveQueue" name="ServiceFinish to LeaveQueue" source="ServiceFinish" target="LeaveQueue" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

*รูปที่ 5.38 เอกซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอย*

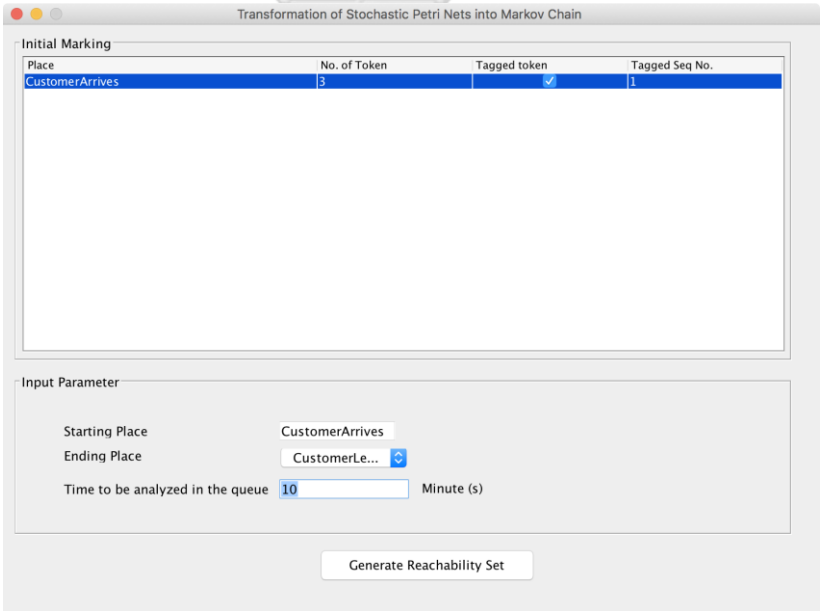
2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.39




*รูปที่ 5.39 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอย*

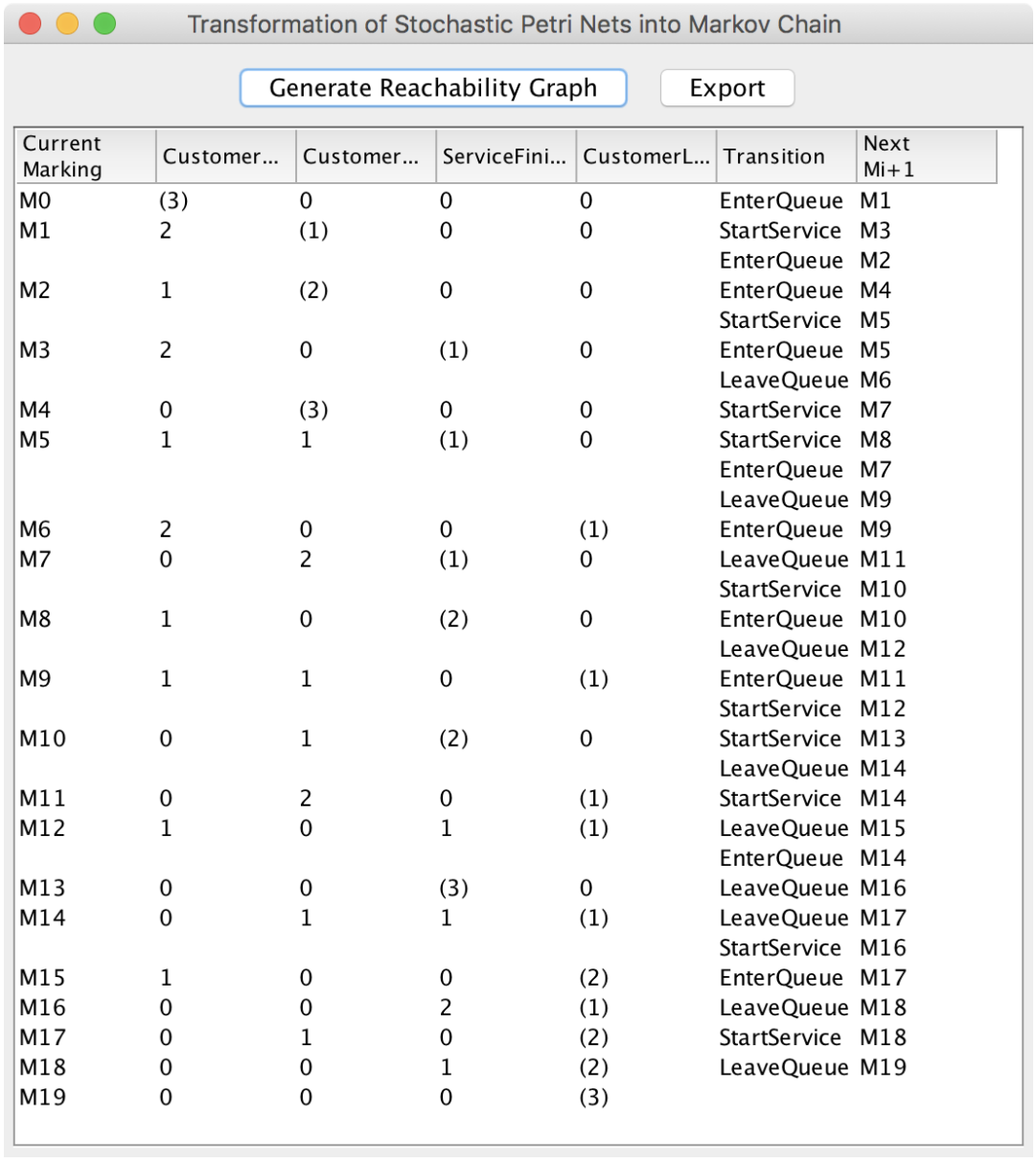
**การแท็กโทเค็นของการเข้าแถวคอยลำดับที่ 1**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: CustomerArrives, **Tagged Seq. No.: 1**, Ending Place: CustomerLeaves และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.40




*รูปที่ 5.40 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย*

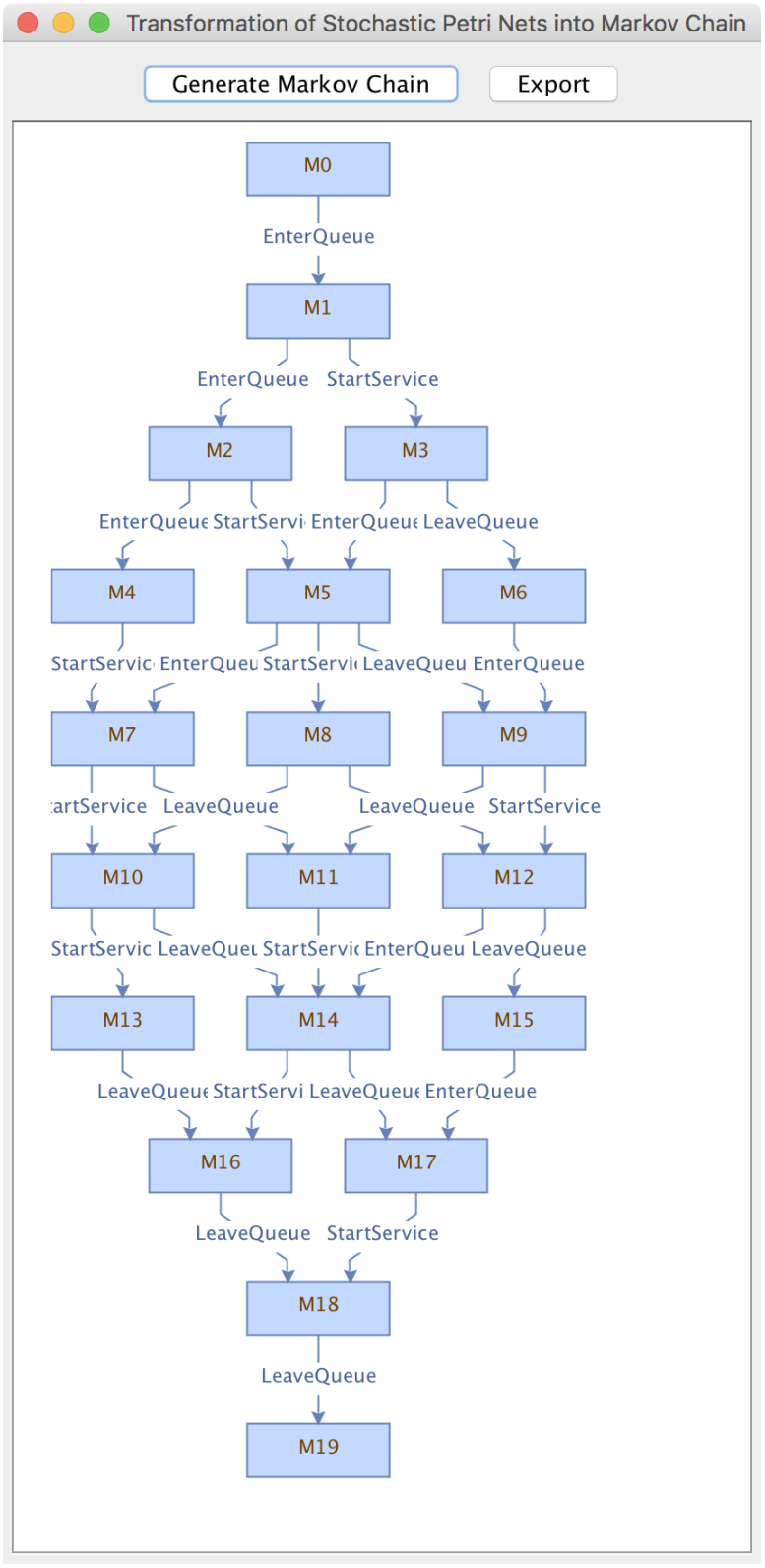
2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.41




| Current Marking | Customer... | Customer... | ServiceFini... | CustomerL... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 0 | 0 | EnterQueue | M1 |
| M1 | 2 | (1) | 0 | 0 | StartService | M3 |
| | | | | | EnterQueue | M2 |
| M2 | 1 | (2) | 0 | 0 | EnterQueue | M4 |
| | | | | | StartService | M5 |
| M3 | 2 | 0 | (1) | 0 | EnterQueue | M5 |
| | | | | | LeaveQueue | M6 |
| M4 | 0 | (3) | 0 | 0 | StartService | M7 |
| M5 | 1 | 1 | (1) | 0 | StartService | M8 |
| | | | | | EnterQueue | M7 |
| | | | | | LeaveQueue | M9 |
| M6 | 2 | 0 | 0 | (1) | EnterQueue | M9 |
| M7 | 0 | 2 | (1) | 0 | LeaveQueue | M11 |
| | | | | | StartService | M10 |
| M8 | 1 | 0 | (2) | 0 | EnterQueue | M10 |
| | | | | | LeaveQueue | M12 |
| M9 | 1 | 1 | 0 | (1) | EnterQueue | M11 |
| | | | | | StartService | M12 |
| M10 | 0 | 1 | (2) | 0 | StartService | M13 |
| | | | | | LeaveQueue | M14 |
| M11 | 0 | 2 | 0 | (1) | StartService | M14 |
| M12 | 1 | 0 | 1 | (1) | LeaveQueue | M15 |
| | | | | | EnterQueue | M14 |
| M13 | 0 | 0 | (3) | 0 | LeaveQueue | M16 |
| M14 | 0 | 1 | 1 | (1) | LeaveQueue | M17 |
| | | | | | StartService | M16 |
| M15 | 1 | 0 | 0 | (2) | EnterQueue | M17 |
| M16 | 0 | 0 | 2 | (1) | LeaveQueue | M18 |
| M17 | 0 | 1 | 0 | (2) | StartService | M18 |
| M18 | 0 | 0 | 1 | (2) | LeaveQueue | M19 |
| M19 | 0 | 0 | 0 | (3) | | |

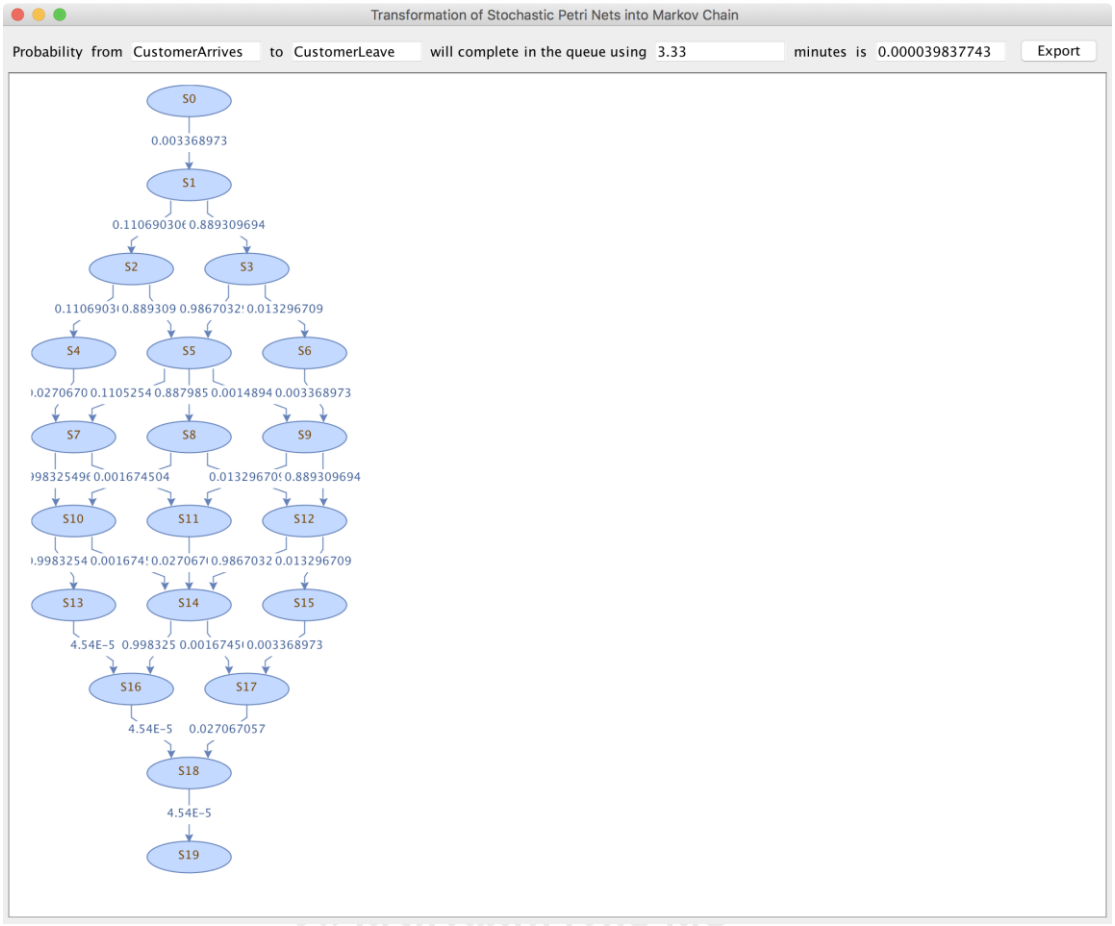
*รูปที่ 5.41 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย*

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.42



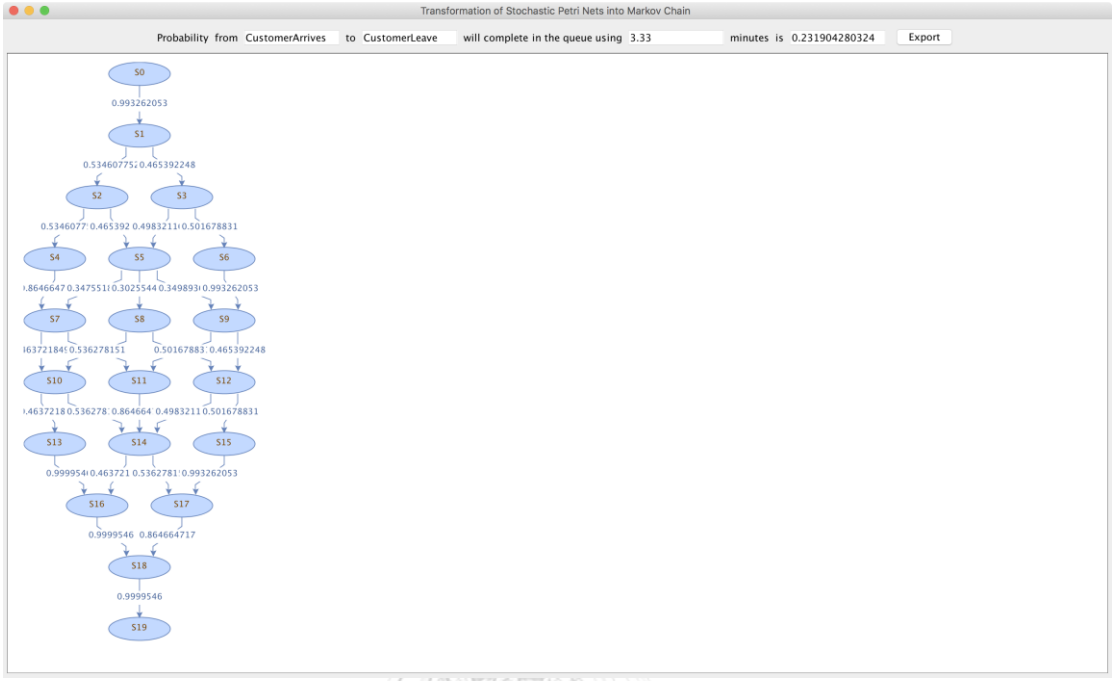

*รูปที่ 5.42 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย*

4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.43




*รูปที่ 5.43 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย*

5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.44

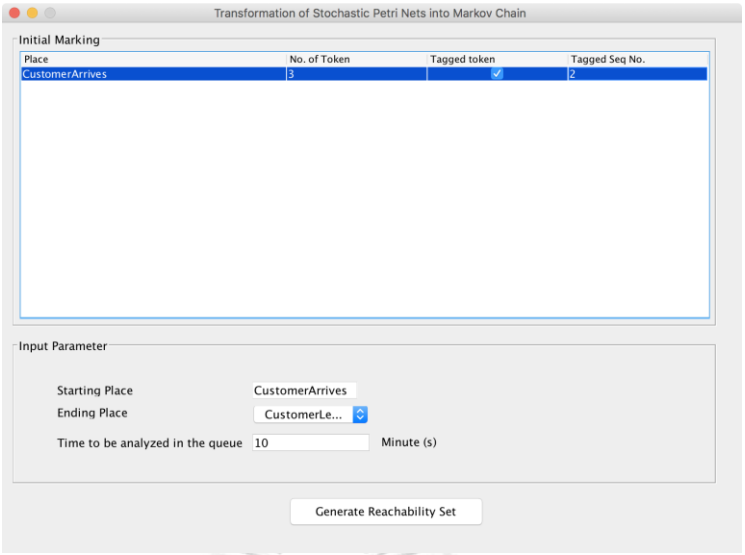



*รูปที่ 5.44 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการเข้าแถวคอย*

**การแท็กโทเค็นของการเข้าแถวคอยลำดับที่ 2**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: CustomerArrives, **Tagged Seq. No.: 2**, Ending Place: CustomerLeaves และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




