การจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น

น.ส.รัตชนก เธียรปุญญธนากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

Simulation of Vessel Scheduling using Probabilistic Timed Automata

Miss Ratchanok Thianpunyathanakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

An Independent Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Software Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty Of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2023

หัวข้อสารนิพนธ์	การจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น
โดย	น.ส.รัตชนก เธียรปุญญธนากุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมซอฟต์แวร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับสารนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบสารนิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธาราทิพย์ สุวรรณศาสตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รัตชนก เธียรปุญญธนากุล : การจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น. (Simulation of Vessel Scheduling using Probabilistic Timed Automata) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ

ในอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเลที่มีการจัดการด้านความเสี่ยงในการเกิดความล่าช้าในการเดินเรือตามกำหนดเป็นปัญหาที่ซับซ้อน และเกิดความเสี่ยงและเกิดค่าเสียหายผลจากถึงกำหนดล่าช้าที่จะต้องประสบกับค่าใช้จ่ายของต้นทุนที่สูงขึ้นจากปัญหาความล่าช้า จึงให้ความสนใจที่ปัญหาเหล่านี้อยู่ที่การให้ความสำคัญกับความน่าจะเป็นจากความไม่แน่นอนและเวลาในการเดินเรือ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการวางแผนและจัดการตารางเดินเรือให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเงื่อนไขและปัจจัยที่แปรผันในอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเล งานวิจัยนี้ จึงเล็งเห็นความสำคัญของการนำไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น Probabilistic Timed Automata (PTA) มาใช้ในการจำลองกำหนดการตารางเดินเรือ (Vessel Scheduling) เพื่อช่วยให้สามารถจำลองและประเมินผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเดินเรือได้อย่างเป็นระบบ และการช่วยให้ผู้วางแผนสามารถทำการปรับปรุงและวิเคราะห์ตารางเดินเรือ โดยมีผลจากการปรับปรุงค่าความนาจะเป็นและทำการทวนสอบผลที่ได้จากสถิติข้อมูลที่ใช้จำลองไม่เกิน 10% ผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PRISM โดยใช้ PRISM Model Checker โดยเครื่องมือสามารถจำลองพฤติกรรมการเดินเรือตามแบบจำลอง PTA ที่ออกแบบไว้ โดยคำนึงถึงปัจจัยของความน่าจะเป็นที่ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและทำการทวนสอบด้วยสูตร PCTL ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิศวกรรมซอฟต์แวร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2566 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6470263821 : MAJOR SOFTWARE ENGINEERING

KEYWORD: Probabilistic Timed Automata Vessel Scheduling Time Automata Makov Dicision Process Estimate Time Departure and Estimate Time Arrival Probabilistic Timed Computation Tree Logic

Ratchanok Thianpunyathanakul : Simulation of Vessel Scheduling using Probabilistic Timed Automata. Advisor: Associate Professor DR. WIWAT VATANAWOOD

In the vessel sailing transport logistics industry, managing the risk of delays in scheduled sailings is a complex issue, and there is risk and damage as a result of the delay in due date and having to face higher costs from the delay problem. Therefore, the focus of these problems is on the importance of probabilities due to uncertainty and navigation time. This is an important factor in planning and managing vessel scheduling to be appropriate and efficient and suitable for changing conditions and factors in the vessel sailing transport logistics industry. This paper, therefore, recognizes the importance of using time automata with Probability Probabilistic Timed Automata (PTA) is used in simulating vessel scheduling (Vessel Scheduling) to enable the simulation and evaluation of various factors that affect shipping in a systematic way, and helping planners improve and analyze sailing schedules. The results of improving the probability values and verifying the results obtained from the statistical data used in the simulation are not more than 10% through programming in the PRISM language using the PRISM Model Checker. The tool can simulate navigation behavior according to the model. The designed PTA takes into account factors of probabilities that cause delays and can be verified using the Probabilistic Timed Computation Tree Logic (PCTL) formula.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Software Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2023	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณท่าน รองศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ วัฒนาวุฒิ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานมหาบัณฑิตของข้าพเจ้า และคณะกรรมการที่เคารพ เป็นอย่างยิ่งที่พวกท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษาแนะนำทางด้านการศึกษาหาความรู้คุณธรรม จริยธรรมและแนวทางสำหรับการทำโครงงานมหาบัณฑิตนี้ตลอดจนคอยดูแล และประสานงานให้ความช่วยเหลือแก่นิสิตที่ทำโครงงานมหาบัณฑิตทุกคน

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ หลักสูตรวิศวกรรมซอฟต์แวร์สำหรับกำลังใจและคำปรึกษาแนะนำในการจัดทำโครงงานมหาบัณฑิต

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและให้การช่วยเหลือสนับสนุนมาโดยตลอด

รัตชนก เธียรปุญญธนากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง 1

สารบัญรูปภาพ 2

บทที่ 1 บทนำ 4

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา 4

1.2. ขอบเขตของโครงงาน 5

1.3. วัตถุประสงค์ของโครงงาน 5

1.4. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ 6

1.5. โครงสร้างของเนื้อหาในโครงงานมหาบัณฑิต 6

1.6. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 8

2.1.1. แบบจำลองไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) [1] 8

2.1.2 เครื่องมือพัฒนาทวนสอบโมเดลเช็กกิง (PRISM Model Checker) [5] 9

2.1.3. โมเดลเช็กกิงแบบความน่าจะเป็น [1] 12

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.2.1. งานวิจัย “Transforming Probabilistic Timed Automata to PRISM Model” โดย Thirawat Sutalungka และ Wiwat Vatanawood ในปีค.ศ. 2022 [3] 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.2. งานวิจัย “Model Checking for Probabilistic Timed Automata” โดย Gethin Norman และคณะ ในปีค.ศ. 2013 [1] 16

2.2.3. งานวิจัย “Model Checking for Probabilistic Timed Systems” โดย Jeremy Sproston ในปีค.ศ. 2004 [6] 18

2.2.4. งานวิจัย “MDP + TA = Probabilistic Timed Automata, Formalized” โดย Simon Wimmer และคณะ ในปีค.ศ. 2018 [4] 19

บทที่ 3 กระบวนการสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น 22

3.1. ศึกษาหลักการและหาแนวทางในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง การเดินเรือโดยใช้โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น 23

3.1.1. กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ 23

3.1.2. กำหนดสถานะและเหตุการณ์ 24

3.1.3. กำหนดเวลาและความน่าจะเป็น 24

3.1.4. สร้างโมเดล PTA 24

3.1.5. การวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะ (Properties) 24

3.1.6. ทดสอบอีกครั้ง และปรับปรุงแบบจำลอง 24

3.1.7. สรุปผล 24

3.1.8. นำไปใช้งาน 24

3.2. กำหนดองค์ประกอบสำคัญสำหรับโมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น PTA 25

3.3. กำหนดลำดับการทำงานของการทวนสอบ จากการออกแบบของแบบจำลอง 26

3.4. นำเข้าข้อมูลตารางการเดินเรือ จากกรณีศึกษาใช้พิจารณากำหนดค่าความน่าจะเป็นโดยผู้ใช้งาน 32

3.5. กำหนดกฎและเงื่อนไขเริ่มต้นของค่าความน่าจะเป็น จากผู้ใช้งานให้กับโมเดล PTA 34

3.6. สร้างโมเดล PTA ตามการออกแบบ จากองค์ประกอบสำคัญที่ออกแบบ 37

3.7. การทดสอบและประเมินผลค่าความน่าจะเป็น 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4 การพัฒนาสร้างแบบจำลอง ด้วยการเขียนภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model checker จากโมเดล PTA 42

4.1.กำหนดสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจากเครื่องมือ PRISM Model Checker 42

4.2. กำหนด Model Type ในการเขียนภาษา PRISM 42

4.3. กำหนดค่าตัวแปรและชุดข้อมูล ของสถานะการณ์ที่จะเกิดขึ้น พฤติกรรมที่แสดงออก และเงื่อนไขการทำงานบนเครื่องมือ PRISM Model Checker 43

4.4. เขียนโปรแกรมภาษา PRISM โดยประยุกต์ตามการทำงานที่ออกแบบโมเดล PTA 45

4.5. กำหนดสูตร PCTL ผ่านการใช้เครื่องมือ PRISM จาก สร้าง Properties ในไฟล์ .pctl (Probabilistic) 48

4.6. ทดสอบและทดลองประยุกต์ใช้ เครื่องมือ PRISM Model Checker ที่เขียนโปรแกรมขึ้นเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงนำมาใช้งาน 54

บทที่ 5 การทดสอบและประเมินผลความสามารถจากผลลัพท์ที่ได้จากการเขียนโปรแกรมบนเครื่อง PRISM Model Checker 56

5.1. ทดลองและประเมินผลความสอดคล้องที่เขียนโปรแกรมบนเครื่องมือ และโมเดล PTA จากค่าความน่าจะเป็น Prob. (Probabilistic) 56

5.2. ทวนสอบผลลัพท์จาก PRISM Model Checker 57

5.3. ผลการนำเครื่องมือ PRISM Model Checker ที่เขียนโปรแกรมภาษา PRISM มาประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและปรับปรุงกำหนดการเดินเรือ การใช้เครื่องมือ PRISM Model Checker ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและปรับปรุงกำหนดการเดินเรือนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอน 61

บทที่ 6 บทสรุปโครงงานและข้อเสนอแนะ 62

6.1. สรุปผลโครงงานมหาบัณฑิต 62

6.2. ข้อจำกัดในโครงการมหาบัณฑิต 62

6.3. ประโยชน์ที่จะได้รับ 63

6.4. ข้อเสนอแนะ 63

บรรณานุกรม 65

ประวัติผู้เขียน..... 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงรายการแปลงกฎเพื่อแปลง PTA เป็น PRISM Model [3] 14

ตารางที่ 2.2 ตารางการ Mapping จากไฟล์ XML จากโมเดล PTA เข้ากับเครื่องมือ PRISM [3] 15

ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และคำอธิบายสำหรับ Tuples ของ PTA 25

ตารางที่ 3.2 อธิบายเครื่องหมายที่ใช้ในสูตร PCTL เพื่อกำหนด PCTL ใน PRISM Model Checker 30

ตารางที่ 3.3 สรุปภาพรวมของความน่าจะเป็นและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือ 31

ตารางที่ 3.4 แสดงสถิติของข้อมูลการเดินเรือถึงท่าตามกำหนดล่าช้าสำหรับบริการ (RLI) และพิจารณาได้ค่าความน่าจะเป็นของปีที่ผ่านมาในปี 2020 32

ตารางที่ 3.5 แสดงเวลามาตรฐานที่ใช้ในการเดินทางถึงท่าที่หมายของแต่ละท่าเรือ อ้างอิงจากรูปที่ 3.5 33

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นที่ถูกสำรวจสอบถามจากผู้ใช้งานจริง และนำค่าความน่าจะเป็นมาปรับแต่งให้ใกล้ข้อมูลสถิติที่น่าเชื่อถือมากขึ้น 34

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าตัวแปรนาฬิกาจากความล่าช้าที่สุ่มมาจากผู้ใช้งานผ่านการประเมินจากค่าสถิติ 35

ตารางที่ 3.8 แสดงกฎและเงื่อนไขที่ได้จากหัวข้อ 3.2 - 3.5 ในการสร้างโมเดล PTA [3] 37

ตารางที่ 3.9 การทดสอบและประเมินผลค่าความน่าจะเป็น จากเส้นทางโมเดล PTA รูปที่ 3.6 ผ่านการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นจากหัวข้อ 3.2 – 3.5 41