*รูปที่ 5.45 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย*

2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต ตามรูปที่ 5.46

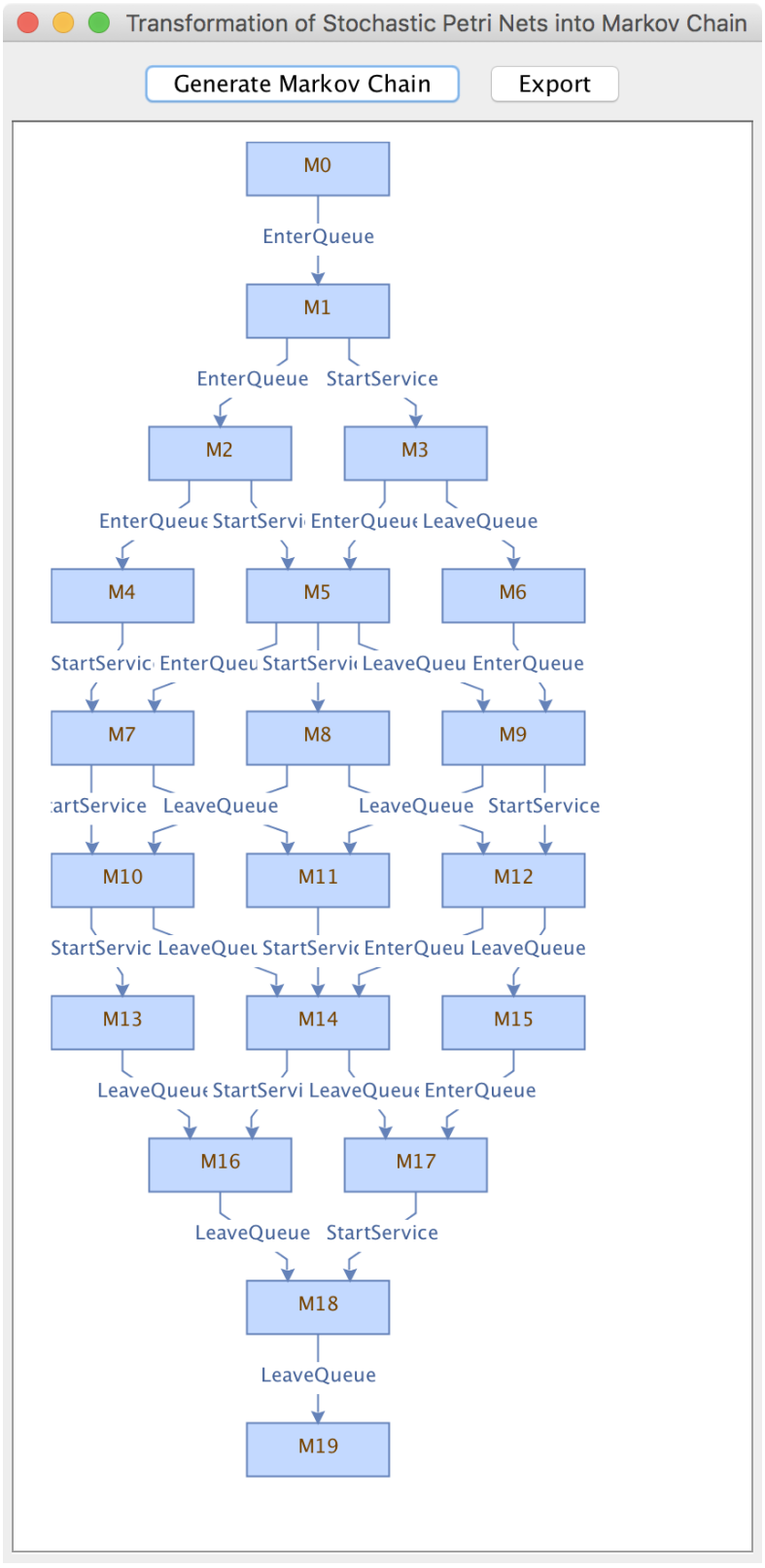
Transformation of Stochastic Petri Nets into Markov Chain

Generate Reachability Graph | Export

| Current Marking | Customer... | Customer... | ServiceFini... | CustomerL... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 0 | 0 | EnterQueue | M1 |
| M1 | (2) | 1 | 0 | 0 | StartService | M3 |
| | | | | | EnterQueue | M2 |
| M2 | 1 | (2) | 0 | 0 | StartService | M5 |
| | | | | | EnterQueue | M4 |
| M3 | (2) | 0 | 1 | 0 | EnterQueue | M5 |
| | | | | | LeaveQueue | M6 |
| M4 | 0 | (3) | 0 | 0 | StartService | M7 |
| M5 | 1 | (1) | 1 | 0 | StartService | M8 |
| | | | | | EnterQueue | M7 |
| | | | | | LeaveQueue | M9 |
| M6 | (2) | 0 | 0 | 1 | EnterQueue | M9 |
| M7 | 0 | (2) | 1 | 0 | LeaveQueue | M11 |
| | | | | | StartService | M10 |
| M8 | 1 | 0 | (2) | 0 | LeaveQueue | M12 |
| | | | | | EnterQueue | M10 |
| M9 | 1 | (1) | 0 | 1 | EnterQueue | M11 |
| | | | | | StartService | M12 |
| M10 | 0 | 1 | (2) | 0 | StartService | M13 |
| | | | | | LeaveQueue | M14 |
| M11 | 0 | (2) | 0 | 1 | StartService | M14 |
| M12 | 1 | 0 | (1) | 1 | LeaveQueue | M15 |
| | | | | | EnterQueue | M14 |
| M13 | 0 | 0 | (3) | 0 | LeaveQueue | M16 |
| M14 | 0 | 1 | (1) | 1 | StartService | M16 |
| | | | | | LeaveQueue | M17 |
| M15 | 1 | 0 | 0 | (2) | EnterQueue | M17 |
| M16 | 0 | 0 | (2) | 1 | LeaveQueue | M18 |
| M17 | 0 | 1 | 0 | (2) | StartService | M18 |
| M18 | 0 | 0 | 1 | (2) | LeaveQueue | M19 |
| M19 | 0 | 0 | 0 | (3) | | |

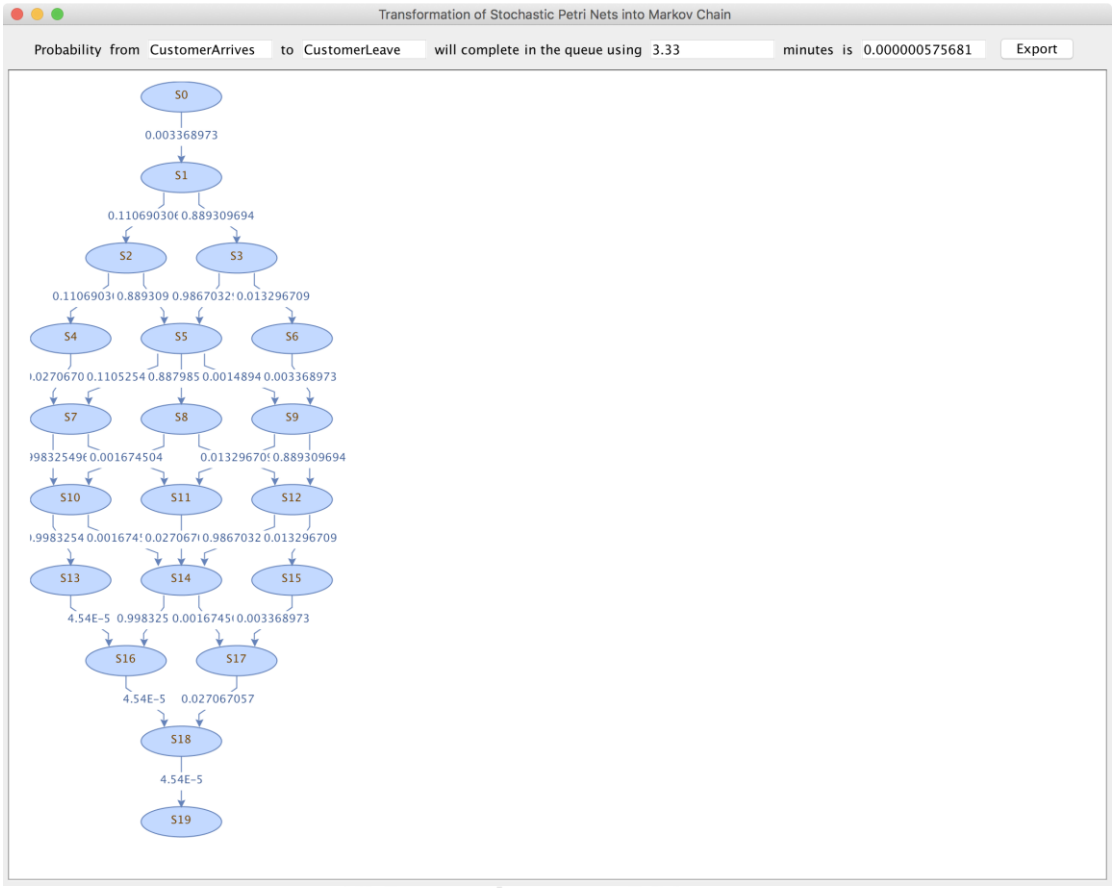
*รูปที่ 5.46 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย*

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ ตามรูปที่ 5.47




*รูปที่ 5.47 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย*

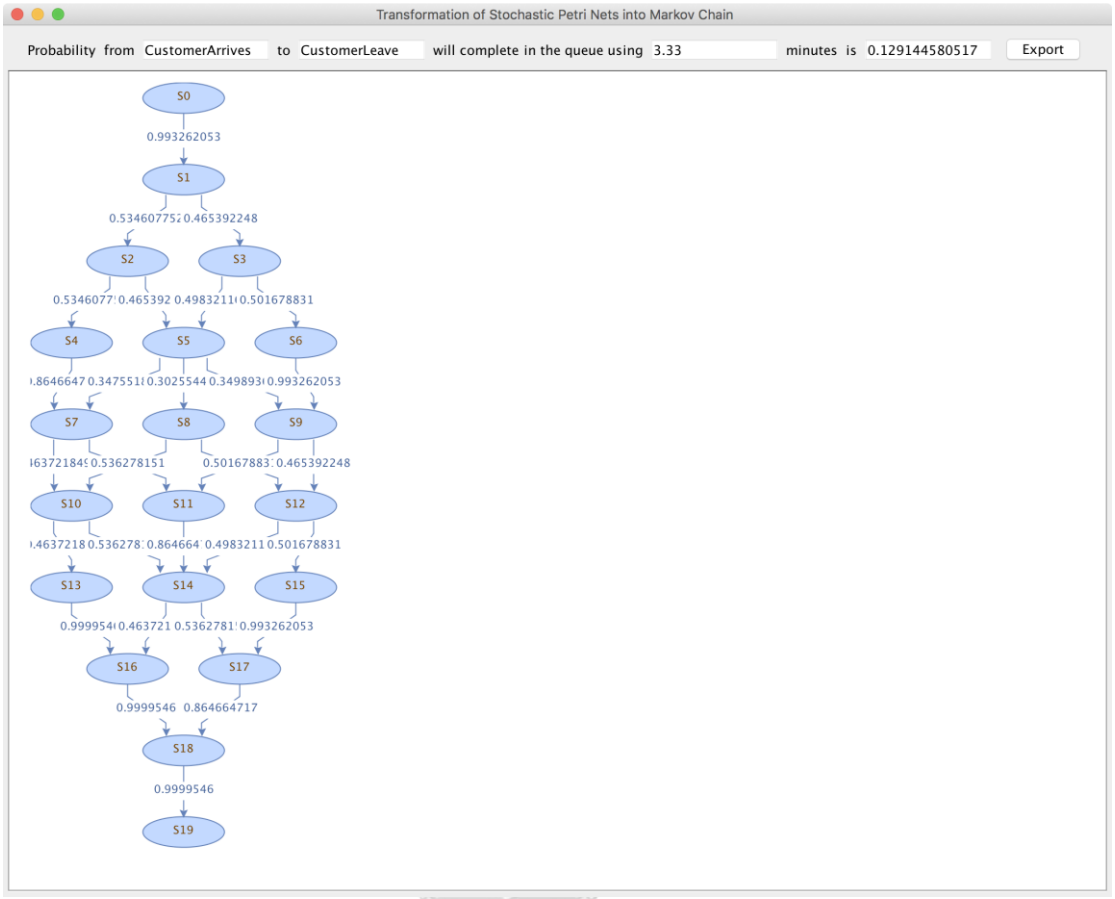
4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.48




*รูปที่ 5.48 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

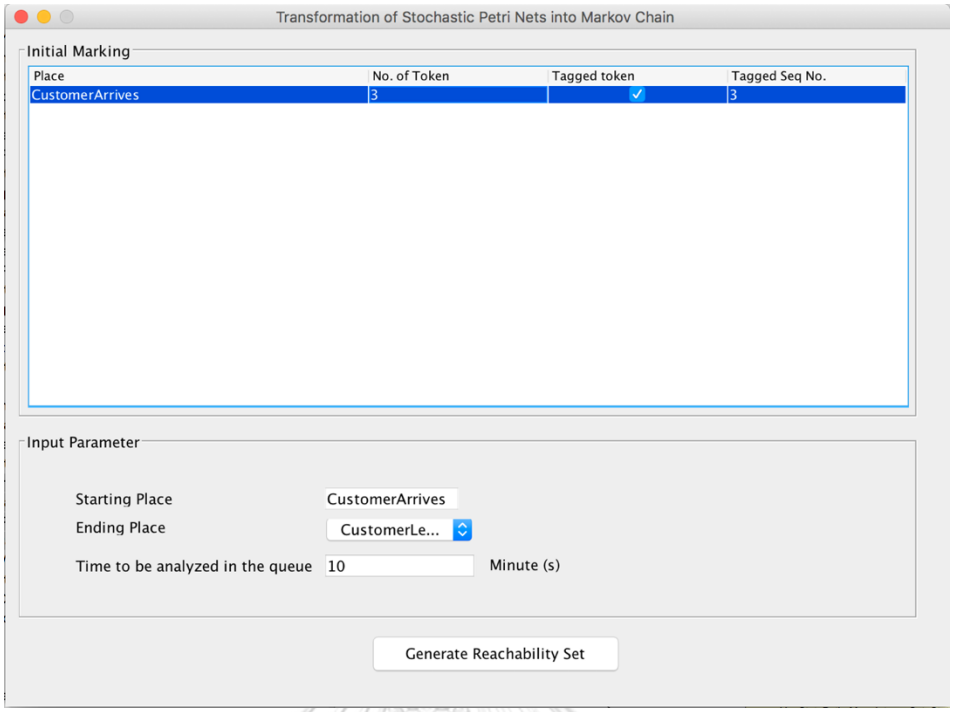
5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.49




*รูปที่ 5.49 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการเข้าแถวคอย*

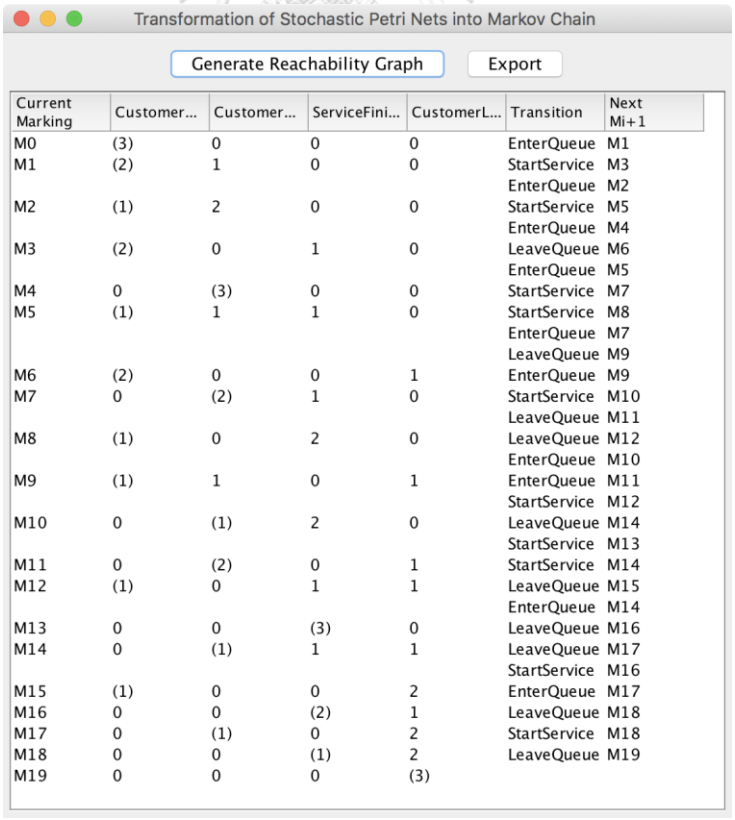
**การแท็กโทเค็นของการเข้าแถวคอยลำดับที่ 3**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: CustomerArrives, **Tagged Seq. No.: 3**, Ending Place: CustomerLeaves และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.50




*รูปที่ 5.50 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย*

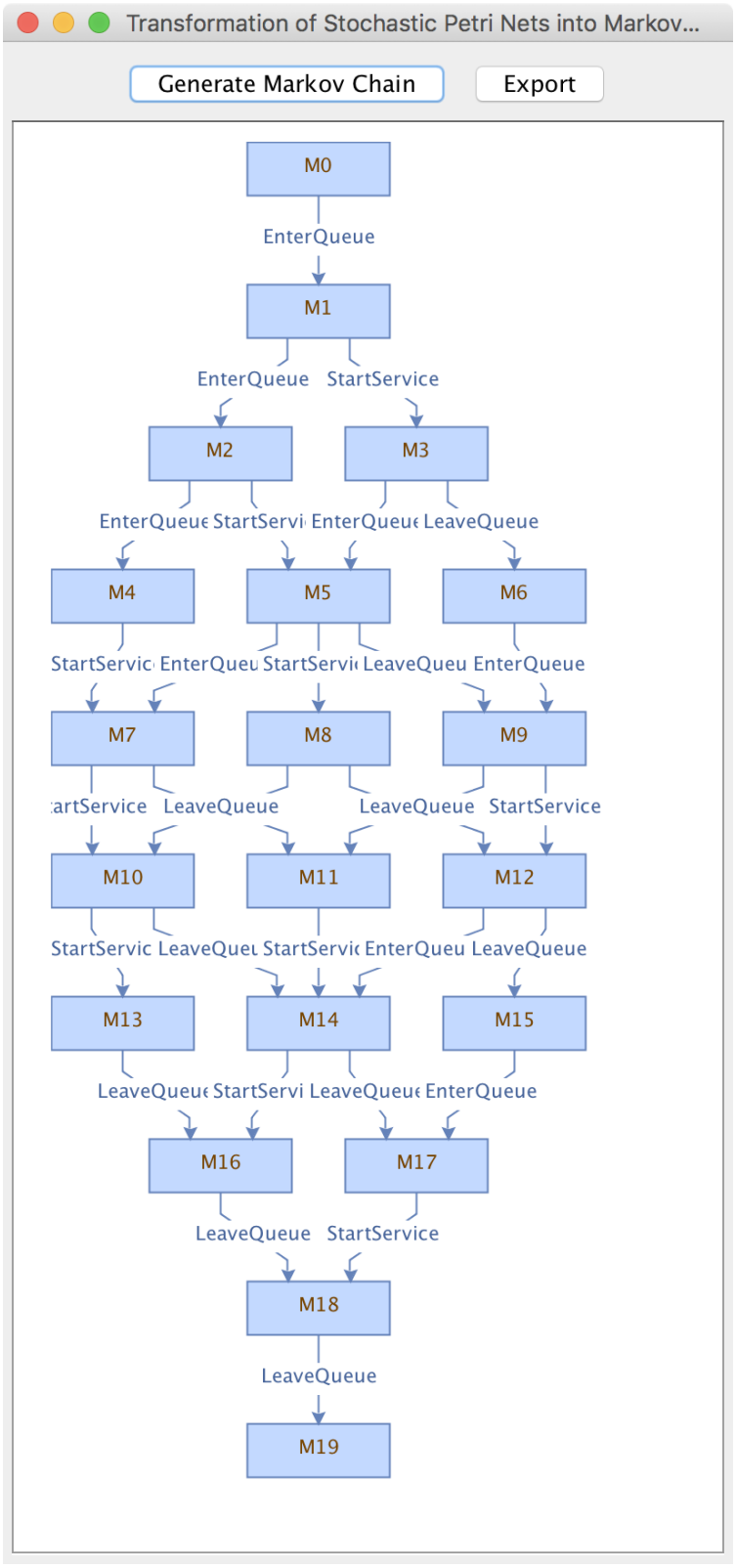
2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต ตามรูปที่ 5.51




| Current Marking | Customer... | Customer... | ServiceFini... | CustomerL... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 0 | 0 | EnterQueue | M1 |
| M1 | (2) | 1 | 0 | 0 | StartService | M3 |
| | | | | | EnterQueue | M2 |
| M2 | (1) | 2 | 0 | 0 | StartService | M5 |
| | | | | | EnterQueue | M4 |
| M3 | (2) | 0 | 1 | 0 | LeaveQueue | M6 |
| | | | | | EnterQueue | M5 |
| M4 | 0 | (3) | 0 | 0 | StartService | M7 |
| M5 | (1) | 1 | 1 | 0 | StartService | M8 |
| | | | | | EnterQueue | M7 |
| | | | | | LeaveQueue | M9 |
| M6 | (2) | 0 | 0 | 1 | EnterQueue | M9 |
| M7 | 0 | (2) | 1 | 0 | StartService | M10 |
| | | | | | LeaveQueue | M11 |
| M8 | (1) | 0 | 2 | 0 | LeaveQueue | M12 |
| | | | | | EnterQueue | M10 |
| M9 | (1) | 1 | 0 | 1 | EnterQueue | M11 |
| | | | | | StartService | M12 |
| M10 | 0 | (1) | 2 | 0 | LeaveQueue | M14 |
| | | | | | StartService | M13 |
| M11 | 0 | (2) | 0 | 1 | StartService | M14 |
| M12 | (1) | 0 | 1 | 1 | LeaveQueue | M15 |
| | | | | | EnterQueue | M14 |
| M13 | 0 | 0 | (3) | 0 | LeaveQueue | M16 |
| M14 | 0 | (1) | 1 | 1 | LeaveQueue | M17 |
| | | | | | StartService | M16 |
| M15 | (1) | 0 | 0 | 2 | EnterQueue | M17 |
| M16 | 0 | 0 | (2) | 1 | LeaveQueue | M18 |
| M17 | 0 | (1) | 0 | 2 | StartService | M18 |
| M18 | 0 | 0 | (1) | 2 | LeaveQueue | M19 |
| M19 | 0 | 0 | 0 | (3) | | |

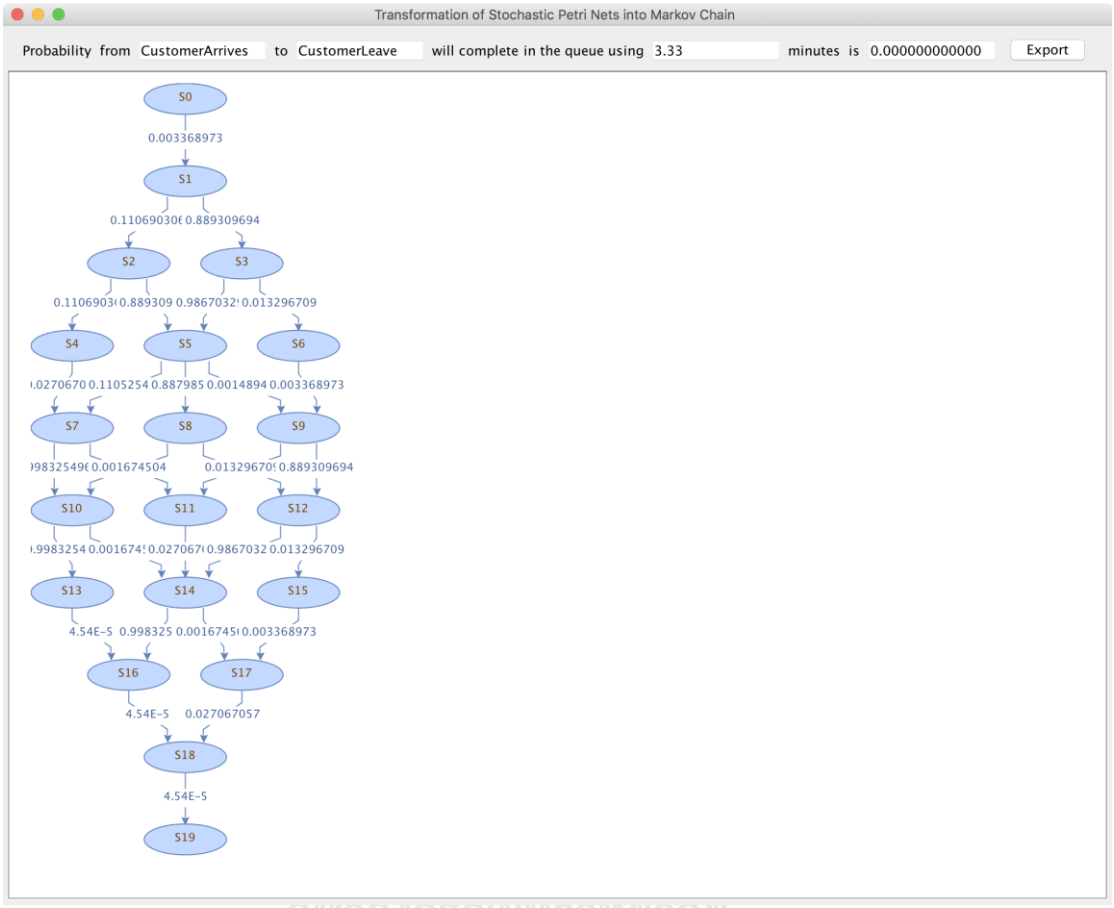
*รูปที่ 5.51 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย*

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ ตามรูปที่ 5.52




*รูปที่ 5.52 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย*

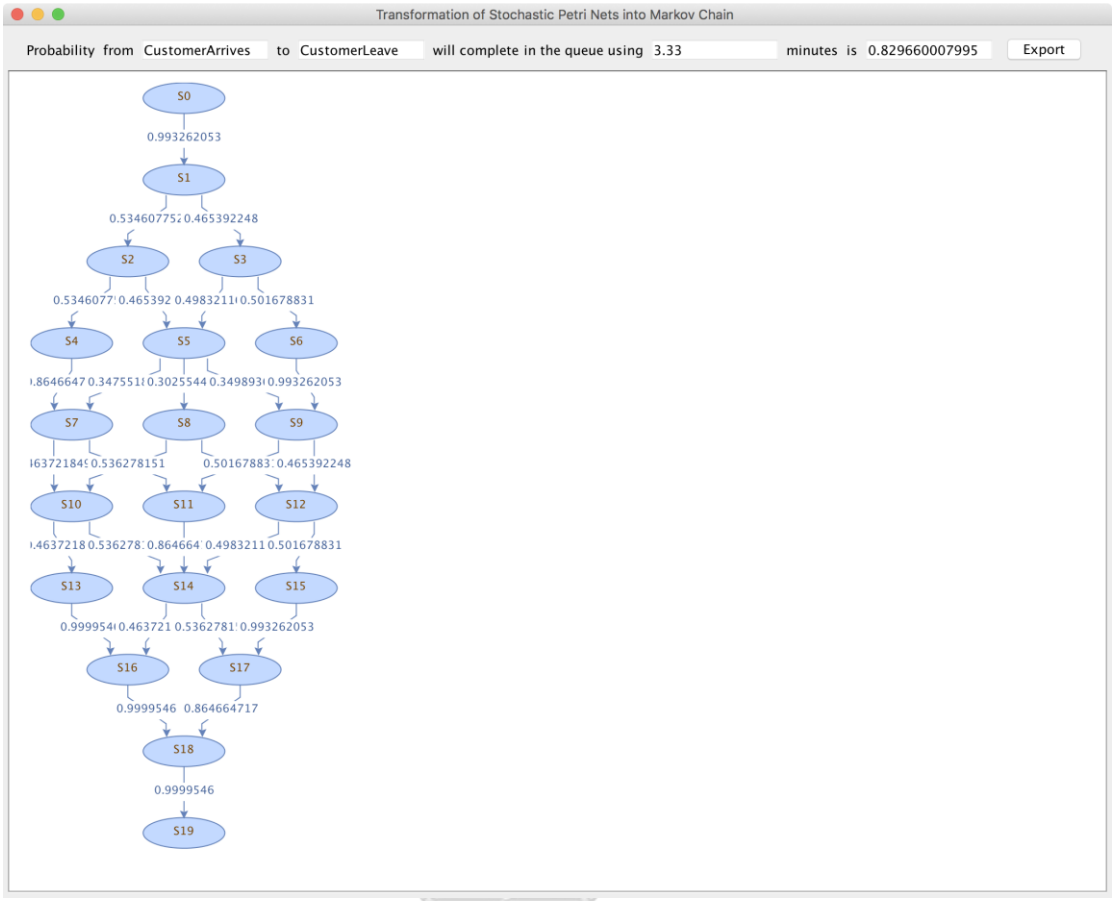
4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.53




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

*รูปที่ 5.53 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย*

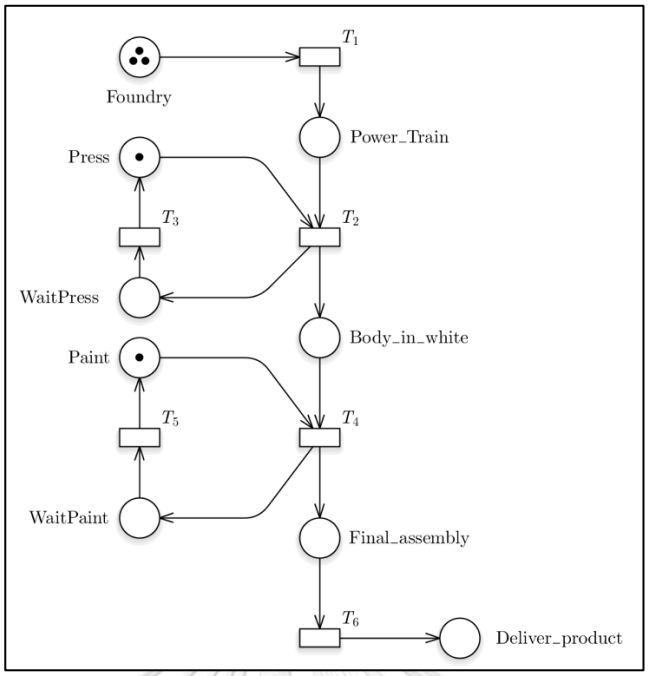
5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.54




*รูปที่ 5.54 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันการแจงแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการเข้าแถวคอย*

### 5.3.3 กรณีทดสอบของกรณีศึกษาการผลิตรถยนต์

โดยแผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการผลิตรถยนต์จะเริ่มจากการหลอมเหล็กหล่อชิ้นส่วนรถยนต์ (Foundry) แล้วตามด้วยการสร้างเครื่องยนต์และระบบขับเคลื่อน (Power Train) ซึ่งทำไปพร้อมๆกับการปั๊มชิ้นส่วนตัวถังและแซสซี (Press) เมื่อแล้วเสร็จก็จะดำเนินการประกอบโรงรถยนต์ (Body-In-White) และพ่นสีรถยนต์ (Paint) หลังจากนั้นประกอบรถยนต์ (Final Assembly) สุดท้ายก็ทำการส่งมอบรถยนต์ให้ลูกค้า (Deliver Product) ซึ่งรายละเอียดเป็นดังรูปที่ 5.55 การทดสอบเราจะเริ่มทำการทดสอบตามแนวทางที่ได้อธิบายไว้เบื้องต้นตามขั้นตอน ดังนี้




*รูปที่ 5.55 แผนภาพสโตแคสติกเพทริเน็ตของการผลิตรถยนต์*

หลังจากนั้นให้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

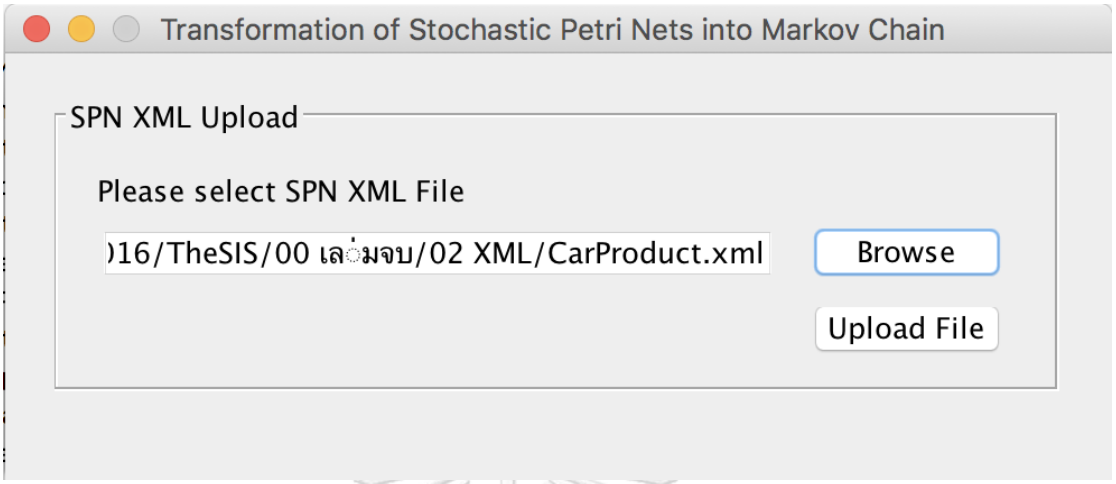
1) จัดเตรียมสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลของการผลิตรถยนต์ ตามรูปที่ 5.56

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="Foundry" name="Foundry" initialMarking="3" capacity="5" type="Product"/>
        <place id="PowerTrain" name="PowerTrain" initialMarking="0" capacity="5" type="Product"/>
        <place id="Press" name="Press" initialMarking="1" capacity="5" type="Press"/>
        <place id="WaitPress" name="WaitPress" initialMarking="0" capacity="5" type="Press"/>
        <place id="BodyInWhite" name="BodyInWhite" initialMarking="0" capacity="5" type="Product"/>
        <place id="Paint" name="Paint" initialMarking="1" capacity="5" type="Paint"/>
        <place id="WaitPaint" name="WaitPaint" initialMarking="0" capacity="5" type="Paint"/>
        <place id="FinalAssembly" name="FinalAssembly" initialMarking="0" capacity="5" type="Product"/>
        <place id="DeliverProduct" name="DeliverProduct" initialMarking="0" capacity="5" type="Product"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" mean="5"/>
        <transition id="T2" name="T2" type="timed" mean="10"/>
        <transition id="T3" name="T3" type="timed" mean="15"/>
        <transition id="T4" name="T4" type="timed" mean="20"/>
        <transition id="T5" name="T5" type="timed" mean="10"/>
        <transition id="T6" name="T6" type="timed" mean="15"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="T1 to PowerTrain" name="T1 to PowerTrain" source="T1" target="PowerTrain" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T2 to BodyInWhite" name="T2 to BodyInWhite" source="T2" target="BodyInWhite" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T2 to WaitPress" name="T2 to WaitPress" source="T2" target="WaitPress" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T3 to Press" name="T3 to Press" source="T3" target="Press" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T4 to WaitPaint" name="T4 to WaitPaint" source="T4" target="WaitPaint" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T4 to FinalAssembly" name="T4 to FinalAssembly" source="T4" target="FinalAssembly" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T5 to Paint" name="T5 to Paint" source="T5" target="Paint" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T6 to DeliverProduct" name="T6 to DeliverProduct" source="T6" target="DeliverProduct" type="normal" weight="1"/>

        <arc id="Foundry to T1" name="Foundry to T1" source="Foundry" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="WaitPress to T3" name="WaitPress to T3" source="WaitPress" target="T3" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="PowerTrain to T2" name="PowerTrain to T2" source="PowerTrain" target="T2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="Press to T2" name="Press to T2" source="Press" target="T2" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="BodyInWhite to T4" name="BodyInWhite to T4" source="BodyInWhite" target="T4" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="Paint to T4" name="Paint to T4" source="Paint" target="T4" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="WaitPaint to T5" name="WaitPaint to T5" source="WaitPaint" target="T5" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="FinalAssembly to T6" name="FinalAssembly to T6" source="FinalAssembly" target="T6" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

*รูปที่ 5.56 เอกซ์เอ็มแอลของการเข้าแถวคอยของการผลิตรถยนต์*

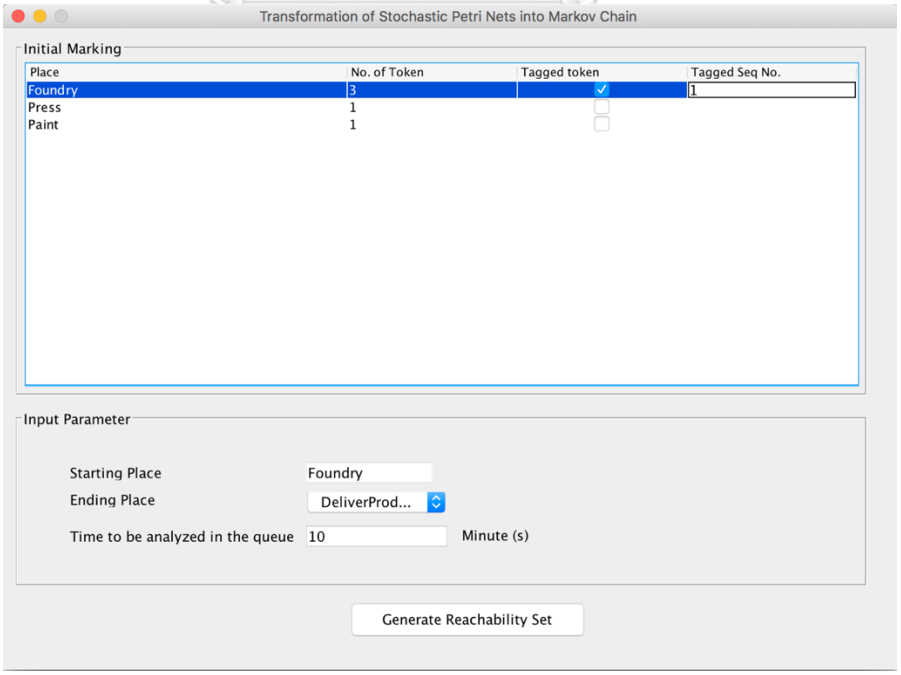
2) นำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอ็กซ์เอ็มแอลที่ได้เตรียมจากข้อ 1) จะได้ดังรูปที่ 5.57