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบสูตร PCTL ที่ออกแบบในการนำไปใช้ PCTL ใน PRISM 49

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทวนสอบความถูกต้องระหว่างโมเดล PTA และโค้ดที่เขียนภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model Checker 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแผนภาพของ PTA [1] 9

รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าเขียนโค้ดภาษา PRISM (PRISM GUI of editing a model) [5] 11

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าจอทวนสอบในการตรวจสอบจากการสร้างภาษา PRISM (PRISM GUI of model checking) [5] 11

รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการแปลงแผนภาพกิจกรรมวิธีการยืนยันโมเดลเป็นไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) โดยใช้ PRISM Model Checker [3] 13

รูปที่ 2.5 แสดงโมเดล PTA และโค้ดโมเดล PRISM ของกระบวนการส่งข้อความผ่านช่องทางที่ไม่น่าเชื่อถือ [3] 13

รูปที่ 2.6 แสดงผลแบบจำลองใน PRISM Model [3] 15

รูปที่ 2.7 แสดงผลของกราฟแนวโน้มของความน่าจะเป็นที่ส่งข้อความล้มเหลวจาก PRISM Model [3] 16

รูปที่ 2.8 แสดงผลโมเดล PTA จากกรณีศึกษาของความล่าช้าของเวลาที่กระจายต่อเนื่อง continuously-distributed time delays) [1] 17

รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของ PTA แบบจำลองสวิตช์ที่ผิดพลาดจากกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ [6] 18

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของPTA ที่มีหนึ่งนาฬิกาและกราฟภูมิภาคจากกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ [4] 20

รูปที่ 3.1 แนวทางการดำเนินงานสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น 22

รูปที่ 3.2 กระบวนการทำงานของการสร้างแบบจำลอง PTA ที่ได้ออกแบบไว้ 23

รูปที่ 3.3 แสดงบริการเดินเรือจากท่าเรือไทยแหลมฉบังไปยังท่าเรืออินเดีย (RLI) [13] 27

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโมเดล PTA จาก Portที่1 ถึง Port ที่ 2 ผ่านปัจจัย 3 ประการที่ส่งผลล่าช้า 29

รูปที่ 3.5 เวลามาตรฐานที่ใช้ประมาณการในตารางการเดินเรือสำหรับบริการ (RLI) 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.6 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ THLCH ไป ท่าเรือ SGSIN ที่ออกแบบ 38

รูปที่ 3.7 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ SGSIN ไป ท่าเรือ MYPKG ที่ออกแบบ..... 39

รูปที่ 3.8 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ MYPKG ไป ท่าเรือ INPAV ที่ออกแบบ 39

รูปที่ 3.9 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ INPAV ไป ท่าเรือ ถัดไป สำหรับการพัฒนาโมเดลต่อไปได้39

รูปที่ 4.1 สร้างคำสั่งกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นสำหรับอคง์ประกอบสำคัญที่ออกแบบไว้ 43

รูปที่ 4.2 การเขียนโค้ดจากภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model checker นำต้นแบบจากแบบจำลองการเดินเรือโมเดล PTA จากรูปที่ 3.6 46

รูปที่ 4.3 โค้ดสูตร PCTL จากตารางที่ 4.1 จากไฟล์ .pctl ใช้สำหรับการทวนสอบโค้ดที่เขียนจากเครื่องมือ 53

รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงการสร้าง Properties ผ่านหลักการของสูตร PCTL ที่ออกแบบไว้ 54

รูปที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบค่าที่ต้องการจากการตั้งคำถามผ่านสูตร PCTL โดยการอ่านค่าผ่านเครื่องมือ PRISM [5] 55

รูปที่ 5.1 แสดงผลการทดลองเสมือนจริง (Simulation) จากแต่ละสถานะ บน PRISM จากแต่ละเงื่อนไขที่สนใจ 58

รูปที่ 5.2 แสดงผลการทวนสอบความถูกต้องการด้วยการตรวสอบ (Verify) ระหว่างโมเดล PTA และโค้ดที่เขียนภาษา PRISM 60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการขนส่งทางเรือและการจัดการกำหนดการตารางเดินเรือ (Vessel Scheduling) มีการจัดการด้านความเสี่ยงในการเกิดความล่าช้าในการเดินเรือตามกำหนดเป็นปัญหาที่ซับซ้อน และปัญหาของการเดินเรือไม่ถึงที่หมายตามที่วางแผนไว้ ส่งผลกระทบให้เกิดความเสี่ยงและเกิดค่าเสียหายผลจากถึงกำหนดล่าช้าที่จะต้องประสบกับค่าใช้จ่ายของต้นทุนที่สูงขึ้นจากปัญหาความล่าช้า ซึ่งให้ความสนใจที่ปัญหาเหล่านี้อยู่ที่การให้ความสำคัญกับความไม่แน่นอนและเวลาในการเดินเรือ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการวางแผนและจัดการตารางเดินเรือให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเงื่อนไขและปัจจัยที่แปรผันในอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเล ปัจจัยที่จะนำมาสร้างเป็นแบบจำลองที่มีผลมากที่สุด รวมเป็น หลักๆ 3 ปัญหาหลัก ประการแรก สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, ประการที่สองความพร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และประการที่สามความหนาแน่นของท่าเรือ จากปัญหาของปัจจัยเหล่านี้ การจัดการตารางเดินเรืออาจเผชิญกับปัญหาที่ส่งผลให้การเดินเรือไม่ถึงตามกำหนดเวลา (Delays) ที่นำมาจำลองการสุ่มการ Random Delay จากปัจจัยที่ส่งผลการประเมินและการจัดการความเสี่ยงในการเกิดการล่าช้าในการเดินเรือจึงเป็นสิ่งสำคัญในการจัดตารางเดินเรือที่มีประสิทธิภาพ

ผู้วิจัยได้มองเห็นถึงความสำคัญของการสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น Probabilistic Timed Automata (PTA) [9] เพื่อจัดการตารางเดินเรือนำมาสร้างแบบจำลองในรูปแบบที่พิจารณาความไม่แน่นอนจากปัจจัยในการเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ และเวลาที่ใช้ในการเดินเรือจากปัจจัยที่สนใจ คือ สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, ความพร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และความหนาแน่นของท่าเรือ โดยออกแบบและสร้างโมเดล PTA ของการแลกเปลี่ยนตัวแปรที่เป็นปัจจัยส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้น ที่ส่งผลต่อค่าเวลาที่มากขึ้น ส่งผลต่อกำหนดเดินเรือล่าช้า ซึ่งเป็นความสำคัญที่จะนำมาออกแบบขั้นตอนวิธีการสุ่มหาความเสี่ยงที่เป็นปัจจัยต่อเวลาที่เกิดความล่าช้า (Algorithm Random delay) ด้วยการตรวจสอบระยะเวลาการเดินเรือและทวนสอบกับวันที่เดินเรือที่วางแผนไว้ว่ามีความแม่นยำ และน่าเชื่อถือมากขึ้น จากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker [5] เพื่อทดสอบและทวนสอบ (Verification) ปัจจัยความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้น เพื่อเลี่ยงเส้นทางที่จะทำให้เกิดการเดินเรือล่าช้าได้ เป็นช่วยให้ผู้บริหารและผู้วางแผนสามารถทดลองและประเมินผลของการ

เปลี่ยนแปลงต่าง ๆ จากเครื่องมือนำมาพัฒนาต่อยอดผลการวิเคราะห์และทวนสอบผลจากการจำลองค่าความน่าจะเป็น (Probabilistic) ที่ส่งผลของปัญหาที่สามารถช่วยในการวางแผนเหตุการณ์ฉุกเฉินและการจัดการความเสี่ยงได้ และลดต้นทุนจากปัญหาการเดินเรือไม่ถึงที่หมายตามที่วางแผนไว้ ทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าความน่าจะเป็นเพื่อให้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้นและสามารถทวนสอบได้อย่างมีระบบ เพื่อให้สามารถดำเนินการตอบสนองและปรับปรุงแผนการเดินเรือให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและมีความเสถียร เพื่อจัดการตารางเดินเรือในการพัฒนาและปรับปรุงระบบการจัดการตารางเดินเรือให้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับเงื่อนไขและปัจจัยที่แปรผันในอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเลต่อไป

1.2.ขอบเขตของโครงงาน

1. ออกแบบการคำนวณหาค่ าความน่าจะเป็นของปัจจัยที่มีผลต่อการเดินเรือคือ สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, ความพร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และความหนาแน่นของท่าเรือ จากตารางการเดินเรือ ที่กำหนดให้ที่มีค่า ETA, ETD และข้อมูลจริงจากตารางการเดินเรือ
2. ออกแบบแผนภาพ PTA เพื่อจำลองกำหนดการเดินเรือ โดยนำค่าความน่าจะเป็นจากข้อข้างต้นที่กล่าวมานำมาใช้ประกอบ
3. เขียนโปรแกรมโดยเขียนโด้ดด้วยภาษา PRISM ที่ทำงานสอดคล้องด้วยกับการจำลองแผนภาพ PTA ที่ออกแบบได้จากข้อ 6.2 และทำการจำลองเพื่อให้ได้ผลลัพท์ เขียนโปรแกรมเพื่อจำลอง การทำงาน PTA ด้วยภาษา PRISM [5]
4. นำเสนอผลลัพท์จากโปรแกรม PRISM [5]
5. ใช้กรณีศึกษาที่สนใจจากการกำหนดตารางเดินเรือเส้นทางบริการจากท่าเรือที่ตั้งประเทศไทยสู่ท่าเรือที่ตั้งประเทศอินเดีย LAEM CHABANG – INDIA SERVICE (RLI) [2]
6. ทวนสอบและจำลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของโมเดลด้วยเครื่องมือ PRISM เพื่อหาความน่าจะเป็นจากปัจจัยการเดินเรือ เพื่อประเมินความเสี่ยงของกำหนดการถึงท่าเรือตามกำหนด

1.3.วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- เพื่อออกแบบโมเดล PTA ที่ใช้จำลองกำหนดการเดินเรือเพื่อประมาณค่าเวลาที่จะใช้ในการเดินทางของเรือได้อย่างแม่นยำได้ภายใต้ปัจจัยความน่าจะเป็น
- เพื่อนำแบบจำลองการทำงานของ PTA ที่ออกแบบและนำมาเขียนโปรแกรมภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker [5]

1.4. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาหาความเป็นไปได้จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวของกับการจำลองกำหนดการเดินเรือ โดยใช้ PTA [9] และ PRISM [5]
2. ศึกษาแบบจำลอง Timed automata และการหาค่า Probabilistic
3. ศึกษาหลักการและแนวทางจากทฤษฎีต่างๆของ Markov chain ที่เกี่ยวข้อง
4. ศึกษาเงื่อนไขและปัจจัยที่ส่งผลต่อกำหนดการเดินเรือ
5. ศึกษาการหาค่าและข้อมูล Estimated Time of Arrival (ETA) และ Estimated Time of Departure (ETD) ของตารางเดินเรือ
6. ศึกษาแนวทางการใช้เครื่องมือและการใช้งาน PRISM
7. ศึกษาและค้นหาโค้ดตัวอย่างเพื่อนำมาเป็นแนวทางการเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษา PRISM [5]
8. วางแผนและออกแบบจำลองจากโครงสร้างของ PTA [9] ที่สอดคล้องกับระบบตารางการเดินเรือ
9. สร้างและปรับแต่งแบบจำลอง PTA [9] โดยการกำหนดสถานะและปัจจัยที่สนใจของระบบตารางการเดินเรือ และการกำหนดค่าความน่าจะเป็นแต่จะปัจจัย
10. สร้างกฎและเงื่อนไขเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ และค่าคุณสมบัติ (properties) ให้สอดคล้องกับโมเดล PTA [9] ที่จำลองบนเครื่องมือ PRISM Model Checker [5]
11. พัฒนาเครื่องมือโดยการนำแบบจำลอง PTA มาเป็นต้นแบบในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model Checker tool [5]
12. ทดสอบด้วยการทวนสอบผลความน่าจะเป็นจากคุณสมบัติ (Properties) จากเขียนโค้ดด้วยภาษา PRISM ที่สอดคล้องกับแบบจำลอง PTA [9] โดยผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker [5]
13. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

1.5.โครงสร้างของเนื้อหาในโครงงานมหาบัณฑิต

โครงงานมหาบัณฑิตฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยบท 3-5 ถูกแบ่งเนื้อหาตามปัญหาที่ทำได้แก้ไขและปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยมีรายการทั้งหมดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎี งานวิจัย และเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กระบวนการสร้างแบบจำลองการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น

บทที่ 4 การพัฒนาสร้างแบบจำลองด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model checker จากโมเดล PTA

บทที่ 5 การทดสอบและประเมินผลความสามารถจากการเขียนโปรแกรมได้ผลลัพธ์จากเครื่องมือ

บทที่ 6 บทสรุปโครงงานมหาบัณฑิต และข้อเสนอแนะ

1.6. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Thianpunyathanakul, Ratchanok, et al. “Simulation of Vessel Scheduling using Probabilistic Timed Automata.”

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

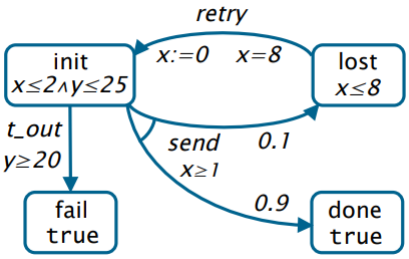
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1. แบบจำลองไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) [1]

PTA เป็นโมเดลการเข้าร่วมกันของโครงสร้างของ Timed Automata (TA) และโมเดลการเรียนรู้แบบสุ่ม (Probabilistic Modeling) ที่เพิ่มเติม คือการรวมระหว่าง TA และ Markov Decision Process (MDP) ในโมเดล PTA นำเอาประโยชน์จาก TA ไทม์ออโตมาตาเป็นโมเดลที่ใช้ในการแสดงและจำลองการเปลี่ยนแปลงของสถานะและเหตุการณ์ในระบบเวลาจำกัด โดยเน้นการระบุเวลาที่เกิดเหตุการณ์และการเปลี่ยนสถานะ ที่ทำหน้าที่เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการระบุและจำลองการเปลี่ยนสถานะของระบบที่เกิดขึ้นในเวลาและสัมพันธ์เหตุการณ์ต่างๆ Timed Automata โดยใช้ช่วงเวลาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการระบุการเปลี่ยนสถานะ การใช้ Timed Automata ช่วยให้สามารถจำลองและวิเคราะห์การเดินเรือในช่วงเวลาที่สำคัญได้อย่างถูกต้อง และ MDP เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดการการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนและความสัมพันธ์ทางสถิติ โดยในการจำลองกำหนดการเดินเรือ PTA สามารถแปลงเป็น MDP เพื่อทำการวางแผนการตัดสินใจในการเลือกเส้นทางและการจัดการเพื่อให้เกิดความล่าช้าในการเดินเรือในรูปแบบที่เหมาะสม โดยสามารถระบุการกระทำ (action) และสถานะ (state) ได้โดยอิงตามเวลา (time) ซึ่งทำให้สามารถจำลองการทำงานที่มีสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และสามารถรวมกับการพิจารณาความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะได้ เข้ามา เพื่อให้สามารถจำลองและวิเคราะห์ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาและการกระทำของตัวแปรสุ่มได้ PTA มี 7 tuple เช่นเดียวกับ Timed Automata แต่มีการเพิ่มเติมความน่าจะเป็น (probability) ในการเปลี่ยนสถานะ โดยโมเดล PTA นั้นเป็นการสืบเสาะสถานะของระบบ (system exploration) โดยพิจารณาการเปลี่ยนสถานะตามเวลา (timed transitions) และความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (probabilistic transitions) ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา (time intervals) ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของระบบที่มีการตัดสินใจที่อยู่ในบริบทของความไม่แน่นอนและเวลาที่มีความสำคัญในการตัดสินใจ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแผนภาพของ PTA [1]

จากแผนภาพข้างต้น มีการแสดงการแจกแจงโดยเชื่อมต่อจากต้นทางและป้ายกำกับความน่าจะเป็นที่ติดกับเส้นเชื่อม (เว้นไว้สำหรับเส้นเชื่อมที่นำมาด้วยความน่าจะเป็น 1) PTA มีสองนาฬิกา x และ y ซึ่งเริ่มต้นด้วยค่า 0 ในตำแหน่งเริ่มต้นระบบจะรออย่างน้อย 1 หน่วยเวลา (แสดงเป็นโดยเงื่อนไขการเปิดใช้งาน $x \geq 1$ ในการกระจายการดำเนินการส่งขาออก) และไม่เกิน 2 หน่วยเวลา (แสดงโดยจุดร่วม $x \leq 2$ ของค่าคงที่เงื่อนไข) ก่อนส่งข้อความ ด้วยความน่าจะเป็น 0.9 ได้รับข้อความอย่างถูกต้อง(เส้นเชื่อมเสร็จแล้ว) ซึ่งด้วยความน่าจะเป็น 0.1 ข้อความจะสูญหาย (เส้นเชื่อมถึงสูญหาย) ในกรณีหลัง เมื่อนาฬิกา x ถึง 8 PTA จะกลับไปที่ init โดยพยายามส่งอีกครั้งสามารถทำข้อความได้หากรวมแล้วอย่างน้อย 20 หน่วยและไม่เกิน 25 หน่วยเวลาตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

2.1.2 เครื่องมือพัฒนาทวนสอบโมเดลเช็กกิง (PRISM Model Checker) [5]

PRISM เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์และจำลองระบบที่มีลักษณะเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ เช่น ระบบระดับการควบคุม (control systems), ระบบการสื่อสาร (communication systems), ระบบคอมพิวเตอร์ (computer systems), และอื่น ๆ โดยเฉพาะทางด้านระบบที่มีความสำคัญในเรื่องการตัดสินใจและโอกาสเกิดข้อผิดพลาด (decision-making and probabilistic behavior)

PRISM มีคุณสมบัติที่สำคัญต่อไปนี้

1. รองรับการจำลองและการวิเคราะห์ของโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ตัวแปรแบบจำกัด (discrete variables) เช่น สถานะ (states), การเปลี่ยนสถานะ (transitions), และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น (events) โดย PRISM สนับสนุนโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะตามเวลาแบบที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete-time models) และโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะตามเวลาแบบต่อเนื่อง (continuous-time models)
2. การวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น (probability analysis) ใน PRISM สามารถใช้ในการ

คำนวณค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจ เช่น ความน่าจะเป็นของสถานะที่ระบุหรือความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ที่กำหนดไว้

3. การคำนวณค่าคุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ (model checking) เพื่อตรวจสอบการประยุกต์ใช้ของโมเดลตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น การตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นในเหตุการณ์ที่กำหนดหรือการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเกิดเหตุการณ์ที่ระบุ
4. การคำนวณนโยบายการตัดสินใจ (decision policy synthesis) เพื่อหานโยบายที่เหมาะสมในการตัดสินใจโดยพิจารณาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์และค่าต้นทุนที่เกี่ยวข้อง
5. การวิเคราะห์และจำลองโมเดลที่มีการกำหนดค่าสุ่ม (probabilistic models) เพื่อจำลองการเกิดข้อผิดพลาดและการทดสอบระบบในเงื่อนไขที่หลากหลาย

PRISM ใช้ภาษาสเปกตรัมสำหรับระบุโมเดลทางคณิตศาสตร์ และมีอินเตอร์เฟซกราฟิก (graphical interface) ที่ให้ผู้ใช้งานสามารถสร้าง, แก้ไข, และทดสอบโมเดลได้อย่างง่ายดาย นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์เส้นทาง (path analysis) และเครื่องมือสำหรับการจำลองระบบในเวลาจริง (real-time system simulation) ที่มีให้ใช้งานใน PRISM

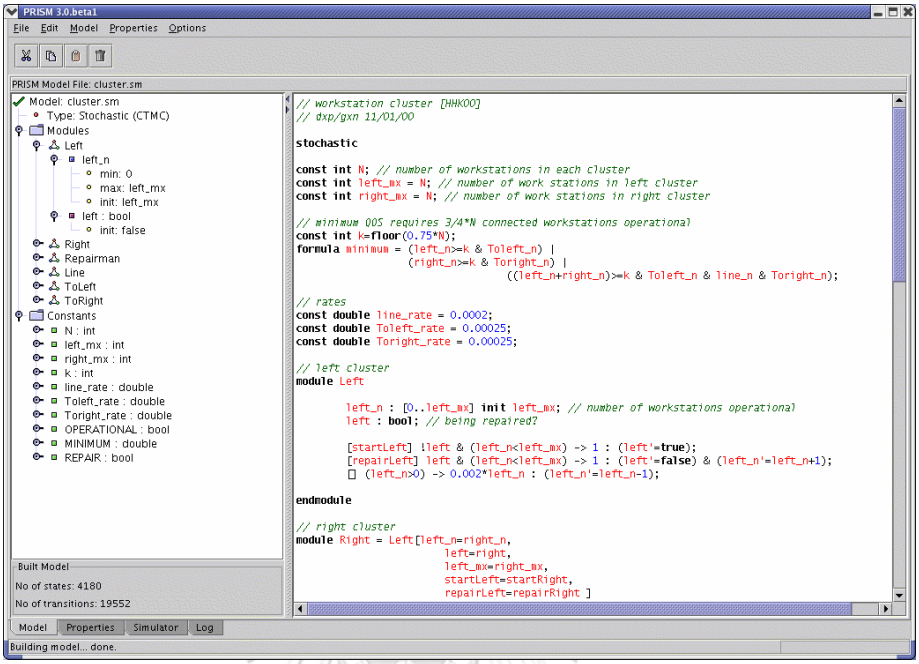
ในโครงงานนี้ จะใช้ PRISM 4.7 เป็นตัวตรวจสอบแบบจำลองความน่าจะเป็น เครื่องมือสำหรับการสร้างแบบจำลองอย่างเป็นทางการและการวิเคราะห์ระบบที่แสดงพฤติกรรมสุ่มหรือความน่าจะเป็น มักถูกใช้ในการวิเคราะห์ระบบจากโดเมนแอปพลิเคชันต่างๆ เนื่องจาก PRISM สามารถสร้างและวิเคราะห์โมเดลความน่าจะเป็นได้หลายประเภท ประกอบด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