*รูปที่ 5.57 การนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลของการผลิตรถยนต์*

**การแท็กโทเค็นของการผลิตรถยนต์ลำดับที่ 1**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: Foundry, **Tagged Seq. No.: 1**, Ending Place: DeliverProduct และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.58




*รูปที่ 5.58 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.59

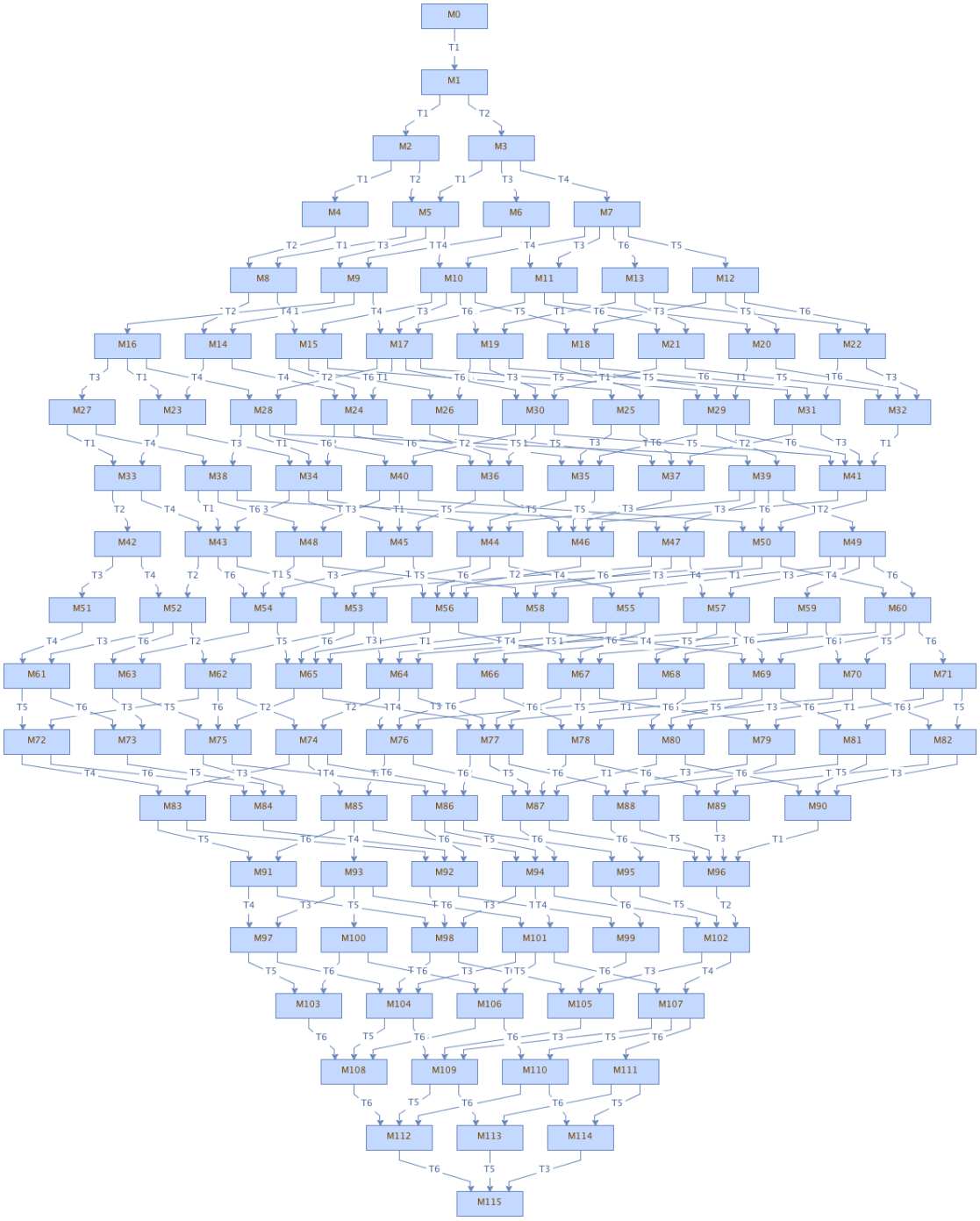
| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M1 |
| M1 | 2 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M2 |
| | | | | | | | | | | T2 | M3 |
| M2 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M5 |
| | | | | | | | | | | T1 | M4 |
| M3 | 2 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M7 |
| | | | | | | | | | | T3 | M6 |
| | | | | | | | | | | T1 | M5 |
| M4 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M8 |
| M5 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M9 |
| | | | | | | | | | | T1 | M8 |
| | | | | | | | | | | T4 | M10 |
| M6 | 2 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M9 |
| | | | | | | | | | | T4 | M11 |
| M7 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T3 | M11 |
| | | | | | | | | | | T1 | M10 |
| | | | | | | | | | | T6 | M13 |
| | | | | | | | | | | T5 | M12 |
| M8 | 0 | 2 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M15 |
| | | | | | | | | | | T3 | M14 |
| M9 | 1 | 1 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M16 |
| | | | | | | | | | | T4 | M17 |
| | | | | | | | | | | T1 | M14 |
| M10 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T1 | M15 |
| | | | | | | | | | | T6 | M19 |
| | | | | | | | | | | T5 | M18 |
| | | | | | | | | | | T3 | M17 |
| M11 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T6 | M21 |
| | | | | | | | | | | T1 | M17 |
| | | | | | | | | | | T5 | M20 |
| M12 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M22 |
| | | | | | | | | | | T3 | M20 |
| | | | | | | | | | | T1 | M18 |
| M13 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T1 | M19 |
| | | | | | | | | | | T3 | M21 |
| | | | | | | | | | | T5 | M22 |
| M14 | 0 | 2 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M23 |
| | | | | | | | | | | T4 | M24 |
| M15 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T5 | M25 |
| | | | | | | | | | | T6 | M26 |
| | | | | | | | | | | T3 | M24 |
| M16 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M27 |
| | | | | | | | | | | T1 | M23 |
| | | | | | | | | | | T4 | M28 |
| M17 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T2 | M28 |
| | | | | | | | | | | T6 | M30 |
| | | | | | | | | | | T1 | M24 |
| | | | | | | | | | | T5 | M29 |
| M18 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M31 |
| | | | | | | | | | | T1 | M25 |
| | | | | | | | | | | T3 | M29 |
| M19 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M31 |
| | | | | | | | | | | T3 | M30 |
| | | | | | | | | | | T1 | M26 |
| M20 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T1 | M29 |
| | | | | | | | | | | T6 | M32 |
| M21 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M32 |
| | | | | | | | | | | T1 | M30 |
| M22 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M31 |
| | | | | | | | | | | T3 | M32 |
| M23 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M34 |
| | | | | | | | | | | T3 | M33 |
| M24 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | T2 | M34 |
| | | | | | | | | | | T5 | M35 |
| | | | | | | | | | | T6 | M36 |
| M25 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T3 | M35 |
| | | | | | | | | | | T6 | M37 |
| M26 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T3 | M36 |
| | | | | | | | | | | T5 | M37 |
| M27 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M38 |
| | | | | | | | | | | T1 | M33 |
| M28 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | T3 | M38 |
| | | | | | | | | | | T6 | M40 |
| | | | | | | | | | | T5 | M39 |
| | | | | | | | | | | T1 | M34 |
| M29 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M41 |
| | | | | | | | | | | T1 | M35 |
| | | | | | | | | | | T2 | M39 |
| M30 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M41 |
| | | | | | | | | | | T1 | M36 |
| | | | | | | | | | | T2 | M40 |
| M31 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M37 |
| | | | | | | | | | | T3 | M41 |
| M32 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M41 |
| M33 | 0 | 1 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M42 |
| | | | | | | | | | | T4 | M43 |
| M34 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | T5 | M44 |
| | | | | | | | | | | T6 | M45 |
| | | | | | | | | | | T3 | M43 |
| M35 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | T2 | M44 |
| | | | | | | | | | | T6 | M46 |
| M36 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M45 |
| M37 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T3 | M46 |
| M38 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | T5 | M47 |
| | | | | | | | | | | T6 | M48 |
| | | | | | | | | | | T1 | M43 |
| M39 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | T3 | M47 |
| | | | | | | | | | | T1 | M44 |
| | | | | | | | | | | T4 | M49 |
| | | | | | | | | | | T6 | M50 |
| M40 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M50 |
| | | | | | | | | | | T1 | M45 |
| | | | | | | | | | | T3 | M48 |
| M41 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M50 |
| M42 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M51 |
| | | | | | | | | | | T4 | M52 |
| M43 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | T5 | M53 |
| | | | | | | | | | | T2 | M52 |
| | | | | | | | | | | T6 | M54 |
| M44 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M56 |
| | | | | | | | | | | T3 | M53 |
| | | | | | | | | | | T4 | M55 |
| M45 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M56 |
| | | | | | | | | | | T3 | M54 |
| M46 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (1) | T2 | M56 |
| M47 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M58 |
| | | | | | | | | | | T4 | M57 |
| | | | | | | | | | | T1 | M53 |
| M48 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | T1 | M54 |
| | | | | | | | | | | T5 | M58 |
| M49 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T3 | M57 |
| | | | | | | | | | | T5 | M59 |
| | | | | | | | | | | T6 | M60 |
| | | | | | | | | | | T1 | M55 |

*รูปที่ 5.59 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M50 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M56 |
| | | | | | | | | | | T3 | M58 |
| | | | | | | | | | | T4 | M60 |
| M51 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M61 |
| M52 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | (1) | 0 | T3 | M61 |
| | | | | | | | | | | T5 | M62 |
| | | | | | | | | | | T6 | M63 |
| M53 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | T6 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M64 |
| | | | | | | | | | | T2 | M62 |
| M54 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | T2 | M63 |
| | | | | | | | | | | T5 | M65 |
| M55 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T3 | M64 |
| | | | | | | | | | | T6 | M67 |
| | | | | | | | | | | T5 | M66 |
| M56 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | (1) | T3 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M67 |
| M57 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T1 | M64 |
| | | | | | | | | | | T6 | M69 |
| | | | | | | | | | | T5 | M68 |
| M58 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | (1) | T1 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M69 |
| M59 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T3 | M68 |
| | | | | | | | | | | T6 | M70 |
| | | | | | | | | | | T1 | M66 |
| M60 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | T3 | M69 |
| | | | | | | | | | | T5 | M70 |
| | | | | | | | | | | T1 | M67 |
| | | | | | | | | | | T6 | M71 |
| M61 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | (1) | 0 | T6 | M73 |
| | | | | | | | | | | T5 | M72 |
| M62 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | (1) | 0 | T3 | M72 |
| | | | | | | | | | | T6 | M75 |
| | | | | | | | | | | T4 | M74 |
| M63 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 0 | (1) | T3 | M73 |
| | | | | | | | | | | T5 | M75 |
| M64 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T6 | M77 |
| | | | | | | | | | | T5 | M76 |
| | | | | | | | | | | T2 | M74 |
| M65 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | (1) | T2 | M75 |
| | | | | | | | | | | T4 | M77 |
| M66 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T3 | M76 |
| | | | | | | | | | | T6 | M78 |
| M67 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | T3 | M77 |
| | | | | | | | | | | T6 | M79 |
| | | | | | | | | | | T5 | M78 |
| M68 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T6 | M80 |
| | | | | | | | | | | T1 | M76 |
| M69 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | T5 | M80 |
| | | | | | | | | | | T6 | M81 |
| | | | | | | | | | | T1 | M77 |
| M70 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | T6 | M82 |
| | | | | | | | | | | T3 | M80 |
| | | | | | | | | | | T1 | M78 |
| M71 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T1 | M79 |
| | | | | | | | | | | T3 | M81 |
| | | | | | | | | | | T5 | M82 |
| M72 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | (1) | 0 | T4 | M83 |
| | | | | | | | | | | T6 | M84 |
| M73 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | (1) | T5 | M84 |
| M74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (2) | 0 | T3 | M83 |
| | | | | | | | | | | T5 | M85 |
| | | | | | | | | | | T6 | M86 |
| M75 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | (1) | T4 | M86 |
| | | | | | | | | | | T3 | M84 |
| M76 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T2 | M85 |
| | | | | | | | | | | T6 | M87 |
| M77 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (1) | T2 | M86 |
| | | | | | | | | | | T5 | M87 |
| | | | | | | | | | | T6 | M88 |
| M78 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | T6 | M89 |
| | | | | | | | | | | T3 | M87 |
| M79 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M89 |
| | | | | | | | | | | T3 | M88 |
| M80 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | T1 | M87 |
| | | | | | | | | | | T6 | M90 |
| M81 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M90 |
| | | | | | | | | | | T1 | M88 |
| M82 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T3 | M90 |
| | | | | | | | | | | T1 | M89 |
| M83 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | 0 | T5 | M91 |
| | | | | | | | | | | T6 | M92 |
| M84 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | (1) | T4 | M92 |
| M85 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | (2) | 0 | T4 | M93 |
| | | | | | | | | | | T3 | M91 |
| | | | | | | | | | | T6 | M94 |
| M86 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | (1) | T6 | M95 |
| | | | | | | | | | | T3 | M92 |
| | | | | | | | | | | T5 | M94 |
| M87 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | T2 | M94 |
| | | | | | | | | | | T6 | M96 |
| M88 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M96 |
| | | | | | | | | | | T2 | M95 |
| M89 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T3 | M96 |
| M90 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T1 | M96 |
| M91 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | (2) | 0 | T6 | M98 |
| | | | | | | | | | | T4 | M97 |
| M92 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | (1) | T6 | M99 |
| | | | | | | | | | | T5 | M98 |
| M93 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T3 | M97 |
| | | | | | | | | | | T6 | M101 |
| | | | | | | | | | | T5 | M100 |
| M94 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | T6 | M102 |
| | | | | | | | | | | T4 | M101 |
| | | | | | | | | | | T3 | M98 |
| M95 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M102 |
| | | | | | | | | | | T3 | M99 |
| M96 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T2 | M102 |
| M97 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T5 | M103 |
| | | | | | | | | | | T6 | M104 |
| M98 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | T4 | M104 |
| | | | | | | | | | | T6 | M105 |
| M99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M105 |
| M100 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T6 | M106 |
| | | | | | | | | | | T3 | M103 |
| M101 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | (1) | T6 | M107 |
| | | | | | | | | | | T5 | M106 |
| | | | | | | | | | | T3 | M104 |
| M102 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | (2) | T3 | M105 |
| | | | | | | | | | | T4 | M107 |
| M103 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T6 | M108 |
| M104 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | (1) | T6 | M109 |
| | | | | | | | | | | T5 | M108 |
| M105 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | (2) | T4 | M109 |
| M106 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | (1) | T3 | M108 |
| | | | | | | | | | | T6 | M110 |
| M107 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | (2) | T5 | M110 |
| | | | | | | | | | | T6 | M111 |
| | | | | | | | | | | T3 | M109 |
| M108 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | (1) | T6 | M112 |
| M109 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (2) | T6 | M113 |
| | | | | | | | | | | T5 | M112 |
| M110 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | T3 | M112 |
| | | | | | | | | | | T6 | M114 |
| M111 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T3 | M113 |
| | | | | | | | | | | T5 | M114 |
| M112 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | T6 | M115 |
| M113 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T5 | M115 |
| M114 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | T3 | M115 |
| M115 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | | |

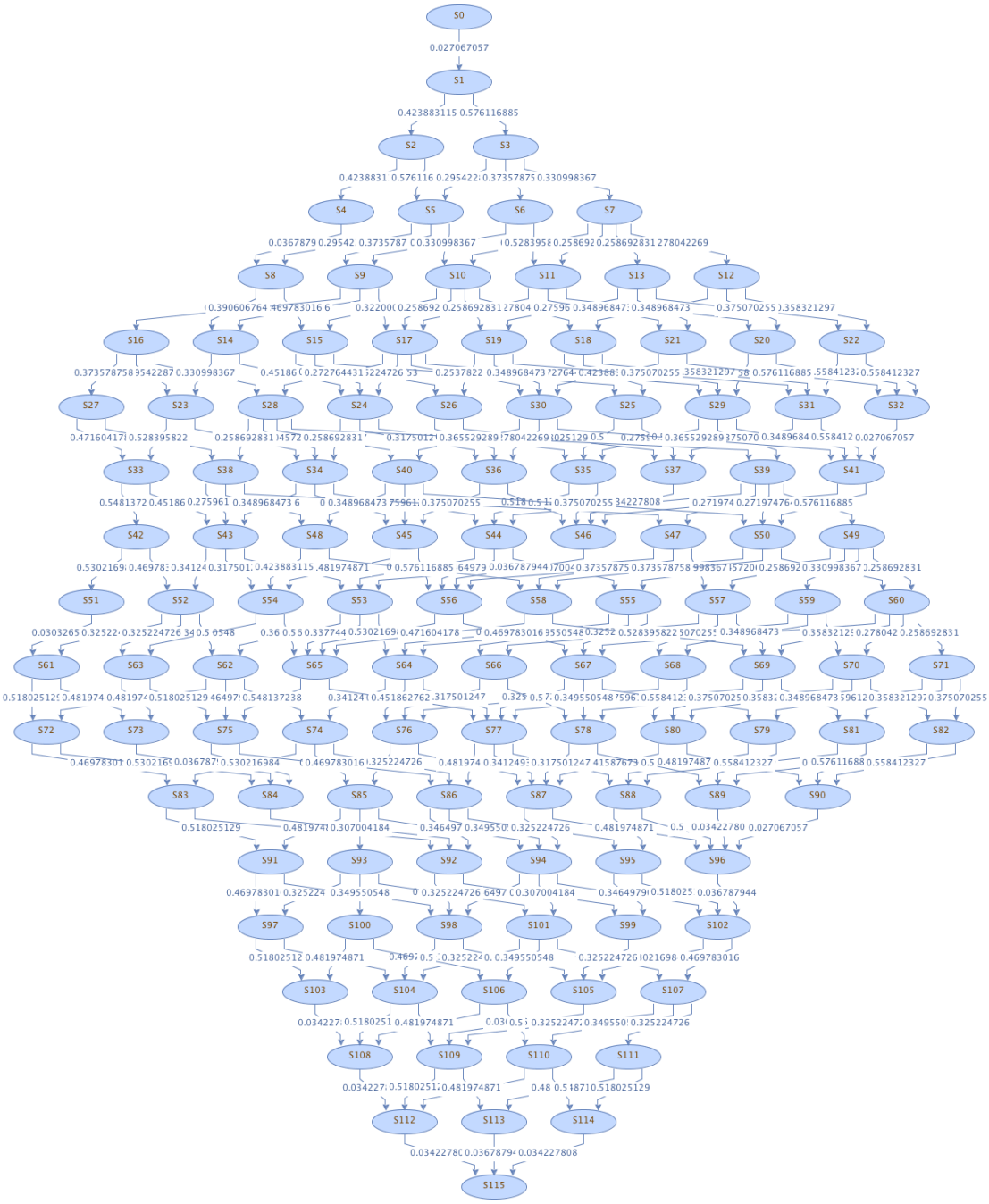
*รูปที่ 5.59 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์ (ต่อ)*