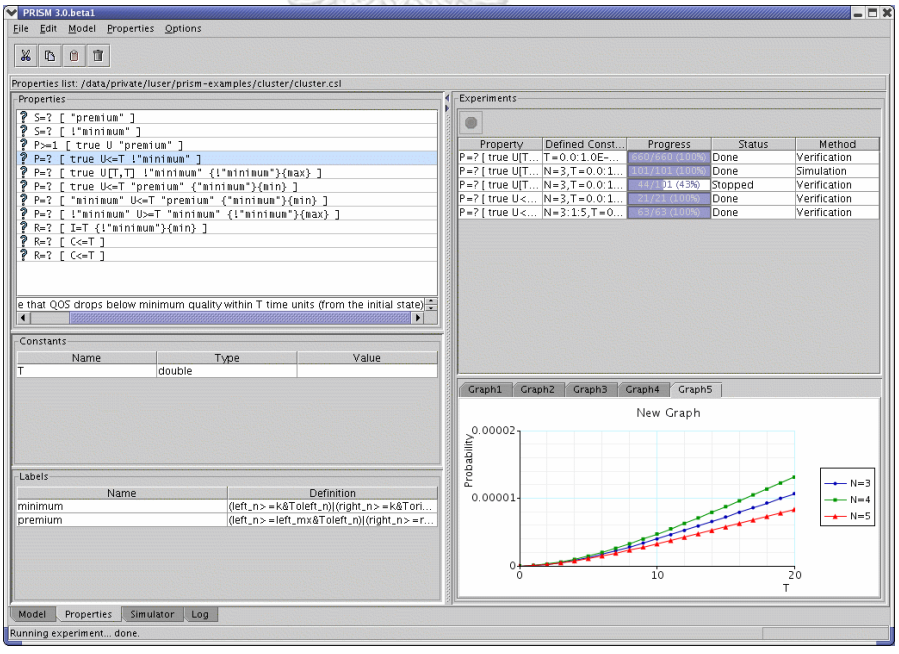
- Markov chains แบบแยกเวลา (DTMC)
- โซ่มาร์คอฟแบบต่อเนื่อง (CTMCs)
- กระบวนการตัดสินใจของมาร์คอฟ (MDPs)
- ความน่าจะเป็นออโตมาตา (PAs)
- ความน่าจะเป็น automata หมดเวลา (PTAs)
- กระบวนการตัดสินใจของมาร์คอฟที่สังเกตได้บางส่วน (POMDPs)
- ความน่าจะเป็นที่สังเกตได้บางส่วน (POPTAs)

ที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์ระบบจากโดเมนแอปพลิเคชันต่างๆ มากมาย รวมถึงโปรโตคอล การสื่อสารและมัลติมีเดียอัลกอริทึมการกระจายแบบสุ่ม โปรโตคอลความปลอดภัย ระบบชีวภาพ และอื่นๆ อีกมากมายนั้น แสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าจอเขียนโค้ดภาษา PRISM (PRISM GUI of editing

a model) แสดงในรูปที่ 2 และแสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าจอทวนสอบในการตรวจสอบจากการสร้างภาษา PRISM (PRISM GUI of model checking) แสดงดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าเขียนโค้ดภาษา PRISM (PRISM GUI of editing a model) [5]



รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างเครื่องมือ PRISM หน้าจอทวนสอบในการตรวจสอบจากการสร้างภาษา PRISM (PRISM GUI of model checking) [5]

2.1.3. โมเดลเช็กกิงแบบความน่าจะเป็น [1]

Probabilistic Model Checking เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของโมเดลที่มีความน่าจะเป็น โดย Probabilistic Model Checking สามารถตรวจสอบความถูกต้องของเงื่อนไขและความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่างสถานะและเหตุการณ์ในโมเดล PTA ได้ นอกจากนี้ยังสามารถค้นหาสถานะที่มีความน่าจะเป็นเกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น และทดสอบปรับปรุงแบบแผนกำหนดการเดินเรือให้มีประสิทธิภาพที่มีความสำคัญต่อการวางกลยุทธ์แผนการเดินเรือ จนเกิดเป็นแนวคิดในการออกแบบสร้างโมเดล PTA และประยุกต์เขียนโปรแกรมภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker [5] โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

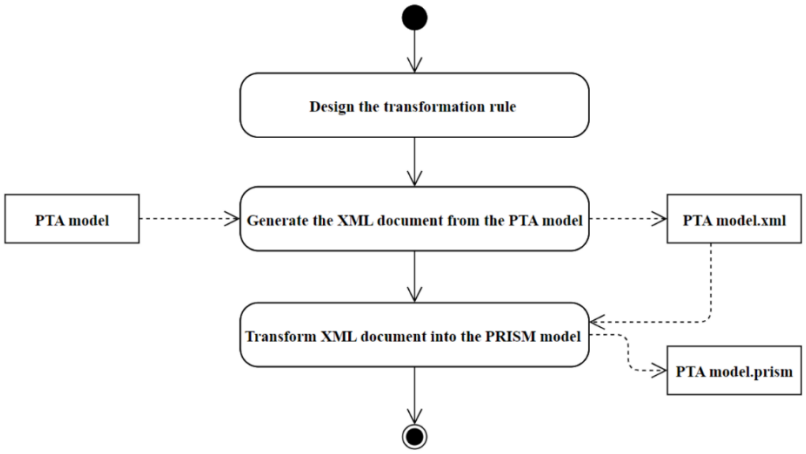
2.2.1. งานวิจัย “Transforming Probabilistic Timed Automata to PRISM Model” โดย Thirawat Sutalungka และ Wiwat Vatanawood ในปีค.ศ. 2022 [3]

งานวิจัยของ Thirawat Sutalungka และคณะ เสนอวิธีการแปลงแบบจำลอง PTA เป็น PRISM Model เพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์ระบบแบบ concurrent ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาและเกิดการเลือกทางเลือกในการทำงาน (probabilistic choice)

โดยงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการแปลง PTA ให้กลายเป็น PRISM Model ที่แสดงกระบวนการตรวจสอบโมเดลที่มีความน่าจะเป็น ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถสนับสนุนการวิเคราะห์ปริมาณของคุณสมบัติของโมเดลได้ โดยมีแนวคิดของงานวิจัยหลักๆ 3 ขั้นตอน

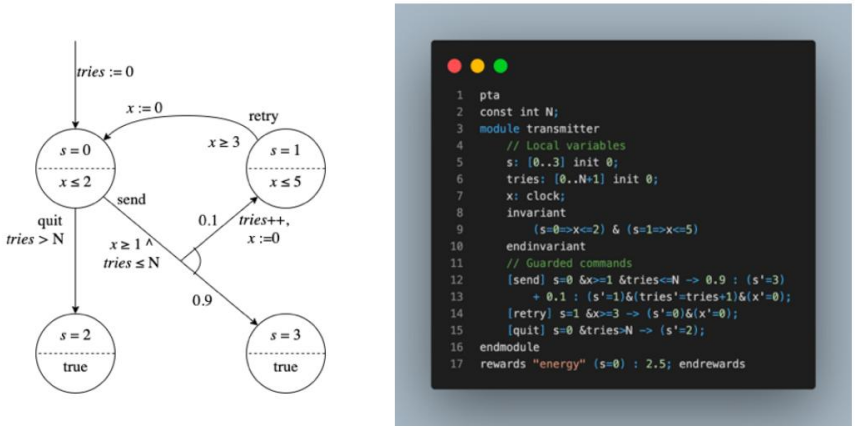
i. ออกแบบกฎการแปลงเพื่อแปลงส่วนของ probabilistic timed automata เป็นโมเดล PRISM
ii. สร้างเอกสาร XML จากโมเดล probabilistic timed automata โดยใช้เครื่องมือ UPPAAL ในที่สุด
iii. แปลงเอกสาร XML เป็นโมเดล PRISM ตามกฎการแปลงของ PRISM model check สามารถยืนยันโมเดล PRISM ที่ได้จากโมเดล probabilistic timed automataได้ โดยใช้วิธีการแปลงที่มีประสิทธิภาพและตรวจสอบความสอดคล้องกันระหว่างโมเดล การแปลง PTA เป็น PRISM Model ช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาของระบบ concurrent ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาและเกิดการเลือกทางเลือกในการทำงาน

โดยมีขั้นตอนการแปลง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนการแปลงแผนภาพกิจกรรมวิธีการยืนยันโมเดลเป็นไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) โดยใช้ PRISM Model Checker [3]

ออกแบบกฎการแปลงเพื่อแปลงส่วนของ PTA เป็นโมเดล PRISM โมเดล PTA แสดงถึงการส่งข้อความผ่านช่องทางที่ไม่น่าเชื่อถือ ดังแสดงในรูปที่ 5 (A) สมมติว่า N เป็นจำนวนเต็มบวกที่เป็นจำนวนรอบที่พยายามส่งข้อความ และ Tries เป็นการพยายามส่งข้อความเริ่มต้นจาก 0 ถึง N โดยมีความน่าจะเป็นในการส่งข้อความสำเร็จเป็น 0.9 และความน่าจะเป็นในการส่งข้อความล้มเหลวเป็น 0.1 ตามเงื่อนไขเวลา หากการส่งล้มเหลว จะมีการส่งใหม่ไม่เกิน N ครั้ง ตามกฎการแปลงนำตัวอย่างบางส่วนในงานวิจัยในตารางที่ 2.1 แสดงตารางรายการแปลงกฎเพื่อแปลง PTA เป็น PRISM Model และเป็นโค้ด PRISM ได้เช่นที่แสดงในรูปที่ 2.5 (B)

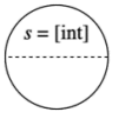
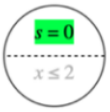
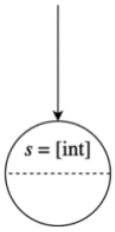
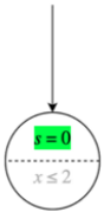


A. Probabilistic Time Automata model

B. PRISM model

รูปที่ 2.5 แสดงโมเดล PTA และโค้ดโมเดล PRISM ของกระบวนการส่งข้อความผ่านช่องทางที่ไม่น่าเชื่อถือ [3]

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงรายการแปลงกฎเพื่อแปลง PTA เป็น PRISM Model [3]

model components	PTA model	PRISM model	Description
Variables on the model	*tries, s, x, N*	cont int N; s: [0..3] init 0; tries: [0..N+1] init 0; x: clock;	Variable assignment where the variable N is an integer that gets the value when the operation starts, the s and tries variables are integers, and the x variable is the clock.
		s: [0..3]	Location is defined as a variable s with a size equal to the total number of locations in the model. The location starts at value 0 , which is called the initial location.
		s:[0..3] init 0;	The initial location is the location that does not have reachable from any location.

- สร้างเอกสาร XML จากโมเดล PTA โดยใช้เครื่องมือ UPPAAL

ในงานวิจัยนี้ใช้เอกสาร XML เพื่อแสดงโมเดล PTA ซึ่งในงานวิจัยนี้ เครื่องมือ model checker ที่ใช้ในการสร้างเอกสาร XML ที่แสดงโมเดล PTA เป็น UPPAAL

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- แปลงเอกสาร XML เป็นโมเดล PRISM ตามกฎการแปลงของ PRISM model checker สามารถยืนยันโมเดล PRISM ที่ได้จากโมเดล PTA ได้

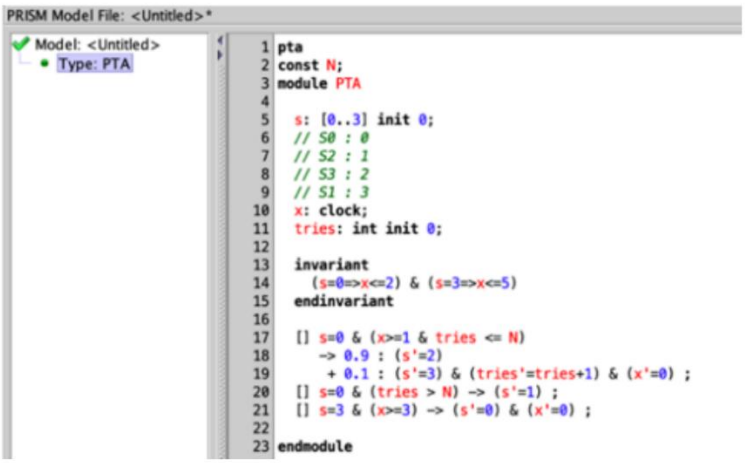
ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการแปลง ไฟล์ XML ที่ได้จาก UPPAAL โดยนำโมเดล PTA เป็น PRISM Model โดยการวิเคราะห์เวลาการเดินทางในระบบโดยใช้โมเดลที่แปลงได้ และได้เปรียบเทียบผลลัพธ์กับโมเดลเดิม พบว่าโมเดลที่แปลงได้มีความแม่นยำและความเร็วในการวิเคราะห์ที่ดีกว่าโมเดลเดิม

ตารางที่ 2.2 ตารางการ Mapping จากไฟล์ XML จากโมเดล PTA เข้ากับเครื่องมือ PRISM [3]

XML document	PTAs model

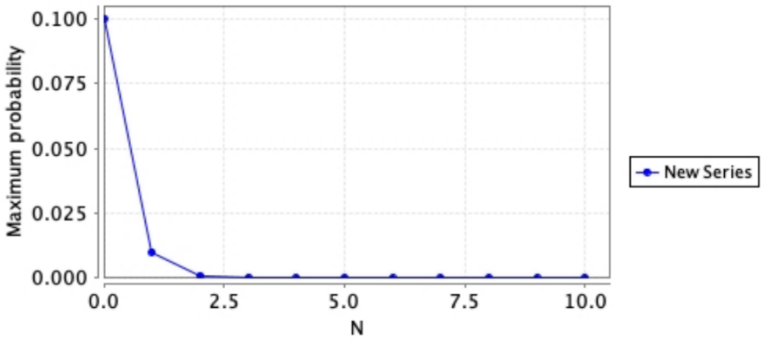
<declaration>
clock x;
int tries = 0;
const int N = 0;
</declaration>
	x: clock;
	tries: int init 0;
	const int N;

<location id="id0"> <name>S0</name> <label kind="invariant">x<=2</label> </location> <init ref="id0"/>	s: [0..3] init 0; // 0 = S0 … Invariant (s=0=>x<=2) endinvariant
<transition> <source ref="id3"/> <target ref="id0"/> <label kind="guard">x>=3</label> <label kind="assignment">x:=0</label> </transition>	[] s=1 &x>=3 -> (s'=0) & (x'=0);
<transition> <source ref="id0"/> <target ref="id4"/> <label kind="guard>x>=1 && tries <= N</label> </transition> <transition> <source ref="id4"/> <target ref="id2"/> <label kind="probability">90</label> </transition> <transition> <source ref="id4"/> <target ref="id3"/> <label kind="assignment>tries++,x=0</label> <label kind="probability>10</label> </transition>	[] s=0 &x>=1 &tries<=N -> 0.9 : (s'=3) + 0.1 : (s'=1) & (tries'=tries+1) &(x'=0);



รูปที่ 2.6 แสดงผลแบบจำลองใน PRISM Model [3]

ได้รับการพิจารณาถึงแนวโน้มของความน่าจะเป็นที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของโมเดลและขอบเขตความน่าจะเป็นในการส่งข้อความผิดพลาดในแต่ละรอบ โดยการกำหนดตัวแปรคงที่ให้มีช่วงค่าอยู่ในช่วง [1..10] และค่าสูงสุดของความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ S3 ดังนั้น ส่วนที่กำหนดคุณสมบัติเพื่อทำการตรวจสอบความน่าจะเป็นสูงสุดสามารถแสดงได้เป็น Pmax=? [F s=1] ด้วยผลลัพธ์ที่ได้ ความน่าจะเป็นในการล้มเหลวในการส่งข้อความในแต่ละรอบจะไม่เกิน 10%



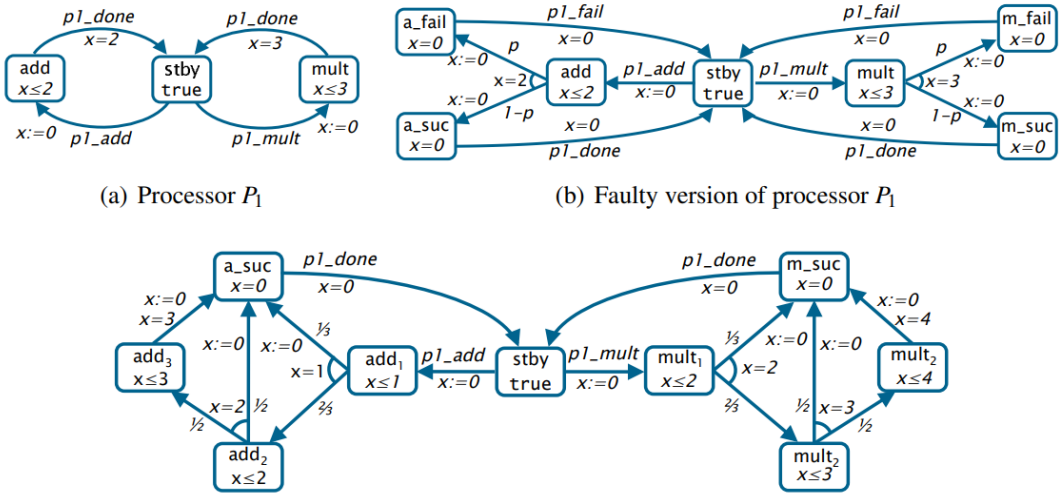
รูปที่ 2.7 แสดงผลของกราฟแนวโน้มของความน่าจะเป็นที่ส่งข้อความล้มเหลวจาก PRISM Model [3]

ข้อเสนอโครงงานมหาบัณฑิตนี้เห็นว่างานวิจัยของ Thirawat Sutalungka และคณะให้ผลลัพธ์ของ งานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแปลง PTA เป็น PRISM Model ที่มีประสิทธิภาพและช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาของระบบ concurrent ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาและเกิดการเลือกทางเลือกในการทำงาน และการนำงานวิจัยนี้ใช้ความสามารถการทวนสอบจากโมเดล PTA แบบทั่วไปไม่เฉพาะเจาะจงที่ออกแบบความสามารถของ PRISM โดยจะนำมาปรับใช้วิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นจากปัจจัยที่ส่งผลต่อกำหนดการล่าช้าของกรณีศึกษาของตารางเดินเรือต่อไปได้

2.2.2. งานวิจัย “Model Checking for Probabilistic Timed Automata” โดย Gethin Norman และคณะ ในปีค.ศ. 2013 [1]

งานวิจัยของ Gethin Norman และคณะ เสนอโดยเน้นการศึกษาและการพัฒนาเกี่ยวกับการตรวจสอบโมเดล PTA โดยใช้เทคนิคของ Model Checking ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องมือคอมพิวเตอร์ในการตรวจสอบว่าโมเดลที่ถูกสร้างขึ้นมาสอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดหรือไม่ งานวิจัยได้นำเสนอวิธีการจำลอง ด้วยโปรแกรม PRISM [1] เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของโมเดล PTA ที่เกี่ยวข้องกับเวลาและความน่าจะเป็น โดยใช้ภาษาโมเดล PRISM เป็นเครื่องมือในการพัฒนาและทดสอบ และสรุปสร้างเทคนิคต่างๆที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำการตรวจสอบโมเดลที่มีความน่าจะเป็น (probabilistic model checking) การตรวจสอบระบบเรียลไทม์ที่มีความน่าจะเป็นเป็นการวิจัยที่กำลังดำเนินการอย่างต่อเนื่องและต้องการความคืบหน้าเพิ่มเติมในทิศทางที่สำคัญหลายประการ ตัวอย่างเช่นการพัฒนาเทคนิคในการตรวจสอบของเกมทางเวลาแบบความน่าจะเป็น (probabilistic timed games) และเทคนิคในการตรวจสอบของ hybrid automata ที่มีความน่าจะเป็น (probabilistic hybrid automata) ซึ่งเป็นโดเมนที่ใช้ในระบบฝังตัวและระบบไซเบอร์-ฟิสิกส์

นอกจากนี้ยังมีเรื่องสำคัญอื่นๆที่ต้องศึกษาในบริบทของ PTA เช่น robustness และความล่าช้าของเวลาที่กระจายต่อเนื่อง (continuously-distributed time delays)



(a) Processor P_1

(b) Faulty version of processor P_1

(c) Processor P_1 with random delays

รูปที่ 2.8 แสดงผลโมเดล PTA จากกรณีศึกษาของความล่าช้าของเวลาที่กระจายต่อเนื่อง continuously-distributed time delays) [1]

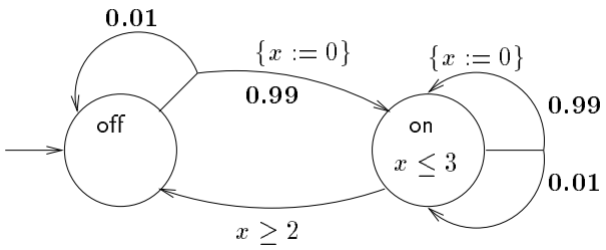
จากโมเดล PTA จากกรณีศึกษาของความล่าช้าของเวลาที่กระจายต่อเนื่อง (continuously-distributed time delays) PTA สำหรับตัวประมวลผล P1 ที่มีการล่าช้าแบบสุ่มถูกแสดงในรูปที่ 10 (c) โดยที่ได้ละเว้นป้ายชื่อของการกระทำหากไม่ต้องการซิงโครไนซ์เพิ่มเติม ตำแหน่งเพิ่มเติมถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อเข้ารหัสการล่าช้าแบบสุ่ม (Random Delay) ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการคูณ ด้วยความน่าจะเป็น 1/3 งานจะสำเร็จหลังจาก 2 หน่วยเวลา ด้วยความน่าจะเป็น 2/3 PTA จะเปลี่ยนไปยังตำแหน่งหนึ่งที่ด้วยความน่าจะเป็น 1/2 งานจะสำเร็จหลังจากหนึ่งหน่วยเวลาเพิ่มเติม (รวม 3 หน่วยเวลา) หรือเปลี่ยนไปยังตำแหน่งที่งานจะสำเร็จหลังจากสองหน่วยเวลาเพิ่มเติม (รวม 4 หน่วยเวลา) เมื่องานสำเร็จ PTA จะเปลี่ยนไปยังตำแหน่งที่ไม่อนุญาตให้เวลาผ่านได้ (นาฬิกา x จะถูกรีเซตเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งนี้และคุณสมบัติของตำแหน่งนั้นคือ x≤0) และทันทีแจ้งตัวจัดการว่างานได้รับการคำนวณผ่านการกระทำ p1 done เพื่อป้องกันให้ตัวจัดการมองเห็นอนาคตในการตัดสินใจในการทำงาน การเลือกโอกาสแบบสุ่มในการสำเร็จงานถูกทำขึ้นเมื่องานเสร็จสิ้นและไม่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้น