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.60

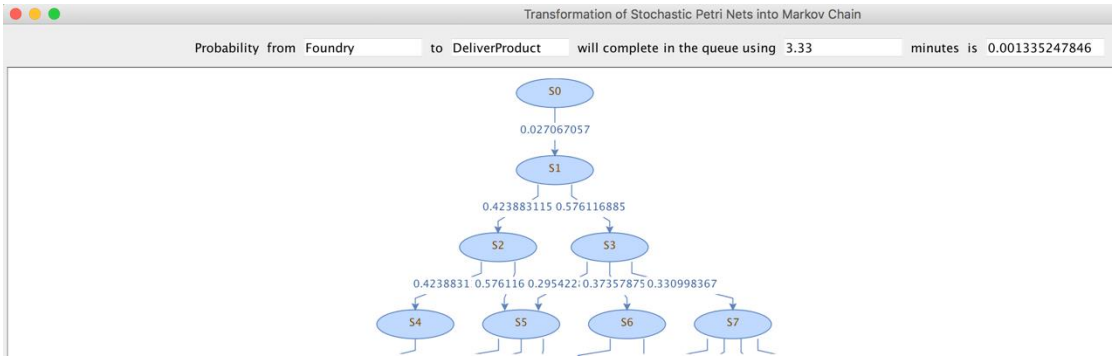



*รูปที่ 5.60 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.61 และ รูปที่ 5.62

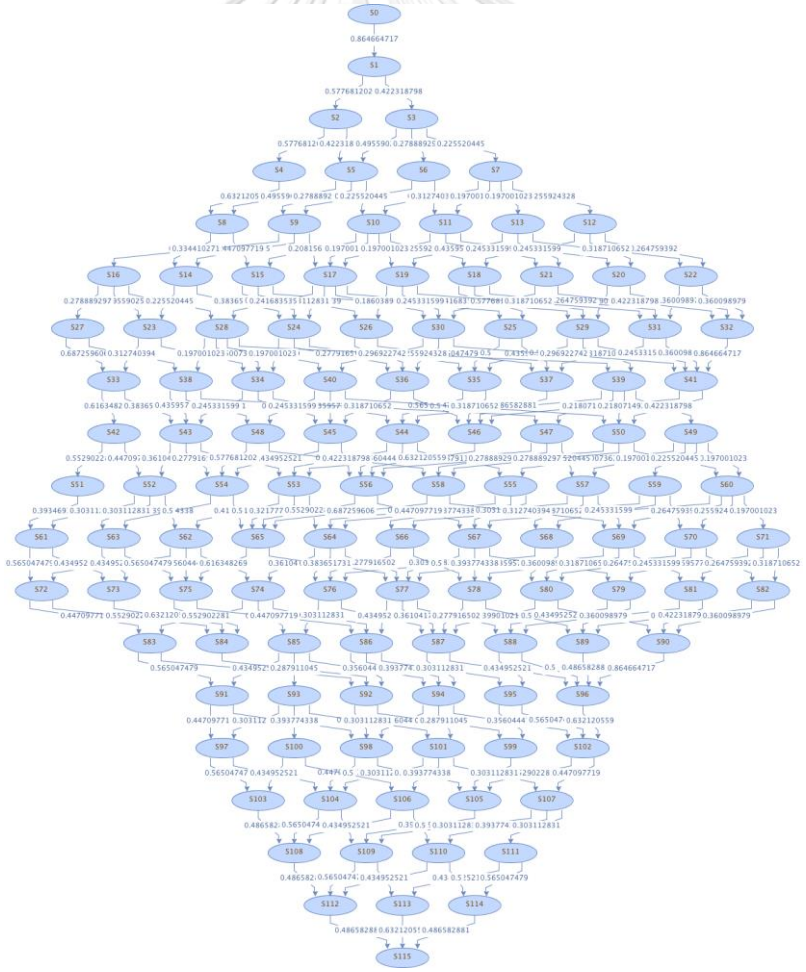



*รูปที่ 5.61 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

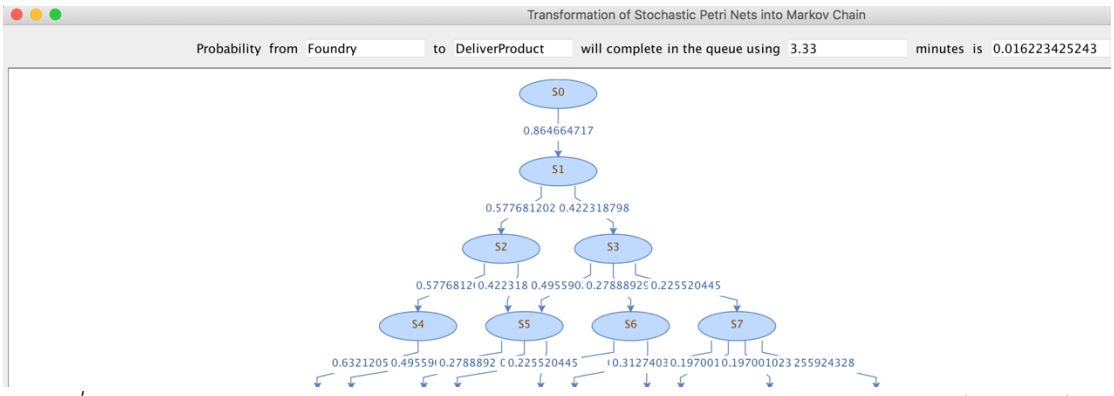



*รูปที่ 5.62 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.63 และ รูปที่ 5.64



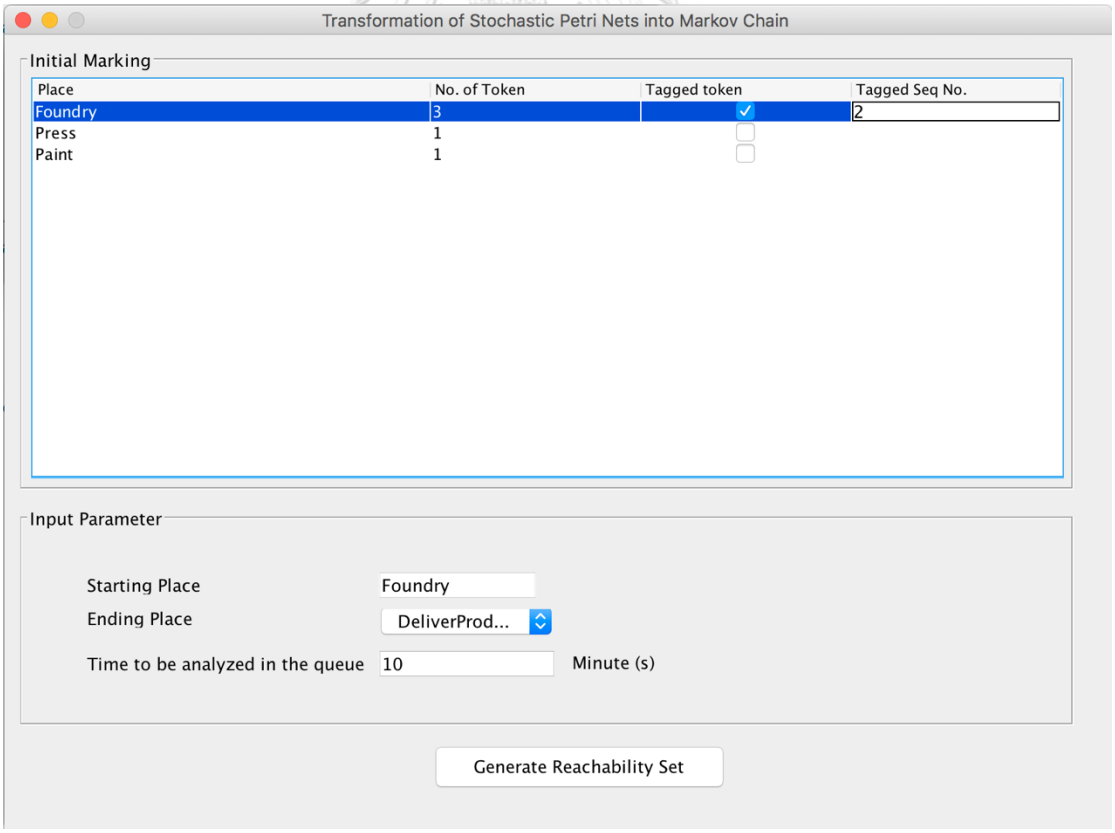
*รูปที่ 5.63 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*




*รูปที่ 5.64 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 1 ของการผลิตรถยนต์*

**การแท็กโทเค็นของการอ่านและเขียนไฟล์ลำดับที่ 2**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: Foundry, **Tagged Seq. No.: 2**, Ending Place: DeliverProduct และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.65




*รูปที่ 5.65 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.66

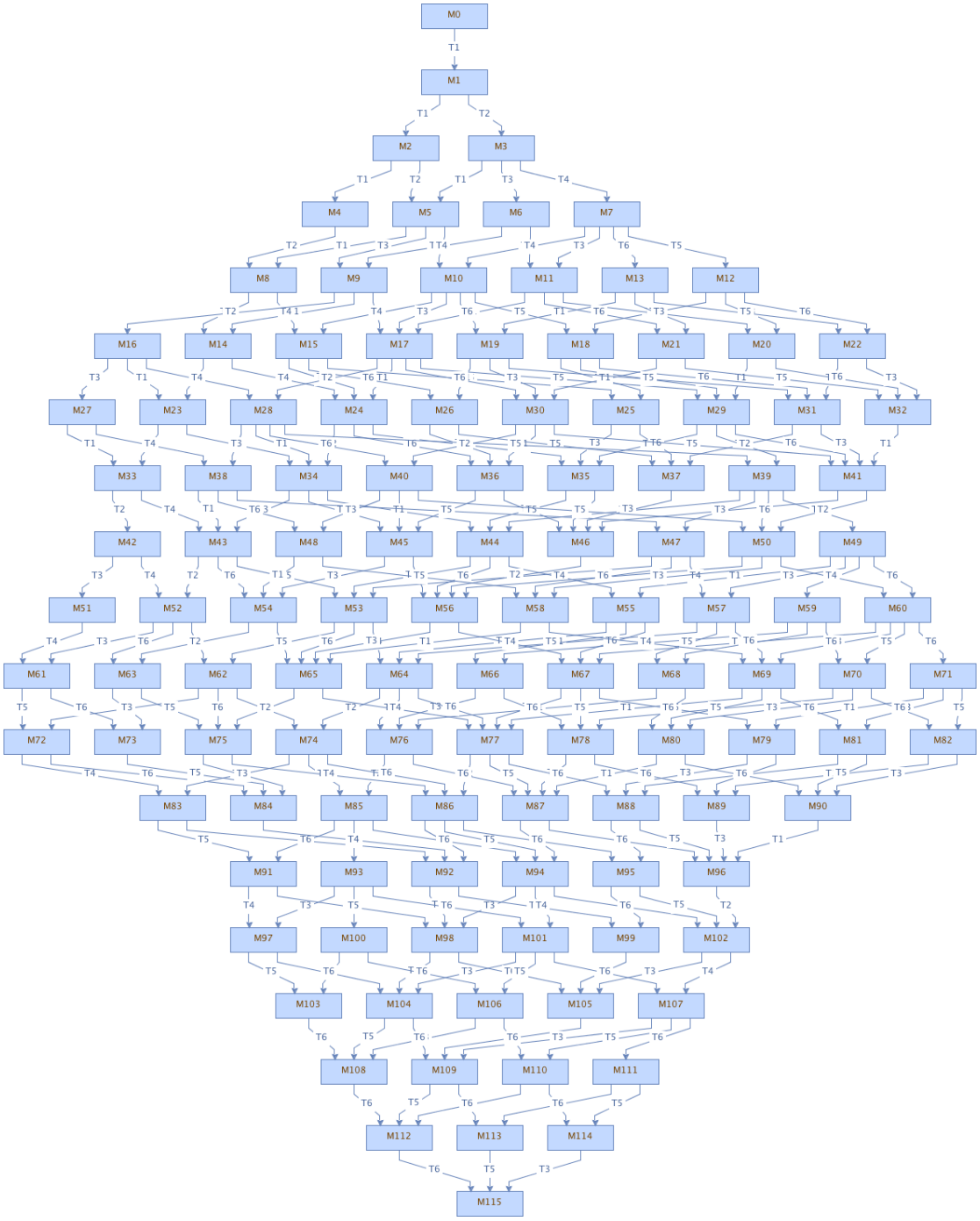
| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M1 |
| M1 | (2) | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M3 |
| | | | | | | | | | | T1 | M2 |
| M2 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M4 |
| | | | | | | | | | | T2 | M5 |
| M3 | (2) | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M6 |
| | | | | | | | | | | T4 | M7 |
| | | | | | | | | | | T1 | M5 |
| M4 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M8 |
| M5 | 1 | (1) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M10 |
| | | | | | | | | | | T1 | M8 |
| | | | | | | | | | | T3 | M9 |
| M6 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M11 |
| | | | | | | | | | | T1 | M9 |
| M7 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M12 |
| | | | | | | | | | | T3 | M11 |
| | | | | | | | | | | T1 | M10 |
| | | | | | | | | | | T6 | M13 |
| M8 | 0 | (2) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M14 |
| | | | | | | | | | | T4 | M15 |
| M9 | 1 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M17 |
| | | | | | | | | | | T1 | M14 |
| | | | | | | | | | | T2 | M16 |
| M10 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M18 |
| | | | | | | | | | | T6 | M19 |
| | | | | | | | | | | T1 | M15 |
| | | | | | | | | | | T3 | M17 |
| M11 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T6 | M21 |
| | | | | | | | | | | T5 | M20 |
| | | | | | | | | | | T1 | M17 |
| M12 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T3 | M20 |
| | | | | | | | | | | T6 | M22 |
| | | | | | | | | | | T1 | M18 |
| M13 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M22 |
| | | | | | | | | | | T1 | M19 |
| | | | | | | | | | | T3 | M21 |
| M14 | 0 | (2) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M23 |
| | | | | | | | | | | T4 | M24 |
| M15 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M25 |
| | | | | | | | | | | T3 | M24 |
| | | | | | | | | | | T6 | M26 |
| M16 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M27 |
| | | | | | | | | | | T1 | M23 |
| | | | | | | | | | | T4 | M28 |
| M17 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M29 |
| | | | | | | | | | | T1 | M24 |
| | | | | | | | | | | T2 | M28 |
| | | | | | | | | | | T6 | M30 |
| M18 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M31 |
| | | | | | | | | | | T1 | M25 |
| | | | | | | | | | | T3 | M29 |
| M19 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M31 |
| | | | | | | | | | | T1 | M26 |
| | | | | | | | | | | T3 | M30 |
| M20 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T1 | M29 |
| | | | | | | | | | | T6 | M32 |
| M21 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T1 | M30 |
| | | | | | | | | | | T5 | M32 |
| M22 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M31 |
| | | | | | | | | | | T3 | M32 |
| M23 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M33 |
| | | | | | | | | | | T4 | M34 |
| M24 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T6 | M36 |
| | | | | | | | | | | T5 | M35 |
| | | | | | | | | | | T2 | M34 |
| M25 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T3 | M35 |
| | | | | | | | | | | T6 | M37 |
| M26 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M37 |
| | | | | | | | | | | T3 | M36 |
| M27 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M33 |
| | | | | | | | | | | T4 | M38 |
| M28 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | T3 | M38 |
| | | | | | | | | | | T1 | M34 |
| | | | | | | | | | | T6 | M40 |
| | | | | | | | | | | T5 | M39 |
| M29 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T2 | M39 |
| | | | | | | | | | | T1 | M35 |
| | | | | | | | | | | T6 | M41 |
| M30 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T1 | M36 |
| | | | | | | | | | | T2 | M40 |
| | | | | | | | | | | T5 | M41 |
| M31 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M41 |
| | | | | | | | | | | T1 | M37 |
| M32 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M41 |
| M33 | 0 | 1 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M42 |
| | | | | | | | | | | T4 | M43 |
| M34 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M44 |
| | | | | | | | | | | T3 | M43 |
| | | | | | | | | | | T6 | M45 |
| M35 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T2 | M44 |
| | | | | | | | | | | T6 | M46 |
| M36 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M45 |
| M37 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M46 |
| M38 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M47 |
| | | | | | | | | | | T6 | M48 |
| | | | | | | | | | | T1 | M43 |
| M39 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | T4 | M49 |
| | | | | | | | | | | T3 | M47 |
| | | | | | | | | | | T1 | M44 |
| | | | | | | | | | | T6 | M50 |
| M40 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M48 |
| | | | | | | | | | | T1 | M45 |
| | | | | | | | | | | T5 | M50 |
| M41 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M50 |
| M42 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M51 |
| | | | | | | | | | | T4 | M52 |
| M43 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | T2 | M52 |
| | | | | | | | | | | T6 | M54 |
| | | | | | | | | | | T5 | M53 |
| M44 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M56 |
| | | | | | | | | | | T4 | M55 |
| | | | | | | | | | | T3 | M53 |
| M45 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M54 |
| | | | | | | | | | | T5 | M56 |
| M46 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T2 | M56 |
| M47 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | T1 | M53 |
| | | | | | | | | | | T4 | M57 |
| | | | | | | | | | | T6 | M58 |
| M48 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | T1 | M54 |
| | | | | | | | | | | T5 | M58 |
| M49 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T3 | M57 |
| | | | | | | | | | | T6 | M60 |
| | | | | | | | | | | T5 | M59 |
| | | | | | | | | | | T1 | M55 |
| M50 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M56 |
| | | | | | | | | | | T4 | M60 |
| | | | | | | | | | | T3 | M58 |