ข้อเสนอโครงงานมหาบัณฑิตนี้เห็นว่างานวิจัยของ Gethin Norman และคณะ ให้ ผลลัพธ์ของงานวิจัยเน้นไปที่ความสามารถของ Model Checking นำมาปรับใช้จำลองด้วยโปรแกรม PRISM ในการตรวจสอบคุณสมบัติของ PTA โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของเวลาและความน่าจะเป็น โดย

สามารถจำลองและวิเคราะห์การทำงานของระบบที่ใช้ PTA เพื่อปรับปรุงและปรับแก้ไขได้ ที่เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิค Model Checking เพื่อการตรวจสอบและจำลองโมเดล PTA ที่กำหนดด้วยการล่าช้าแบบสุ่มที่แจกแจงต่อเนื่องอย่างต่อเนื่อง (PTAs with continuously distributed random delays) สนใจในการกำหนด PTA ด้วย Random delays และนำมาใช้เขียนโปรแกรม PRISM ที่สอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดโดยใช้ภาษาโมเดล PRISM ในการพัฒนาและทดสอบ

2.2.3. งานวิจัย “Model Checking for Probabilistic Timed Systems” โดย Jeremy Sproston ในปีค.ศ. 2004 [6]

งานวิจัยของ Jeremy Sproston เสนอการตรวจสอบแบบจำลองของระบบเวลาแบบนับถอยหลังและระบบนับถอยหลังที่มีความน่าจะเป็น (Probabilistic Timed Systems) โดยใช้เทคนิคของ Model Checking ในการตรวจสอบคุณสมบัติและความถูกต้องของระบบ โดยผู้จัดทำโครงงานได้มองเห็นว่างานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอแนวคิดและกระบวนการตรวจสอบแบบจำลอง (Model Checking) สำหรับระบบเวลาแบบนับถอยหลังที่มีความน่าจะเป็น โดยใช้โครงข่าย Petri และโมเดลของ Timed Automata เพื่อแทนระบบและกฎของระบบ โดยการตรวจสอบนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติเช่น ความสมดุลของระบบเวลา ความเป็นไปได้ของการเกิดเหตุการณ์ในเวลาที่กำหนด และความถูกต้องของระบบที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 2.9 ตัวอย่างของ PTA ดังนี้



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของ PTA แบบจำลองสวิตช์ที่ผิดพลาดจากกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ [6]

จากแผนภาพดังกล่าวจากการศึกษาจากงานวิจัยนี้ การจำลองด้วย Automata ที่มีเวลาแบบนับถอยหลังที่มีความน่าจะเป็น (PTA) สามารถใช้ในการจำลองการทำงานของสวิตช์ไฟในส่วนรูปที่ 2.9 ในกรณีที่เกิดข้อผิดพลาด สมมติว่ากลไกของสวิตช์เสียเป็นอัตราส่วน 1% ซึ่งหมายความว่ามีโอกาส 1% ที่เมื่อกดสวิตช์แล้วไฟจะไม่เปิดขึ้น โมเดล probabilistic timed automaton ที่ได้จะ

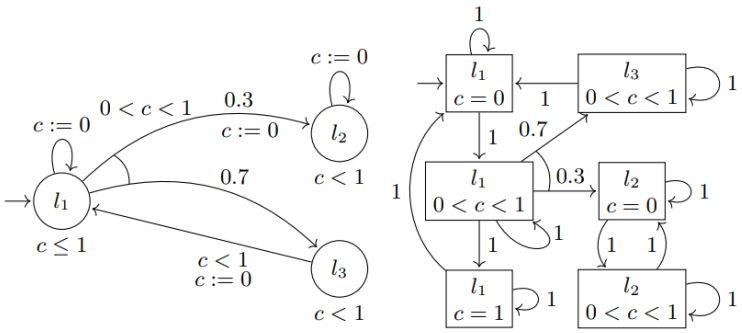
แสดงในรูปที่ 2.9 ในกรณีนี้ โมเดลประกอบด้วยสถานที่ที่มีการบันทึกเงื่อนไขของนาฬิกา แต่เส้นเชื่อมได้เปลี่ยนรูปแบบ เนื่องจากมีการแบ่งแยกทางที่เป็นความน่าจะเป็น เช่นในสถานะ off ไฟสามารถเปิดที่เวลาใดก็ได้ ซึ่งจะมีเส้นเชื่อมแยกแยะทางที่ออกจากสถานะนี้ หลังจากที่ตัดสินใจเรื่องการออกจากสถานะแล้ว จะมีการเลือกความน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่ง (เช่นสวิตช์เสียและสามารถกลับไปที่ off ด้วยความน่าจะเป็น 0.01) หรือทางเลือกอีกทางหนึ่ง (สวิตช์ทำงานและสามารถเปลี่ยนไปที่ on พร้อมกำหนดค่า 0 ให้กับนาฬิกา x ด้วยความน่าจะเป็น 0.99) จะถูกดำเนินการต่อไป จากการใช้ Probabilistic Timed Properties การตรวจสอบโมเดล PTA ด้วยการตรวจสอบโมเดลแบบเวลาและความน่าจะเป็น ข้อสมมติของโมเดลแบบนี้คือการกำหนดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับเวลาและความน่าจะเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ แสดงถึงตรรกะเวลาแบบเวลาและความน่าจะเป็นที่สามารถใช้สำหรับกำหนดคุณสมบัติของโมเดล PTA โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าตรรกะที่งานวิจัยนี้นำเสนอในส่วนนี้สามารถอ้างอิงค่าความน่าจะเป็นที่แน่นอนได้ โดยตรรกะของงานวิจัยนี้มีผลในการอ้างอิงค่าความน่าจะเป็นที่แน่นอน ในความแตกต่างกับ Tctl ที่นำเสนอในส่วนรูปที่ 2.9 ที่มีความสามารถในการอ้างอิงความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องกับความสูงกว่า 0 หรือเท่ากับ 1 ใช้วิธีการในการนิยามตรรกะที่นำความคิดจาก Tctl และตรรกะเวลาแบบน่าจะเป็นสูตร Probabilistic Timed Computation Tree Logic (PCTL) ใช้ตัวดำเนินการแบบความน่าจะเป็นเสมือนเป็นตัวดำเนินการเปรียบเทียบและ ทั้งสมาชิกของเซตข้อมูลที่สนใจใน AP ของ [0..1] เป็นความน่าจะเป็น

ข้อเสนอโครงงานมหาบัณฑิตนี้เห็นว่างานวิจัยของ Jeremy Sproston ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือและวิธีการในการตรวจสอบแบบจำลอง เพื่อเป็นแนวทางในการจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม PRISM [5] สำหรับระบบเวลาแบบนับถอยหลังที่มีความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบที่มีปัจจัยความน่าจะเป็นเข้ามาเกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการเขียนโปรแกรมและปรับใช้เครื่องมือและเทคนิคในการตรวจสอบแบบจำลองสำหรับระบบเวลาแบบนับถอยหลังที่มีความน่าจะเป็น โดยการนำ การกำหนดคุณสมบัติ (Probabilistic Timed Properties) ที่จะถูกไปปรับใช้ในเครื่อง PRISM

2.2.4. งานวิจัย “MDP + TA = Probabilistic Timed Automata, Formalized” โดย Simon Wimmer และคณะ ในปีค.ศ. 2018 [4]

งานวิจัยของ Simon Wimmer และคณะ เสนอการรวมโมเดล MDP และ TA เข้าด้วยกันเพื่อสร้างโมเดล PTA ที่เป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์ระบบ concurrent ที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาและการเลือกทางเลือกในการทำงานที่มีความน่าจะเป็น (Probabilistic choice) วิธีการที่นำเสนอใน

งานวิจัยนี้คือการแปลง MDP เป็น TA ก่อน โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการดำเนินการในระดับความสามารถที่ถูกต้อง เช่น การสร้างเส้นทางการพิสูจน์ในระดับต่างๆ เช่น Markov chains, MDPs, configuration traces, states และ state traces ของ PTA การระบุทฤษฎีและวิธีการในระดับสูงสุด รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของ PTA ดังนี้



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของ PTA ที่มีหนึ่งนาฬิกาและกราฟภูมิภาคจากกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ [4]

การนำเสนอกระบวนการย้ายระดับเพื่อสร้างความชัดเจนในการพิสูจน์ และการใช้งาน PTA ในการคำนวณและการวิเคราะห์ระบบ และงานวิจัยนี้ยังเสนอถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง เช่น การสร้างโมเดลต่างๆ ใช้ในการพิสูจน์แบบต่างๆ การใช้เทคนิคการสร้างโมเดลที่มีพื้นฐานทางคณิตศาสตร์อย่างเข้มงวด การพิสูจน์แบบโดเมนพิเศษ เช่นโดเมนแบบตัวผสม และการนำเสนอเรื่องราวที่สำคัญเพื่อการวิจัยในอนาคต ซึ่งในส่วนของงานวิจัยที่มาจะต้องได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาและปรับปรุงในหลายทิศทางที่สำคัญ เช่น การพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบโมเดลสำหรับเกมที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบนานาชาติ การพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบโมเดลสำหรับโดเมนแบบตัวผสม การศึกษาเกี่ยวกับความคงทน (robustness) และการล่าเสถียรภาพในขณะที่มีความล่าช้าทางเวลาแบบต่อเนื่อง และเป็นต้น Simon Wimmer และคณะ แสดงความคาดหวังว่างานวิจัยในอนาคตสามารถได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในการรวมกันระหว่าง MDP และ TA เพื่อสร้าง PTA ในลักษณะที่ได้รับการอธิบายไว้ข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เทคนิคการสำรวจพื้นที่ที่ใช้เลือกเส้นทาง (zone-based exploration methods) สำหรับการลดลงใน MDP แบบจำกัด อัลกอริทึมการเชื่อมโยงย้อนกลับของ PRISM [3] เป็นตัวอย่าง นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างเครื่องมือการตรวจสอบโมเดลที่ได้รับการยืนยันหรือรับรอง (verified or certified model checkers) สำหรับ PTA โดยใช้การรวมกันของเครื่องมือที่ได้รับการยืนยันสำหรับ MDPs และ TA งานวิจัยที่มีการพัฒนาในทิศทางนี้มีอยู่แล้วสำหรับองค์กรหลายแห่งในขณะนี้สำหรับการพิสูจน์และการตรวจสอบโมเดลแบบต่างๆสำหรับ TA แต่ยังไม่มีสำหรับ formalism

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อเสนอโครงงานมหาบัณฑิตนี้เห็นว่างานวิจัยของ Simon Wimmer และคณะ ให้ ผลลัพธ์-ของผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ PTA ที่สร้างขึ้นจากการรวม MDP และ TA ในการจำลองและวิเคราะห์ระบบ concurrent โดยสามารถใช้ PTA เพื่อคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดสถานการณ์ต่างๆ และใช้ในการเลือกเครื่องมือทางเลือกที่เหมาะสมในการทำงานในระบบ concurrent และทางผู้จัดทำโครงงานนำมาศึกษาให้ได้ข้อเปรียบเทียบการเลือก ประเภทโมเดลใน PRISM ที่ใช้เขียนโปรแกรมเป็นเครื่องมือจัดการตารางเดินเรือให้มีประสิทธิภาพต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
กระบวนการสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น

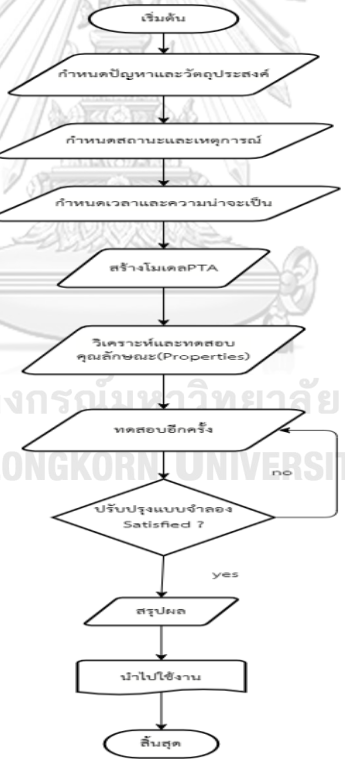
โครงงานมหาบัณฑิตนี้ได้ออกแบบและสร้างการจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น เพื่อจัดการตารางเดินเรือปรับปรุงวางแผนเส้นทางอย่างเหมาะสม ช่วยลดต้นทุนจากผลกระทบเดินเรือถึงกำหนดที่หมายล่าช้า โดยมีแนวคิดและวิธีการของการสร้างแบบจำลอง PTA โดยใช้เทคนิค Model Checking ที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความน่าจะเป็นและปรับปรุงประสิทธิภาพของการวางแผนตารางเดินเรือ (Vessel scheduling) ได้ด้วยการจำลองจากกำกหนดตารางเดินเรือ เพื่อตรวจสอบว่าสามารถวางแผนตารางเดินเรือได้โดยผ่านแบบจำลองจากปัจจัยที่ส่งผลต่อกำหนดตารางเดินเรือถึงกำหนดความล่าช้า และแสดงผลทดสอบและการวิเคราะห์ผ่านการเขียนโปรแกรมภาษา PRISM ด้วยเครื่องมือ PRISM Model Checker [5] และทวนสอบด้วยสูตร Probabilistic Timed Computation Tree Logic (PCTL) ตามที่ออกแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การทวนสอบที่ต้องการ

รูปที่ 3.1 แนวทางการดำเนินงานสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น

แนวทางการดำเนินงานในการสร้างแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น เพื่อหาค่า Probabilistic จากการพิจารณาค่าความน่าเป็นจากปัจจัยที่ส่งผลให้ถึงกำหนดล่าช้า และรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน โดยมีแนวทางการดำเนินงานทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.1. ศึกษาหลักการและหาแนวทางในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง การเดินเรือโดยใช้โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น

ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัย [1] ซึ่งได้วิเคราะห์เกี่ยวกับโครงสร้างและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของแหล่งข้อมูลของระบบ ที่ระบุถึงสถานะ, เหตุการณ์ และเซตการกะทำของข้อมูล โดยระบุถึงเส้นทางการเดินเรือที่ใช้ข้อมูลความน่าจะเป็นจากปัจจัยที่ศึกษาของค่าความน่าจะเป็นในรูปแบบโมเดล PTA [1] และได้ทำกระบวนการสร้างแบบจำลองและเขียนภาษา PRISM ผ่านเครื่อง PRISM Model Checker [5] และได้นำกระบวนการทำงานของเครื่องมืองานวิจัย [5] นำมาปรับใช้เพิ่มเติม ซึ่งมีการพัฒนาเครื่องโดยใช้ภาษา PRISM โดยการสร้างแบบจำลอง PTA



รูปที่ 3.2 กระบวนการทำงานของการสร้างแบบจำลอง PTA ที่ได้ออกแบบไว้

จากรูปที่ 3.2 จากการออกแบบกระบวนการสร้างแบบจำลอง PTA ที่ออกแบบไว้ มีกระบวนการดังนี้

3.1.1. กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์

- กำหนดปัญหาที่ต้องการแก้ไขและวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลอง
- ระบุข้อกำหนดและข้อจำกัดของระบบ

3.1.2. กำหนดสถานะและเหตุการณ์

- กำหนดสถานะต่างๆ บนเส้นทางการเดินเรือ, สถานะของสภาพอากาศ, สถานะความพร้อมของเครื่องยนต์เรือ, สถานะของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ ที่ระบบสามารถอยู่ได้
- กำหนดเหตุการณ์ที่สามารถเปลี่ยนสถานะของระบบ

3.1.3. กำหนดเวลาและความน่าจะเป็น

- กำหนดเวลาที่เหตุการณ์แต่ละอย่างจะเกิดขึ้น จาก 3 ปัจจัยที่ส่งผลล่าช้า สถานะของสภาพอากาศที่เหมาะสม, สถานะความพร้อมของเครื่องยนต์เรือ, สถานะของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ
- กำหนดความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง โดยกำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นโดยผู้ใช้งาน

3.1.4. สร้างโมเดล PTA

- ใช้ซอฟต์แวร์หรือเครื่องมือที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง PTA เช่น โปรแกรมวาด Diagram ต่างๆ เช่น Draw.io, mermaid diagram etc.
- ป้อนข้อมูลสถานะ, เหตุการณ์, เวลา, และความน่าจะเป็นที่ได้กำหนดไว้

3.1.5. การวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะ (Properties)

- ทำการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพ
- ทดสอบแบบจำลองในสถานการณ์ต่างๆ เพื่อดูว่ามันทำงานได้ดีแค่ไหนและตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่

3.1.6. ทดสอบอีกครั้ง และปรับปรุงแบบจำลอง

- หากพบว่ามีปัญหาหรือสามารถปรับปรุงได้ ให้ทำการปรับปรุงแบบจำลองทดสอบอีกครั้ง
- ทำการทดสอบและวิเคราะห์อีกครั้งเพื่อตรวจสอบว่าการปรับปรุงได้ผลหรือไม่
- ทำการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ตอบสนองต่อความต้องการและวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

3.1.7. สรุปผล

- หลังจากที่โมเดลได้รับการปรับปรุงและทดสอบจนพอใจแล้ว จะทำการสรุปผลการออกแบบและพัฒนา
- จากการสรุปผลและเตรียมพร้อมสำหรับการนำไปใช้งาน

3.1.8. นำไปใช้งาน

- นำแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาและทดสอบแล้วไปใช้งานในการวางแผนกำหนดการเดินเรือในสถานการณ์จริง

3.2. กำหนดองค์ประกอบสำคัญสำหรับโมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น PTA

การกำหนดการสร้างแบบจำลองการเดินเรือโดยใช้การออกแบบและสร้างแบบจำลองการเดินเรือโดยใช้โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) ต้องมีการวางแผนและใช้เครื่องมือที่เหมาะสมเพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบ กระบวนการและรายละเอียดในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง PTA ดังนี้

โมเดลไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) เป็นรูปแบบของออโตมาต้าที่รวมเอาความน่าจะเป็นและการวัดเวลาเข้าด้วยกัน โดยมีโครงสร้างหลักในรูปแบบของ Tuples ดังนี้

PTA = S, S_0, Act, C, T, Inv, AP, L, Prob

ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และคำอธิบายสำหรับ Tuples ของ PTA

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ตัวอย่างการใช้งาน
S	ชุดของสถานะ (States) แต่ละสถานะใน PTA แทนด้วยสถานะที่ระบบสามารถอยู่ได้	{สถานะของสภาพอากาศ, สถานะความพร้อมของเครื่องยนต์เรือ, สถานะของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ, สถานะของที่หมายท่าเรือ}
S_0	ชุดของสถานะเริ่มต้น (Initial States) สถานะที่ระบบอยู่เมื่อเริ่มต้นการทำงาน	{จุดเริ่มต้นของการเดินเรือ}
Act	ชุดของการกระทำ (Actions) การกระทำที่สามารถทำให้ระบบเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง	{เปลี่ยนเส้นทาง, เปลี่ยนหรือชะลอความเร็ว, หยุดเรือ}เหล่านี้จะเป็นผลถึงการนับเวลา Random delay
C	ชุดของนาฬิกา (Clocks) นาฬิกาใช้เพื่อวัดเวลาและควบคุมการเปลี่ยนสถานะของระบบ	นาฬิกาที่วัดเวลาการเดินทางหรือนาฬิกาที่วัดเวลาการรอคอย (Delay time) {Delay Time}
T	ชุดของการเปลี่ยนสถานะ (Transitions) แต่ละการเปลี่ยนสถานะประกอบด้วยสถานะเริ่มต้น, การกระทำ, สภาวะเงื่อนไขเวลา, การรีเซ็ตนาฬิกาหรือค่าการรอคอย (Delay), ความน่าจะเป็น Prob. (Probabilistic), และสถานะปลายทาง	จากสถานะ ท่าเรือไทยแหลมฉบัง (THLCH) ไปยัง สถานะท่าเรือสิงคโปร์ (SGSIN) ผ่านปัจจัยค่าความน่าจะเป็นที่ส่งผลกระทบให้เกิด Delay เมื่อเงื่อนไขเวลาและความน่าจะเป็นเป็นจริง ดูตัวอย่างด้านล่าง {(ท่าเรือ, เริ่มเดินทาง, การเดินทาง), (การเดินทาง, หยุด, ท่าเรือ)}
Inv	ฟังก์ชันการจำกัดเวลา (Clock Invariants) กำหนดข้อจำกัดเวลาสำหรับแต่ละสถานะ เพื่อให้แน่ใจว่าระบบจะอยู่ในสถานะนั้นได้ไม่เกินระยะเวลาที่กำหนด	สถานะ ท่าเรือไทยแหลมฉบัง (THLCH) ไปยัง สถานะท่าเรือสิงคโปร์ (SGSIN) ต้องอยู่ไม่เกิน 48 ชั่วโมง Inv(ในการเดินทาง) delay time ≤ 48hrs
AP	ชุดของประพจน์ประกาศที่ใช้ในการระบุคุณสมบัติของเส้นทางการเดินเรือ	{ความน่าจะเป็นที่การเดินเรือจะถึงจุดหมายปลายทางด้วยความล่าช้า <=48 ชั่วโมงหรือไม่, เรือถึงที่หมายท่าเรือไม่เกิดความล่าช้าจริงหรือไม่}

ตารางที่ 3.1 แสดงสัญลักษณ์และคำอธิบายสำหรับ Tuples ของ PTA (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ตัวอย่างการใช้งาน
L	ฟังก์ชันที่แมปจากสถานะไปยังชุดของประพจน์ประกาศที่เป็นจริงในสถานะนั้น	L(ท่าเรือ) = {เรืออยู่ในท่าเรือ}, L(การเดินทาง) = {ปัจจัยที่ส่งผลในการเดินทาง}
Prob	ฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่แมปจากการเปลี่ยนสถานะไปยังค่าความน่าจะเป็น, ใช้ในการระบุความไม่แน่นอนในการเดินทางหรือการเปลี่ยนสถานะ	ค่าความน่าจะเป็นของสถานะของสภาพอากาศไม่เหมาะสมต่อการเดินเรือ, ค่าความน่าจะเป็นของสถานะความพร้อมของเครื่องยนต์เรือไม่ดี, ค่าความน่าจะเป็นของสถานะของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ Prob(เปลี่ยนเส้นทางจากสถานะสภาพอากาศไม่ดี) = 0.02 โดยค่า Prob <= 1

กำหนดองค์ประกอบสำคัญสำหรับการสร้างโมเดล PTA จากการจำลองเส้นทางเดินเรือ จากการสร้างแต่ละ Tuples สำหรับ PTA จากโค้ดที่กำหนดสามารถสร้าง Tuples สำหรับ PTA ได้ดังนี้