*รูปที่ 5.66 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M51 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M61 |
| M52 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 1 | 1 | 0 | T3 | M61 |
| | | | | | | | | | | T6 | M63 |
| | | | | | | | | | | T5 | M62 |
| M53 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | T2 | M62 |
| | | | | | | | | | | T6 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M64 |
| M54 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | T2 | M63 |
| | | | | | | | | | | T5 | M65 |
| M55 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T5 | M66 |
| | | | | | | | | | | T6 | M67 |
| | | | | | | | | | | T3 | M64 |
| M56 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M67 |
| | | | | | | | | | | T3 | M65 |
| M57 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T5 | M68 |
| | | | | | | | | | | T1 | M64 |
| | | | | | | | | | | T6 | M69 |
| M58 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M69 |
| | | | | | | | | | | T1 | M65 |
| M59 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T3 | M68 |
| | | | | | | | | | | T1 | M66 |
| | | | | | | | | | | T6 | M70 |
| M60 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | T6 | M71 |
| | | | | | | | | | | T1 | M67 |
| | | | | | | | | | | T3 | M69 |
| | | | | | | | | | | T5 | M70 |
| M61 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M72 |
| | | | | | | | | | | T6 | M73 |
| M62 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 1 | 0 | T4 | M74 |
| | | | | | | | | | | T3 | M72 |
| | | | | | | | | | | T6 | M75 |
| M63 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M75 |
| | | | | | | | | | | T3 | M73 |
| M64 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | T2 | M74 |
| | | | | | | | | | | T6 | M77 |
| | | | | | | | | | | T5 | M76 |
| M65 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | T2 | M75 |
| | | | | | | | | | | T4 | M77 |
| M66 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T6 | M78 |
| | | | | | | | | | | T3 | M76 |
| M67 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | T3 | M77 |
| | | | | | | | | | | T6 | M79 |
| | | | | | | | | | | T5 | M78 |
| M68 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T1 | M76 |
| | | | | | | | | | | T6 | M80 |
| M69 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | T1 | M77 |
| | | | | | | | | | | T5 | M80 |
| | | | | | | | | | | T6 | M81 |
| M70 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | T3 | M80 |
| | | | | | | | | | | T1 | M78 |
| | | | | | | | | | | T6 | M82 |
| M71 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M82 |
| | | | | | | | | | | T1 | M79 |
| | | | | | | | | | | T3 | M81 |
| M72 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 1 | 0 | T4 | M83 |
| | | | | | | | | | | T6 | M84 |
| M73 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M84 |
| M74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (2) | 0 | T3 | M83 |
| | | | | | | | | | | T5 | M85 |
| | | | | | | | | | | T6 | M86 |
| M75 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M84 |
| | | | | | | | | | | T4 | M86 |
| M76 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | T6 | M87 |
| | | | | | | | | | | T2 | M85 |
| M77 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | T5 | M87 |
| | | | | | | | | | | T6 | M88 |
| | | | | | | | | | | T2 | M86 |
| M78 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | T3 | M87 |
| | | | | | | | | | | T6 | M89 |
| M79 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T3 | M88 |
| | | | | | | | | | | T5 | M89 |
| M80 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | T1 | M87 |
| | | | | | | | | | | T6 | M90 |
| M81 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M90 |
| | | | | | | | | | | T1 | M88 |
| M82 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T3 | M90 |
| | | | | | | | | | | T1 | M89 |
| M83 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | 0 | T5 | M91 |
| | | | | | | | | | | T6 | M92 |
| M84 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M92 |
| M85 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | (2) | 0 | T4 | M93 |
| | | | | | | | | | | T6 | M94 |
| | | | | | | | | | | T3 | M91 |
| M86 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | (1) | 1 | T6 | M95 |
| | | | | | | | | | | T5 | M94 |
| | | | | | | | | | | T3 | M92 |
| M87 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | T2 | M94 |
| | | | | | | | | | | T6 | M96 |
| M88 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M96 |
| | | | | | | | | | | T2 | M95 |
| M89 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T3 | M96 |
| M90 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T1 | M96 |
| M91 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | (2) | 0 | T4 | M97 |
| | | | | | | | | | | T6 | M98 |
| M92 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (1) | 1 | T5 | M98 |
| | | | | | | | | | | T6 | M99 |
| M93 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T5 | M100 |
| | | | | | | | | | | T6 | M101 |
| | | | | | | | | | | T3 | M97 |
| M94 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | (1) | 1 | T3 | M98 |
| | | | | | | | | | | T4 | M101 |
| | | | | | | | | | | T6 | M102 |
| M95 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M102 |
| | | | | | | | | | | T3 | M99 |
| M96 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (2) | T2 | M102 |
| M97 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T5 | M103 |
| | | | | | | | | | | T6 | M104 |
| M98 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | (1) | 1 | T6 | M105 |
| | | | | | | | | | | T4 | M104 |
| M99 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | T5 | M105 |
| M100 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T6 | M106 |
| | | | | | | | | | | T3 | M103 |
| M101 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | T6 | M107 |
| | | | | | | | | | | T5 | M106 |
| | | | | | | | | | | T3 | M104 |
| M102 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | (2) | T4 | M107 |
| | | | | | | | | | | T3 | M105 |
| M103 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T6 | M108 |
| M104 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | T5 | M108 |
| | | | | | | | | | | T6 | M109 |
| M105 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | (2) | T4 | M109 |
| M106 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | T3 | M108 |
| | | | | | | | | | | T6 | M110 |
| M107 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | (2) | T6 | M111 |
| | | | | | | | | | | T3 | M109 |
| | | | | | | | | | | T5 | M110 |
| M108 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | T6 | M112 |
| M109 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | (2) | T5 | M112 |
| | | | | | | | | | | T6 | M113 |
| M110 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | T3 | M112 |
| | | | | | | | | | | T6 | M114 |
| M111 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T3 | M113 |
| | | | | | | | | | | T5 | M114 |
| M112 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | (2) | T6 | M115 |
| M113 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T5 | M115 |
| M114 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | T3 | M115 |
| M115 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | | |

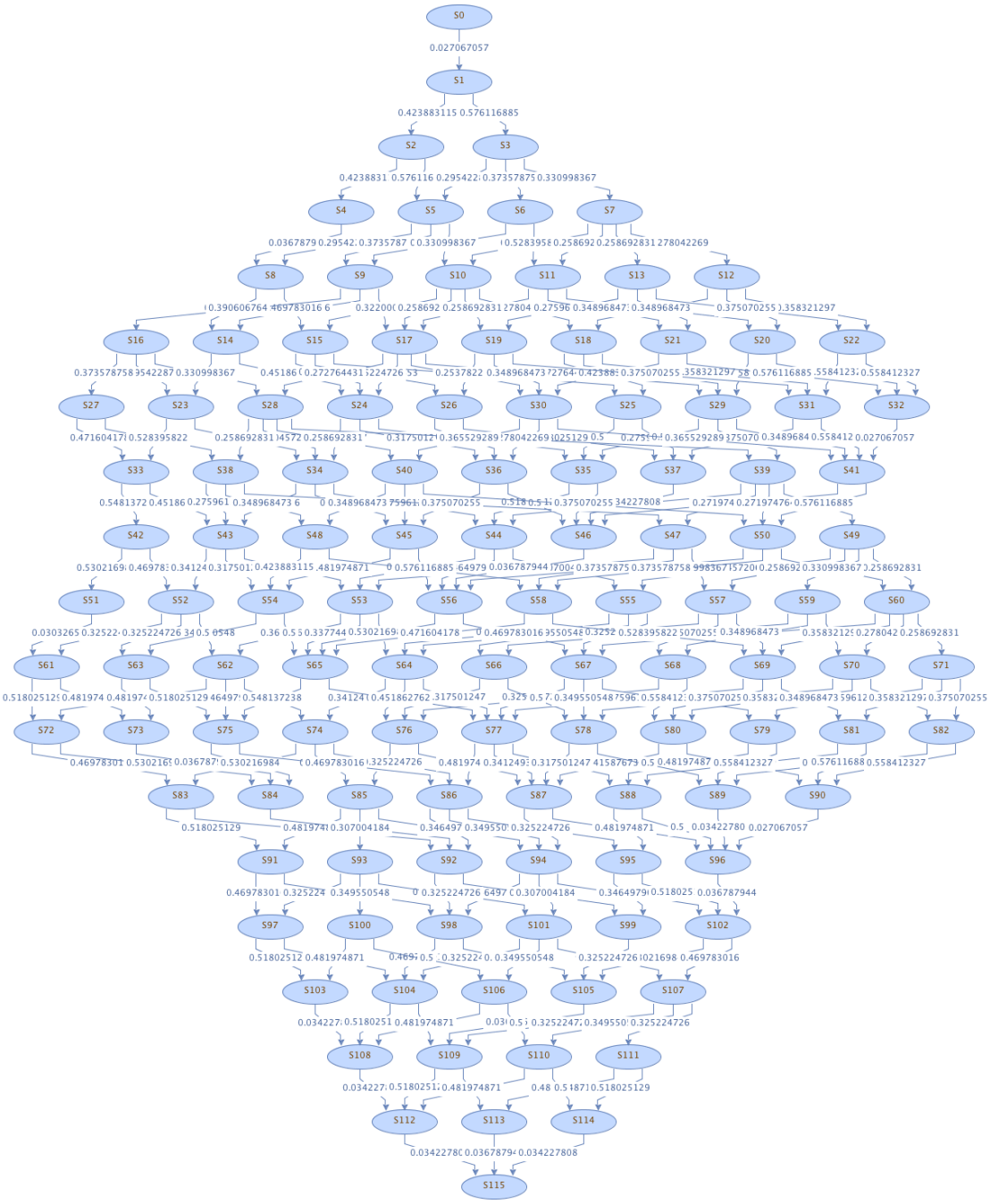
รูปที่ 5.66 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์ (ต่อ)

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.67

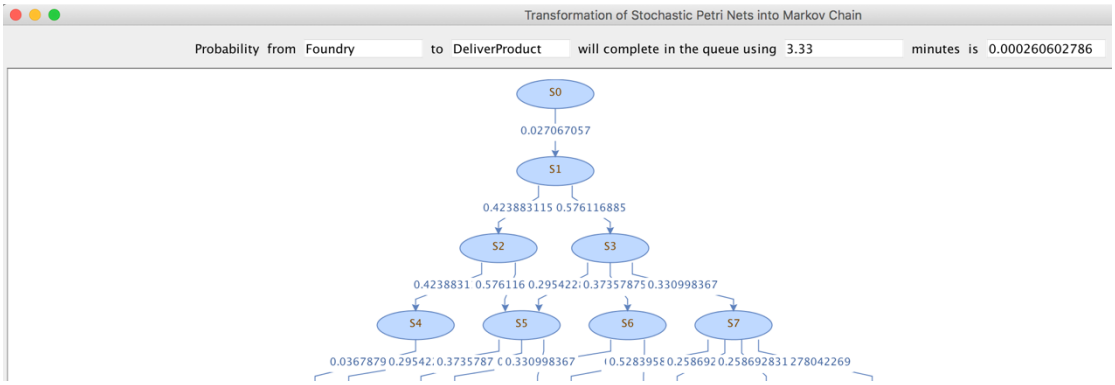



*รูปที่ 5.67 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟตามรูปที่ 5.68 เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใดตามรูปที่ 5.69

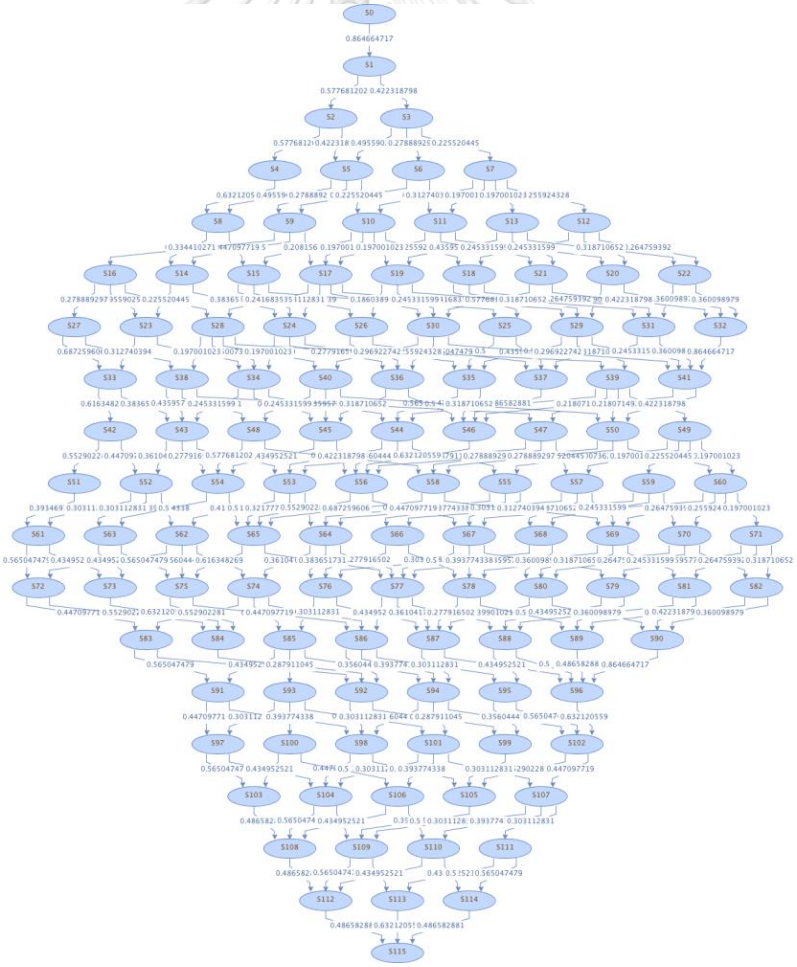



*รูปที่ 5.68 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

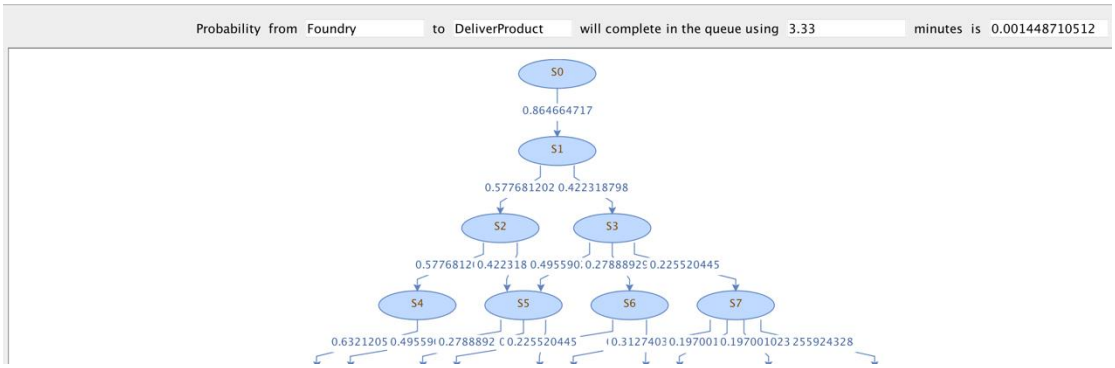



*รูปที่ 5.69 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟตามรูปที่ 5.70 เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นที่จุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใดตามรูปที่ 5.71



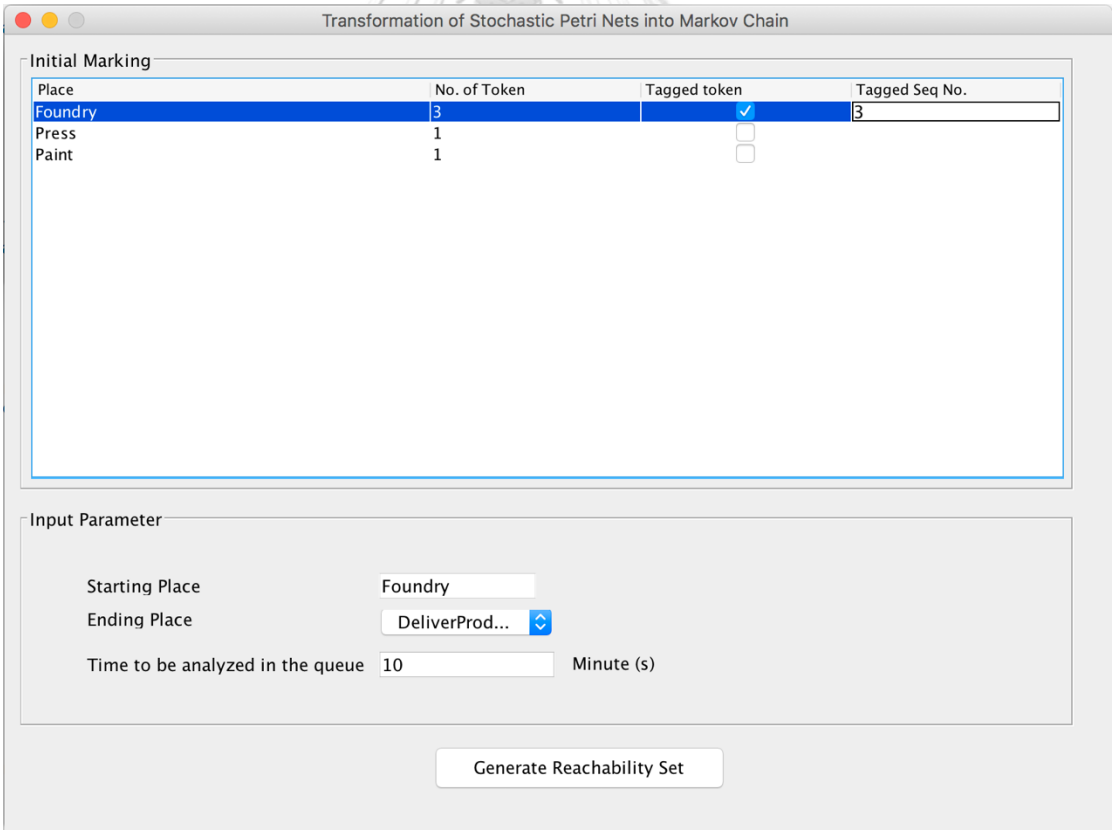
*รูปที่ 5.70 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*




*รูปที่ 5.71 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 2 ของการผลิตรถยนต์*

**การแท็กโทเค็นของการอ่านและเขียนไฟล์ลำดับที่ 3**

1) ใส่พารามิเตอร์ (Tagged Token: Foundry, **Tagged Seq. No.: 3**, Ending Place: DeliverProduct และ Time to be analyzed in the queue: 10 minutes) ซึ่งจำเป็นต่อการสร้างริชอะบิลิตี้เซต, ริชอะบิลิตี้กราฟ, ห่วงโซ่มาร์คอฟและวิเคราะห์ความน่าจะเป็น ตามรูปที่ 5.72




*รูปที่ 5.72 ระบุพารามิเตอร์แท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

2) สร้างริชอะบิลิตี้เซต จะได้ตามรูปที่ 5.73

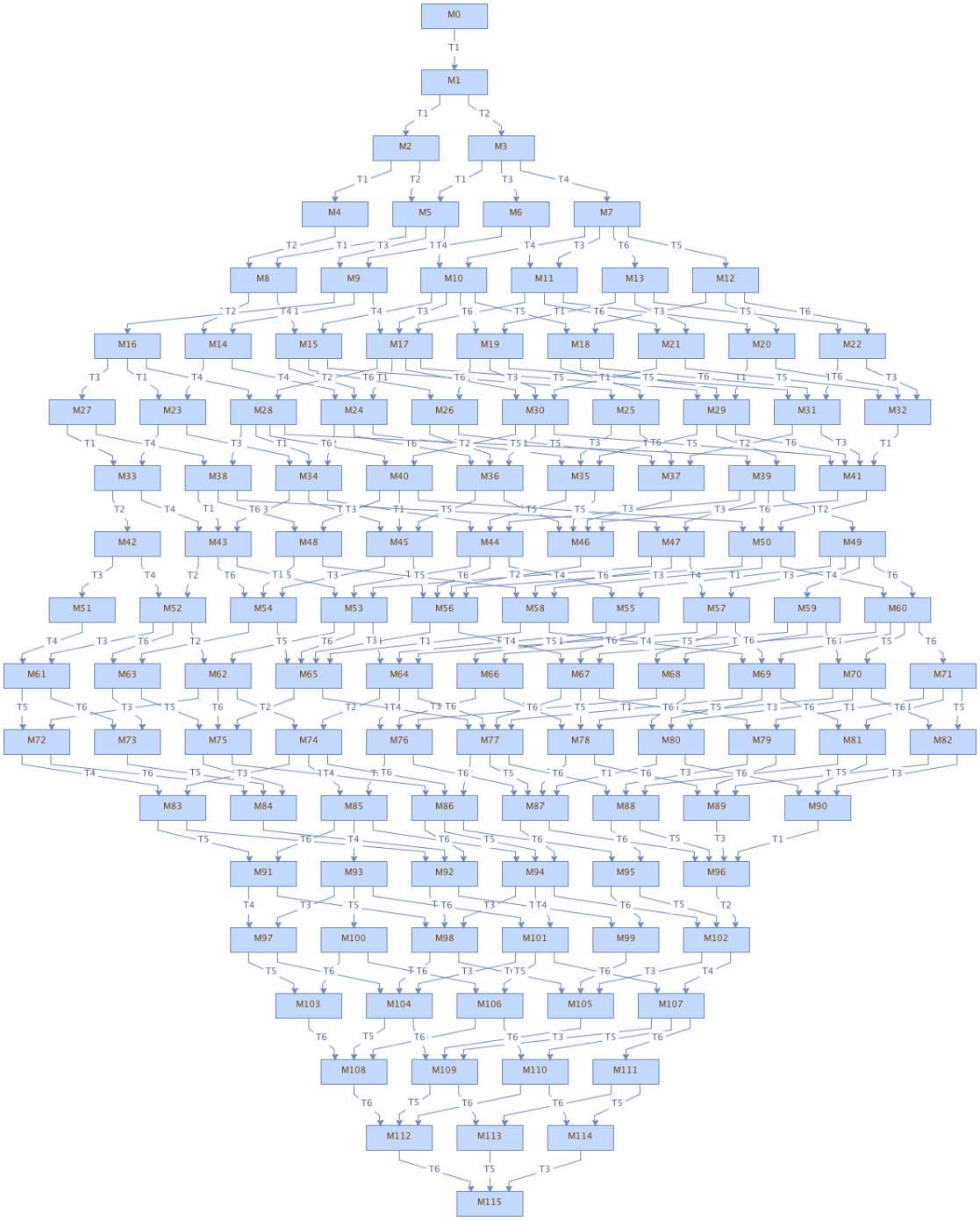
| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M0 | (3) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M1 |
| M1 | (2) | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M3 |
| | | | | | | | | | | T1 | M2 |
| M2 | (1) | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M5 |
| | | | | | | | | | | T1 | M4 |
| M3 | (2) | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M7 |
| | | | | | | | | | | T1 | M5 |
| | | | | | | | | | | T3 | M6 |
| M4 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M8 |
| M5 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M9 |
| | | | | | | | | | | T1 | M8 |
| | | | | | | | | | | T4 | M10 |
| M6 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M9 |
| | | | | | | | | | | T4 | M11 |
| M7 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T1 | M10 |
| | | | | | | | | | | T5 | M12 |
| | | | | | | | | | | T3 | M11 |
| | | | | | | | | | | T6 | M13 |
| M8 | 0 | (2) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M15 |
| | | | | | | | | | | T3 | M14 |
| M9 | (1) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M16 |
| | | | | | | | | | | T1 | M14 |
| | | | | | | | | | | T4 | M17 |
| M10 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T1 | M15 |
| | | | | | | | | | | T5 | M18 |
| | | | | | | | | | | T3 | M17 |
| | | | | | | | | | | T6 | M19 |
| M11 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M20 |
| | | | | | | | | | | T1 | M17 |
| | | | | | | | | | | T6 | M21 |
| M12 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M22 |
| | | | | | | | | | | T1 | M18 |
| | | | | | | | | | | T3 | M20 |
| M13 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T1 | M19 |
| | | | | | | | | | | T3 | M21 |
| | | | | | | | | | | T5 | M22 |
| M14 | 0 | (2) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M24 |
| | | | | | | | | | | T2 | M23 |
| M15 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T3 | M24 |
| | | | | | | | | | | T6 | M26 |
| | | | | | | | | | | T5 | M25 |
| M16 | (1) | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | T1 | M23 |
| | | | | | | | | | | T3 | M27 |
| | | | | | | | | | | T4 | M28 |
| M17 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T1 | M24 |
| | | | | | | | | | | T5 | M29 |
| | | | | | | | | | | T6 | M30 |
| | | | | | | | | | | T2 | M28 |
| M18 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T3 | M29 |
| | | | | | | | | | | T1 | M25 |
| | | | | | | | | | | T6 | M31 |
| M19 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M30 |
| | | | | | | | | | | T5 | M31 |
| | | | | | | | | | | T1 | M26 |
| M20 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T1 | M29 |
| | | | | | | | | | | T6 | M32 |
| M21 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T1 | M30 |
| | | | | | | | | | | T5 | M32 |
| M22 | (2) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M31 |
| | | | | | | | | | | T3 | M32 |
| M23 | 0 | (1) | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M34 |
| | | | | | | | | | | T3 | M33 |
| M24 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M35 |
| | | | | | | | | | | T2 | M34 |
| | | | | | | | | | | T6 | M36 |
| M25 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M37 |
| | | | | | | | | | | T3 | M35 |
| M26 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M36 |
| | | | | | | | | | | T5 | M37 |
| M27 | (1) | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M38 |
| | | | | | | | | | | T1 | M33 |
| M28 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | T1 | M34 |
| | | | | | | | | | | T5 | M39 |
| | | | | | | | | | | T6 | M40 |
| | | | | | | | | | | T3 | M38 |
| M29 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T1 | M35 |
| | | | | | | | | | | T6 | M41 |
| | | | | | | | | | | T2 | M39 |
| M30 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M41 |
| | | | | | | | | | | T2 | M40 |
| | | | | | | | | | | T1 | M36 |
| M31 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M37 |
| | | | | | | | | | | T3 | M41 |
| M32 | (2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M41 |
| M33 | 0 | (1) | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | T2 | M42 |
| | | | | | | | | | | T4 | M43 |
| M34 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M44 |
| | | | | | | | | | | T3 | M43 |
| | | | | | | | | | | T6 | M45 |
| M35 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M44 |
| M36 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M45 |
| M37 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M46 |
| M38 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M47 |
| | | | | | | | | | | T1 | M43 |
| | | | | | | | | | | T6 | M48 |
| M39 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | T3 | M47 |
| | | | | | | | | | | T6 | M50 |
| | | | | | | | | | | T1 | M44 |
| | | | | | | | | | | T4 | M49 |
| M40 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M48 |
| | | | | | | | | | | T1 | M45 |
| | | | | | | | | | | T5 | M50 |
| M41 | (1) | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T1 | M46 |
| | | | | | | | | | | T2 | M50 |
| M42 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T3 | M51 |
| | | | | | | | | | | T4 | M52 |
| M43 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | T5 | M53 |
| | | | | | | | | | | T6 | M54 |
| | | | | | | | | | | T2 | M52 |
| M44 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M56 |
| | | | | | | | | | | T3 | M53 |
| | | | | | | | | | | T4 | M55 |
| M45 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | T3 | M54 |
| | | | | | | | | | | T5 | M56 |
| M46 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | T2 | M56 |
| M47 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | T4 | M57 |
| | | | | | | | | | | T6 | M58 |
| | | | | | | | | | | T1 | M53 |
| M48 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M58 |
| | | | | | | | | | | T1 | M54 |
| M49 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | T5 | M59 |
| | | | | | | | | | | T6 | M60 |
| | | | | | | | | | | T1 | M55 |
| | | | | | | | | | | T3 | M57 |
| M50 | (1) | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M58 |
| | | | | | | | | | | T1 | M56 |
| | | | | | | | | | | T4 | M60 |

*รูปที่ 5.73 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

| Current Marking | Foundry | PowerTrain | Press | WaitPress | BodyInWhite | Paint | WaitPaint | FinalAsse... | DeliverPro... | Transition | Next Mi+1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M51 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 1 | 0 | 0 | 0 | T4 | M61 |
| M52 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 1 | 1 | 0 | T6 | M63 |
| | | | | | | | | | | T3 | M61 |
| | | | | | | | | | | T5 | M62 |
| M53 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | T2 | M62 |
| | | | | | | | | | | T6 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M64 |
| M54 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M65 |
| | | | | | | | | | | T2 | M63 |
| M55 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | T5 | M66 |
| | | | | | | | | | | T3 | M64 |
| | | | | | | | | | | T6 | M67 |
| M56 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M65 |
| | | | | | | | | | | T4 | M67 |
| M57 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | T6 | M69 |
| | | | | | | | | | | T5 | M68 |
| | | | | | | | | | | T1 | M64 |
| M58 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M69 |
| | | | | | | | | | | T1 | M65 |
| M59 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | T3 | M68 |
| | | | | | | | | | | T1 | M66 |
| | | | | | | | | | | T6 | M70 |
| M60 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | T5 | M70 |
| | | | | | | | | | | T6 | M71 |
| | | | | | | | | | | T1 | M67 |
| | | | | | | | | | | T3 | M69 |
| M61 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | 1 | 1 | 0 | T6 | M73 |
| | | | | | | | | | | T5 | M72 |
| M62 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 1 | 0 | T6 | M75 |
| | | | | | | | | | | T3 | M72 |
| | | | | | | | | | | T4 | M74 |
| M63 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M75 |
| | | | | | | | | | | T3 | M73 |
| M64 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | T5 | M76 |
| | | | | | | | | | | T6 | M77 |
| | | | | | | | | | | T2 | M74 |
| M65 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M77 |
| | | | | | | | | | | T2 | M75 |
| M66 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | T6 | M78 |
| | | | | | | | | | | T3 | M76 |
| M67 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | T3 | M77 |
| | | | | | | | | | | T5 | M78 |
| | | | | | | | | | | T6 | M79 |
| M68 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | T6 | M80 |
| | | | | | | | | | | T1 | M76 |
| M69 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | T1 | M77 |
| | | | | | | | | | | T6 | M81 |
| | | | | | | | | | | T5 | M80 |
| M70 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | T1 | M78 |
| | | | | | | | | | | T3 | M80 |
| | | | | | | | | | | T6 | M82 |
| M71 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | T1 | M79 |
| | | | | | | | | | | T5 | M82 |
| | | | | | | | | | | T3 | M81 |
| M72 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 1 | 0 | T4 | M83 |
| | | | | | | | | | | T6 | M84 |
| M73 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 0 | 1 | 0 | 1 | T5 | M84 |
| M74 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 2 | 0 | T5 | M85 |
| | | | | | | | | | | T6 | M86 |
| | | | | | | | | | | T3 | M83 |
| M75 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | T3 | M84 |
| | | | | | | | | | | T4 | M86 |
| M76 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | T2 | M85 |
| | | | | | | | | | | T6 | M87 |
| M77 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | T6 | M88 |
| | | | | | | | | | | T2 | M86 |
| | | | | | | | | | | T5 | M87 |
| M78 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | T6 | M89 |
| | | | | | | | | | | T3 | M87 |
| M79 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | T3 | M88 |
| | | | | | | | | | | T5 | M89 |
| M80 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | T6 | M90 |
| | | | | | | | | | | T1 | M87 |
| M81 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | T1 | M88 |
| | | | | | | | | | | T5 | M90 |
| M82 | (1) | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | T1 | M89 |
| | | | | | | | | | | T3 | M90 |
| M83 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 2 | 0 | T6 | M92 |
| | | | | | | | | | | T5 | M91 |
| M84 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | 0 | 0 | 1 | T4 | M92 |
| M85 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 2 | 0 | T6 | M94 |
| | | | | | | | | | | T3 | M91 |
| | | | | | | | | | | T4 | M93 |
| M86 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 1 | 1 | T3 | M92 |
| | | | | | | | | | | T5 | M94 |
| | | | | | | | | | | T6 | M95 |
| M87 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | T6 | M96 |
| | | | | | | | | | | T2 | M94 |
| M88 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | T5 | M96 |
| | | | | | | | | | | T2 | M95 |
| M89 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | T3 | M96 |
| M90 | (1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | T1 | M96 |
| M91 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 2 | 0 | T6 | M98 |
| | | | | | | | | | | T4 | M97 |
| M92 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 1 | 1 | T5 | M98 |
| | | | | | | | | | | T6 | M99 |
| M93 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T3 | M97 |
| | | | | | | | | | | T5 | M100 |
| | | | | | | | | | | T6 | M101 |
| M94 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | T4 | M101 |
| | | | | | | | | | | T3 | M98 |
| | | | | | | | | | | T6 | M102 |
| M95 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 0 | 1 | 0 | 2 | T3 | M99 |
| | | | | | | | | | | T5 | M102 |
| M96 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | T2 | M102 |
| M97 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (3) | 0 | T5 | M103 |
| | | | | | | | | | | T6 | M104 |
| M98 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 1 | 1 | T4 | M104 |
| | | | | | | | | | | T6 | M105 |
| M99 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 0 | 1 | 0 | 2 | T5 | M105 |
| M100 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T3 | M103 |
| | | | | | | | | | | T6 | M106 |
| M101 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | T3 | M104 |
| | | | | | | | | | | T5 | M106 |
| | | | | | | | | | | T6 | M107 |
| M102 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 1 | 0 | 0 | 2 | T3 | M105 |
| | | | | | | | | | | T4 | M107 |
| M103 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | 0 | T6 | M108 |
| M104 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (2) | 1 | T6 | M109 |
| | | | | | | | | | | T5 | M108 |
| M105 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 1 | 0 | 0 | 2 | T4 | M109 |
| M106 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | T6 | M110 |
| | | | | | | | | | | T3 | M108 |
| M107 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | (1) | 2 | T6 | M111 |
| | | | | | | | | | | T5 | M110 |
| | | | | | | | | | | T3 | M109 |
| M108 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (2) | 1 | T6 | M112 |
| M109 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | (1) | 2 | T5 | M112 |
| | | | | | | | | | | T6 | M113 |
| M110 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | (1) | 2 | T6 | M114 |
| | | | | | | | | | | T3 | M112 |
| M111 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T5 | M114 |
| | | | | | | | | | | T3 | M113 |
| M112 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | (1) | 2 | T6 | M115 |
| M113 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | (3) | T5 | M115 |
| M114 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | T3 | M115 |
| M115 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | (3) | | |

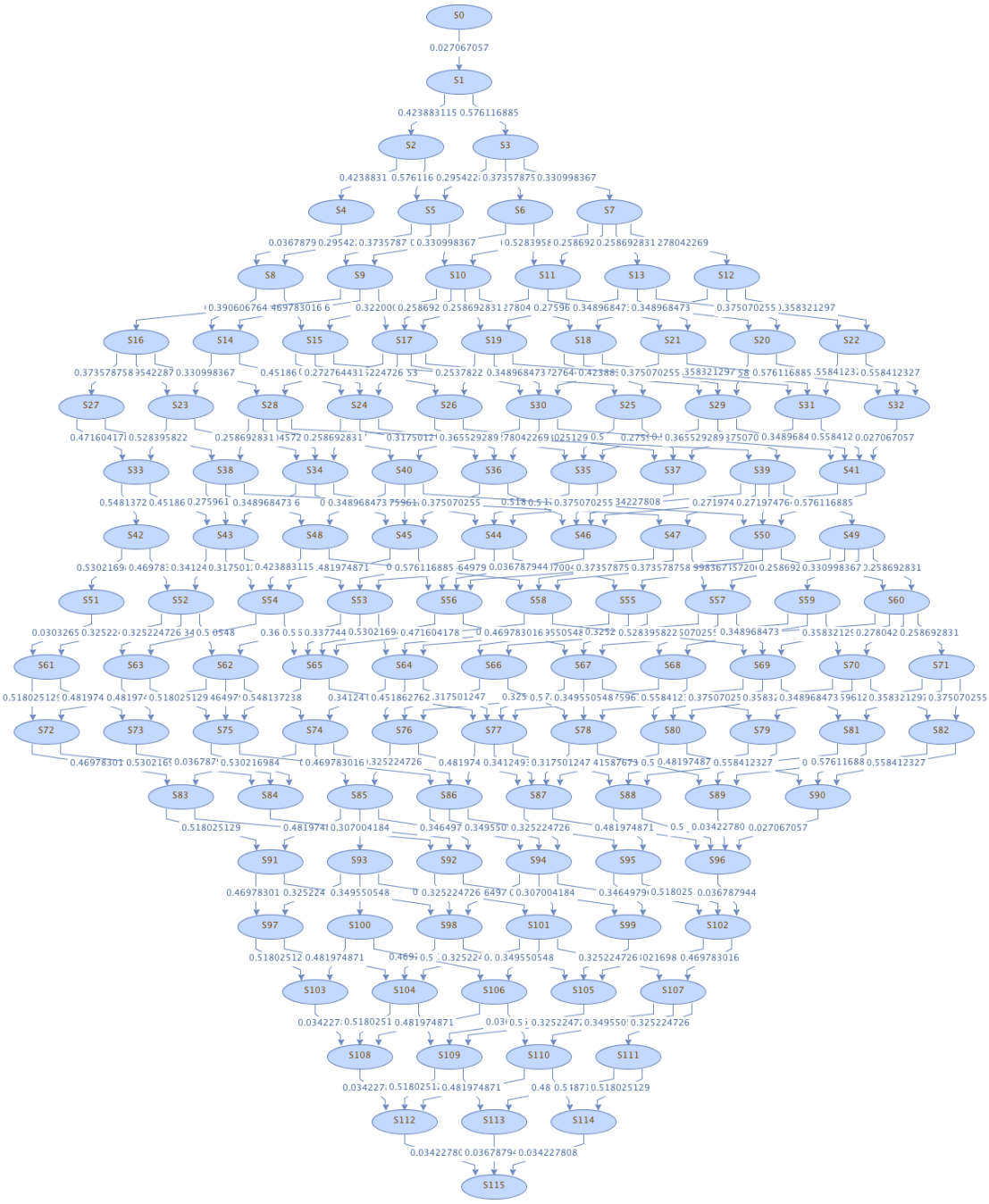
*รูปที่ 5.73 ริชอะบิลิตี้เซตของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์ (ต่อ)*

3) สร้างริชอะบิลิตี้กราฟ จะได้ตามรูปที่ 5.74

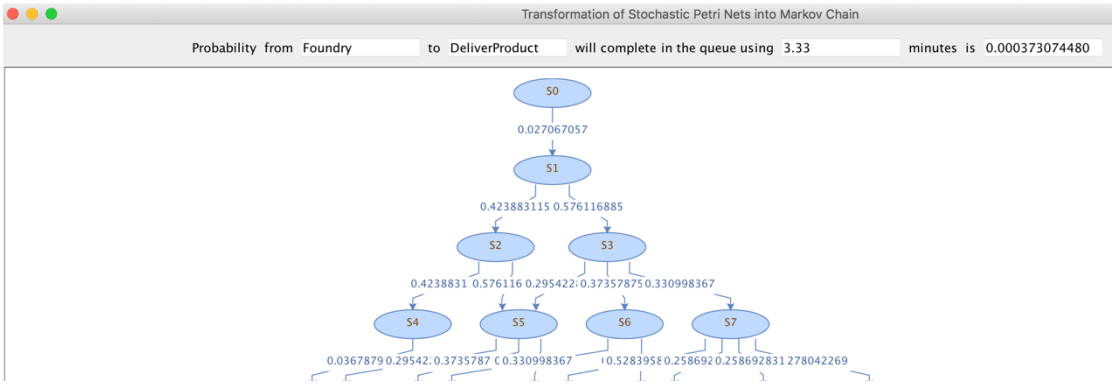



*รูปที่ 5.74 ริชอะบิลิตี้กราฟของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

4) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ ตามรูปที่ 5.75 เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่โดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.76

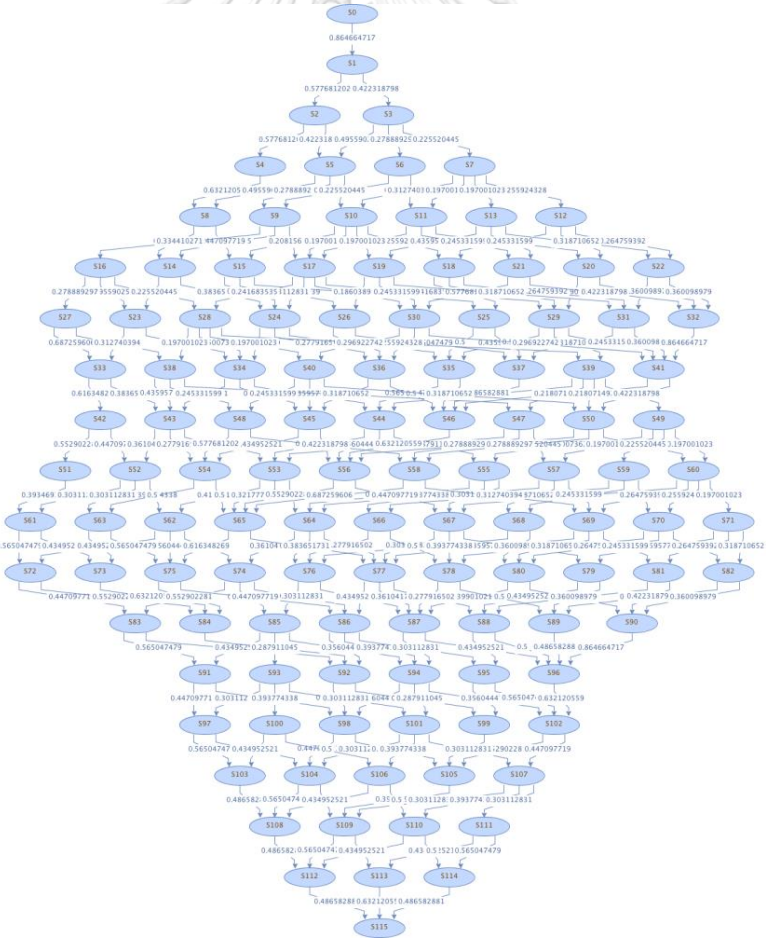



*รูปที่ 5.75 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

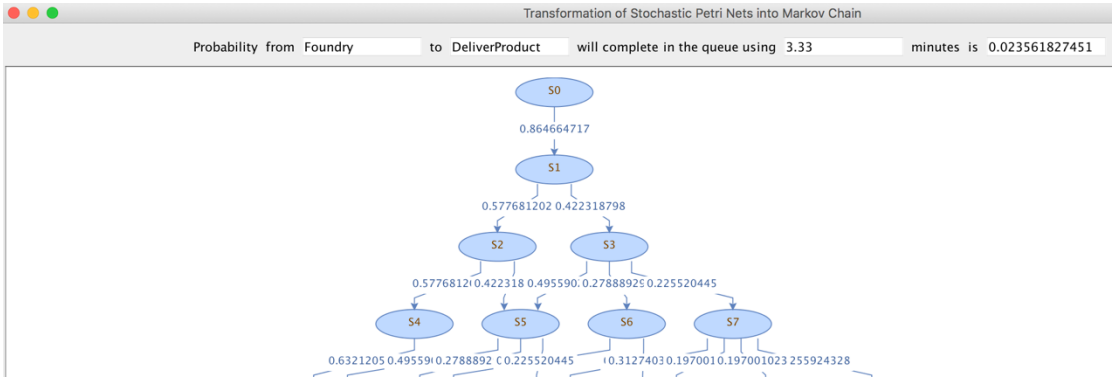



*รูปที่ 5.76 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

5) สร้างห่วงโซ่มาร์คอฟ ตามรูปที่ 5.77 เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นจากจุดเริ่มต้นของเพลสไปจนถึงจุดสิ้นสุดเป็นเท่าใด ตามรูปที่ 5.78



*รูปที่ 5.77 ห่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*




*รูปที่ 5.78 การวิเคราะห์ช่วงโซ่มาร์คอฟโดยใช้ฟังก์ชันแจกแจงสะสมของความน่าจะเป็นของแท็กโทเค็นลำดับที่ 3 ของการผลิตรถยนต์*

## 5.4 สรุปผลการทดสอบเครื่องมือ

จากผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ผ่านมาทั้ง 16 กรณีทดสอบกับ 3 กรณีศึกษา สามารถสรุปผลการคำนวณของแต่ละกรณีศึกษาได้ตามตาราง 5.3, 5.4 และ 5.5 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

*ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาของสโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป 4 รูปแบบ*

| กรณีศึกษาที่ | รายละเอียดกรณีศึกษา | เคสที่ | แท็กโทเค็น | ลำดับของการแท็ก | เพลสเริ่มต้น | เพลสสิ้นสุด | เวลา | ผลลัพธ์ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | สโตแคสติกเพทริเน็ตทั่วๆ ไป | 1<br>2<br>3<br>4 | P1 | 1 | P1 | P2<br>P3 | 2 นาที | ผลลัพธ์ความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันแจกแจงสะสมของเครื่องมือมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ที่ปรากฏบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล |

*หมายเหตุ: เคสที่ 1: แบบลำดับ, เคสที่ 2: แบบขัดกัน, เคสที่ 3: แบบทางแยก และเคสที่ 4: แบบประสาน*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

*ตารางที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาการเข้าแถวคอยและการผลิตรถยนต์โดยใช้การคำนวณจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น*

| กรณีศึกษาที่ | รายละเอียดกรณีศึกษา | เคสที่ | แท็กโทเค็น | ลำดับของการแท็ก | เพลสเริ่มต้น | เพลสสิ้นสุด | เวลา | ความน่าจะเป็น |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | การเข้าแถวคอย | 1 | Arriaves Customer | 1 | Arriaves Customer | Customer Leave | 10 นาที | 0.000039837743 |
| | | 2 | | 2 | | | | 0.000000575681 |
| | | 3 | | 3 | | | | 0.000000000000 |
| 3 | การผลิตรถยนต์ | 1 | Foundry | 1 | Foundry | Deliver Product | 10 นาที | 0.001335247846 |
| | | 2 | | 2 | | | | 0.000260602786 |
| | | 3 | | 3 | | | | 0.000373074480 |

*ตารางที่ 5.5 สรุปผลการทดสอบกรณีศึกษาการเข้าแถวคอยและการผลิตรถยนต์โดยใช้การคำนวณจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสม*

| กรณีศึกษาที่ | รายละเอียดกรณีศึกษา | เคสที่ | แท็กโทเค็น | ลำดับของการแท็ก | เพลสเริ่มต้น | เพลสสิ้นสุด | เวลา | ความน่าจะเป็น |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | การเข้าแถวคอย | 1 | Arriaves Customer | 1 | Arriaves Customer | Customer Leave | 10 นาที | 0.231904280324 |
| | | 2 | | 2 | | | | 0.129144580517 |
| | | 3 | | 3 | | | | 0.829660007995 |
| 3 | การผลิตรถยนต์ | 1 | Foundry | 1 | Foundry | Deliver Product | 10 นาที | 0.016223425243 |
| | | 2 | | 2 | | | | 0.001448710512 |
| | | 3 | | 3 | | | | 0.023561827451 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 6สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ ศึกษา วิจัยและพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟสามารถสรุป ผลการวิจัย ข้อจำกัดของเครื่องมือและแนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

## 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ซึ่งทางผู้ใช้งานต้องนำเข้าสโตแคสติกเพทริเน็ตในรูปแบบของเอกซ์เอ็มแอลตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากนั้นผู้ใช้งานต้องใส่พารามิเตอร์หลักที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ของเครื่องมือ ได้แก่ แท็กโทเค็น, ลำดับของแท็กโทเค็น , เพลสสิ้นสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์แถวคอย เมื่อผู้ใช้งานได้ระบุพารามิเตอร์หลักที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ครบหมดแล้ว เครื่องมือจะทำการสร้างริชอะบิลิตี้เซตตามอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบไว้เพื่อให้ได้สถานะทั้งหมดที่สามารถเป็นไปได้ (ทุกๆ มาร์กิง) และแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของตารางที่ประกอบด้วยข้อมูลมาร์กกิงปัจจุบัน, จำนวนของโทเค็นในแต่ละเพลส, ทรานสิชันที่ทำให้เกิดมาร์กกิงถัดไปและมาร์กกิงถัดไป โดยโทเค็นที่ถูกแท็กจะถูกแสดงในตารางของริชอะบะลิตี้เซตพร้อมวงเล็บ ( ) เมื่อได้ริชอะบิลิตี้เซตแล้วจะนำมาแปลงเป็นริชอะบิลิตี้กราฟเพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแต่ละมาร์กกิงว่าเกิดขึ้นเนื่องจากทรานสิชันใดได้ฟายริง หลังจากนั้นจะทำการแปลงริชอะบิลิตี้กราฟเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ พร้อมทั้งคำนวณความน่าจะเป็นลงบนเส้นความสัมพันธ์ของแต่ละสถานะในห่วงโซ่มาร์คอฟ ตามเวลาที่ได้กำหนดในพารามิเตอร์เบื้องต้น ซึ่งความน่าจะเป็นสามารถคำนวณได้ทั้ง 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานจะเลือกวิธีการคำนวณแบบใด

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบเครื่องมือสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ตรวจสอบการคำนวณความน่าจะเป็นโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงสะสมใช้กรณีศึกษาที่ 1 โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาและผลลัพธ์จากโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกซ์เซล โดยผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากัน
2) ตรวจสอบการการแท็กโทเค็นที่ต่างกันใช้กรณีศึกษาที่ 2 และ 3 โดยทดสอบกับลำดับของการแท็กโทเค็นที่ต่างกัน และพบว่าเครื่องมือสามารถวิเคราะห์โอกาสของแท็กโทเค็นที่เราได้แท็กเอาไว้ของแต่ละกรณีทดสอบได้อย่างถูกต้อง

## 6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

เครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ ฟังก์ชันมีข้อจำกัดดังต่อไปนี้

3) เครื่องมือสามารถนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลไฟล์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตได้เพียง 1 รูปเท่านั้น
4) เครื่องมือรองรับชื่อเพลสที่เป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น
5) เครื่องมือสามารถพิจารณาเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้าได้เพียงแบบเดียว คือ First Come First Served (FCFS) เท่านั้น
6) เครื่องมือสามารถรองรับจำนวนของหน่วยให้บริการเพียง 1 หน่วยให้บริการ
7) เครื่องมือสามารถแท็กโทเค็นได้ทีละ 1 โทเค็น
8) เครื่องมือสามารถแท็กโทเค็นที่เพลสปลายทางเป็นเพลสเดียวเท่านั้น กรณีที่เพลสปลายทางเป็นหลายๆ เพลส สามารถแท็กได้แต่ต้องเป็นเพลสคนละประเภทกัน

## 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการดำเนินงานต่อ

เครื่องมือสนับสนุนการแปลงสโตแคสติกเพทริเน็ตไปเป็นห่วงโซ่มาร์คอฟ สามารถนำไปต่อยอดพัฒนาเพิ่มเติมให้ครอบคลุมการใช้งานได้มากยิ่งขึ้น ดังนี้

1) พัฒนาเครื่องมือให้สามารถนำเข้าเอ็กซ์เอ็มแอลไฟล์ของสโตแคสติกเพทริเน็ตได้มากกว่า 1 รูปเท่านั้น
2) พัฒนาเครื่องมือที่สามารถพิจารณาเกณฑ์ในการให้บริการกับลูกค้าได้หลายแบบ
3) พัฒนาเครื่องมือสามารถแท็กโทเค็นได้มากกว่า 1 โทเค็น
4) พัฒนาเครื่องมือสามารถรองรับจำนวนของหน่วยให้บริการมากกว่า 1 หน่วยให้บริการ
5) พัฒนาเครื่องมือสามารถแท็กโทเค็นที่เพลสปลายทางได้มากกว่า 1 เพลส ไม่ว่าเพลสปลายทางจะเป็นประเภทเดียวกันหรือไม่อย่างไร
6) พัฒนาเครื่องมือให้สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นด้วยวิธีอื่นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**รายการอ้างอิง**


1. Resing, I.A.a.J., *Queueing Systems*. March 26, 2015.
2. Marsan, M.A., *STOCHASTIC PETRI NETS AN ELEMENTARY INTRODUCTION*, in *European Workshop on Applications and Theory in Petri Nets*. 2005.
3. Hillston, J., *A Compositional Approach to Performance Modelling*. 1985. 7-8.
4. Hillston, J., *Performance Modelling Stochastic Petri Nets Introduction*. December, 1985.
5. Zimmermann, A., *Stochastic Discrete Event Systems Modeling, Evaluation, Applications.* 2008: p. 65-69.
6. MURATA, T. *Petri Nets Properties, Analysis and Application*. April, 1989. IEEE.
7. M. Ajmone Marsan, G.B., Gianni Conte, Susanna Donatelli and Giuliana Franceschinis, *MODELLING WITH GENERALISED STOCHASTIC PETRI NETS*. 1994.
8. Bause, F., *Stochastic Petri Nets-An Introduction to the Theory*. 2002.
9. H. Motameni, A.M., M. Siasifar, H. Montazeri and A. Rezaei, *Analytic Evaluation on Petri Net by Using Markov Chain Theory to Achieve Optimized Models.* World Applied Sciences Journal 3, 2008.
10. Ibl, M. and J. Čapek, *Measure of Uncertainty in Process Models Using Stochastic Petri Nets and Shannon Entropy.* Entropy, 2016. **18**(1).
11. MOLLOY, M.K., *Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets*. 1982, IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS,.
12. Balbo, G., *Introduction to Stochastic Petri Nets.* 2001.
13. Kachapova, *Representing Markov Chains with Transition Diagrams.* Journal of Mathematics and Statistics, 2013. **9**(3): p. 149-154.
14. *W3School*. [cited 2017 October 01]; Available from: www.w3schools.com/xml.
15. Dingle, N.J. and W.J. Knottenbelt, *Automated Customer-Centric Performance Analysis of Generalised Stochastic Petri Nets Using Tagged Tokens.* Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2009. **232**: p. 75-88.


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

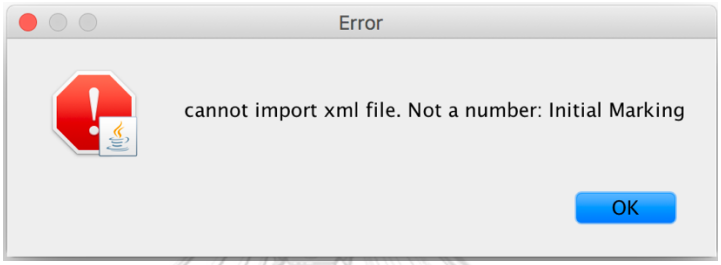
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) ตัวอย่างการแสดงข้อความผิดพลาดเมื่อใส่ “Initial Marking” ที่ไม่ใช่ตัวเลข

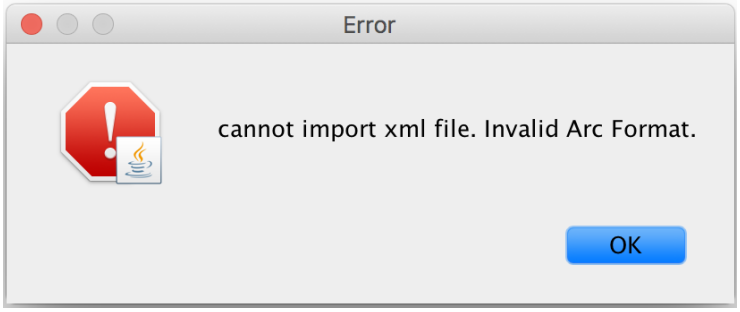
```xml
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="initialMarking" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" firingRate="9"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```




2) ตัวอย่างการแสดงข้อความผิดพลาดเมื่อมีเส้นอาร์กจากเพลสไปสู่เพลส

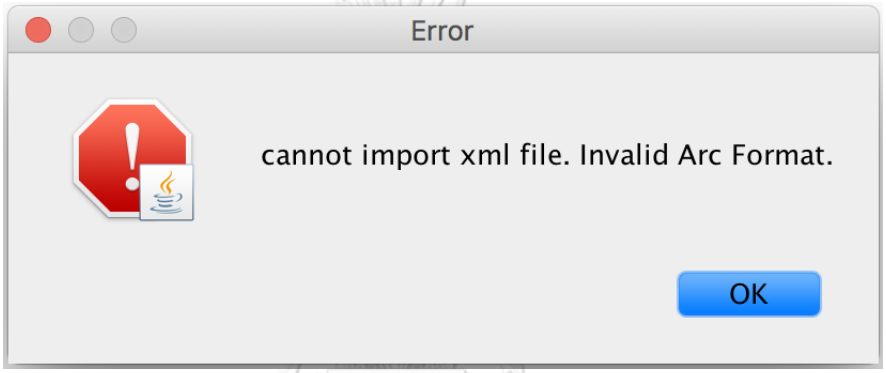
```xml
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="3" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" firingRate="9"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="P1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="P2" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```

CHULALONGKORN UNIVERSITY



3) ตัวอย่างการแสดงข้อความผิดพลาดเมื่อมีเส้นอาร์กจากทรานสิชันไปสู่ทรานสิชัน

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<SPN>
    <Places>
        <place id="P1" name="P1" initialMarking="3" capacity="5" type="General"/>
        <place id="P2" name="P2" initialMarking="0" capacity="5" type="General"/>
    </Places>
    <Transitions>
        <transition id="T1" name="T1" type="timed" firingRate="9"/>
    </Transitions>
    <Arcs>
        <arc id="P1 to T1" name="P1 to T1" source="P1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
        <arc id="T1 to P2" name="T1 to P2" source="T1" target="T1" type="normal" weight="1"/>
    </Arcs>
</SPN>
```




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเกศิณี สุมนาตย์ เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2546 หลังสำเร็จการศึกษาเข้าทำงานในตำแหน่งโปรแกรมเมอร์เป็นเวลา 5 ปี และทำงานในตำแหน่งนักวิเคราะห์ธุรกิจเป็นเวลา 6 ปี ที่บริษัท อีโปรเฟสชั่นนัล จำกัด และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2559 หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม) สาขาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University