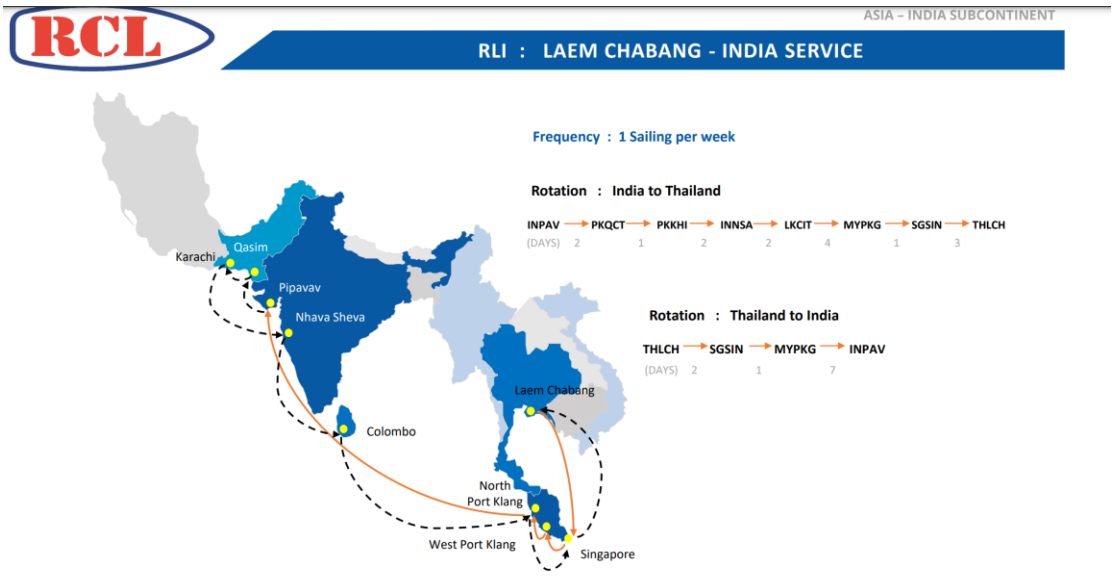
- States (S) เป็นชุดของตำแหน่งที่เรือสามารถอยู่ได้ รวมถึงสถานะที่เกี่ยวข้องกับเวลาล่าช้า
- Actions (Act) การกระทำที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของเรือและการเกิดล่าช้า
- Transitions ($\longrightarrow$) การเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะตามเวลาและเหตุการณ์ต่างๆ
- Clocks (delay, recdelay) นาฬิกาที่ใช้วัดเวลาล่าช้า (delay time) และนาฬิกาที่ใช้วัดเวลาล่าช้าสะสม (recdelay time)
- L (Labeling function) เป็นฟังก์ชันที่จับคู่แต่ละสถานะกับชุดของประพจน์พื้นฐานที่เป็นจริงในสถานะนั้น. ฟังก์ชันนี้กำหนดว่าประพจน์ใดบ้างที่ถูกติดป้ายกำกับให้กับสถานะที่กำหนด ตัวอย่างเช่น, ถ้าเรืออยู่ที่ท่าเรือ, ฟังก์ชัน L อาจกำหนด L("AtPort") = {"at_port"} และถ้าเรือกำลังเดินทาง, L("Sailing") = {"sailing"}
- AP (Atomic Propositions) เป็นชุดของประพจน์พื้นฐานที่สามารถเป็นจริงหรือเท็จในแต่ละสถานะของระบบ ประพจน์เหล่านี้ใช้สำหรับการอธิบายคุณสมบัติที่สามารถสังเกตได้หรือเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับสถานะนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ในการจำลองการเดินเรือ, AP อาจประกอบด้วย {"at_port", "sailing", "arrived"} ซึ่งแสดงถึงสถานะที่เรืออาจอยู่ ที่ท่าเรือ, กำลังเดินทาง, หรือถึงปลายทาง
- Prob (Probabilities) ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งหมดนี้รวมกันเพื่อสร้างรูปแบบโมเดล PTA ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3. กำหนดลำดับการทำงานของการทวนสอบ จากการออกแบบของแบบจำลอง

กำหนดให้ลำดับจากการทวนสอบแบบจำลองกำหนดการเดินเรือที่ถูกออกแบบด้วยโมเดล PTA จากโมเดล PTA ที่ใช้กรณีศึกษาจากตารางเดินเรือแต่ละท่า โดยระบุ state, action และ probabilistic transition ของระบบตามที่ต้องการจำลอง ด้วยการสร้างโมเดล PTA จากการจำลอง

การเดินเรือ ของบริการ RLI จากรูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองจากโมเดล PTA ที่จำลองการเดินเรือจากท่า THLCH ไป INPAV โดยผ่านปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการเดินทางถึงกำหนดล่าช้า โดยอ้างอิงจาก Route ที่ให้บริการแหลมฉบังสู่ท่าเรือของอินเดีย ที่กล่าวมาข้างต้น โดยมีรายละเอียดคำอธิบายของโมเดล PTA รูปที่ 3.3 ดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดงบริการเดินเรือจากท่าเรือไทยแหลมฉบังไปยังท่าเรืออินเดีย (RLI) [13]

การทำงานของโมเดล PTA สำหรับการทวนสอบค่าความน่าจะเป็นในการเดินเรือจากกรณีต้นแบบจากท่าที่ 1 ไปยังท่าที่ 2 หมายถึงท่าเรือไทยแหลมฉบัง (THLCH) ไปยังท่าเรือสิงคโปร์ (SGSIN) โดยต้องเดินทางไม่ล่าช้าเกิน 48 ชั่วโมง สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กำหนดสถานะ (States)
   - S0: ท่าเรือไทยแหลมฉบัง (THLCH)
   - S1: ในการเดินทางตรวจสอบปัจจัยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม
   - S2: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่เหมาะสม
   - S3: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม
   - S4: ในการเดินทางตรวจสอบปัจจัยสภาพความพร้อมเครื่องยนต์เรือ
   - S5: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือดี
   - S6: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือไม่ดี
   - S7: ในการเดินทางตรวจสอบปัจจัยสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ
   - S8: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือน้อย
   - S9: ในการเดินทางค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือมาก
   - S10: ท่าเรือสิงคโปร์ (SGSIN)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. กำหนดสถานะเริ่มต้น (Initial State)
   - S0: ท่าเรือไทยแหลมฉบัง (THLCH)
3. กำหนดการกระทำ (Actions)
   - A0: เริ่มเดินทาง
   - A11: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่เหมาะสม
   - A12: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม
   - A13: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมเพิ่มขึ้น
   - A14: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมลดลง
   - A21: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือดี
   - A22: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือไม่ดี
   - A23: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือไม่ดีเพิ่มขึ้น
   - A24: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยความพร้อมเครื่องยนต์เรือไม่ดีลดลง
   - A31: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือดี
   - A32: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือไม่ดี
   - A33: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือไม่ดีเพิ่มขึ้น
   - A34: ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยมีความหนาแน่นของท่าเรือไม่ดีลดลง
   - A4: ถึงที่หมาย
4. กำหนดนาฬิกา (Clocks)
   - delay: นาฬิกาที่วัดเวลาการเดินทางล่าช้าแต่ละท่าเรือ
   - recdelay: นาฬิกาที่วัดเวลาการเดินทางล่าช้าสะสมทั้งระบบ
5. กำหนดการเปลี่ยนสถานะ (Transitions)
   - T0: (S0, A0, S1)
   - T1: (S1,A11, S2,S4 $t \leq 48$)
   - T2: (S4, A21, S5,S7, $t \leq 48$)
   - T3: (S7, A32, S8,S10, $t \leq 48$)
6. กำหนดเงื่อนไขเวลา (Clock Constraints)
   - $t \leq 48$: เวลาที่ใช้ในการเดินทางไม่ควรเกิน 48 ชั่วโมง
7. กำหนดประพจน์ประกาศ (Atomic Propositions)
   - P_0: สภาพอากาศไม่เหมาะสมต่อการเดินเรือ
   - P_1: ความพร้อมของเครื่องยนต์เรือไม่ดี
   - P_2: สภาพความหนาแน่นของท่าเรือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. กำหนดฟังก์ชันประพจน์ประกาศ (Labeling Function)

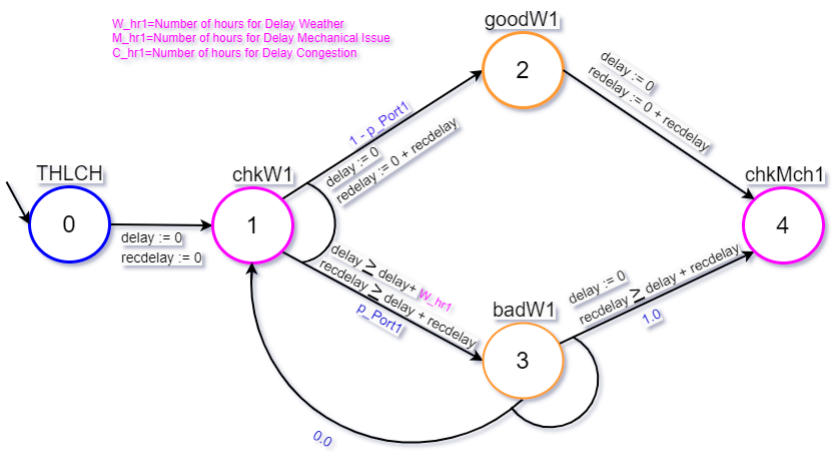
- L(S0) = {“Sailing”}
- L(S1) = {P0, P1, P2}
- L(S10) = {“at_port”}
- L(S10) = {“Arrived”}

9. กำหนดฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Function)

- Prob(T0) = 1
- Prob(T1) = 1 - Prob(P0) * 1- Prob(P1) * 1- Prob(P2)
- Prob(T2) = Prob(P0) * Prob(P1) * Prob(P2)

10. วิเคราะห์และทดสอบ

- ใช้เครื่องมือวิเคราะห์เพื่อทดสอบว่าเรือสามารถเดินทางจากท่าเรือไทยแหลมฉบังไปยังท่าเรือสิงคโปร์ภายในเวลา 48 ชั่วโมงได้หรือไม่



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโมเดล PTA จาก Portที่1 ถึง Portที่ 2 ผ่านปัจจัย 3 ประการที่ส่งผลล่าช้า

ตัวอย่าง พิจารณาสูตร PCTL หากกำหนด P≤0.9 [(F "CheckMechanicalIssue")] หรือ P≤0.9 [(F S=4)]

สูตรนี้ไม่ได้รับการยืนยัน (not satisfied) ในสถานะ s_0 = s_0 $\not\models$ P≤p [Φ1 U≤k Φ2]

จากรูป 3.4 กำหนด p_Port1 = 0.5 และ "CheckMechanicalIssue" คือจุดที่ 4 = S4 = chkMc1

Prob (s_0, F "CheckMechanicalIssue") = (1 - 0.5) + (0.5) = 1.0

แสดงตัวอย่างของการพิสูจน์ที่ขัดแย้ง (Counterexamples) จากรูป 3.4

C_0 = {$s_0s_1s_2s_4$, $s_0s_1s_3s_4$}

$P_{s0}(C) = (1-0.5) + (0.5) = 1.0$

ชุดของเส้นทางภายในโมเดลข้างต้นนี้ที่แสดงให้เห็นว่าสูตร PCTL หรือเงื่อนไขที่กำหนดพิสูจน์ได้ว่าว่าสูตร PCTL ไม่ถูกต้องหรือไม่เป็นจริงในสถานะหรือสภาวะที่กำหนดไว้ในโมเดล

หากปรับเปลี่ยนสูตร PCTL = P≥0.9 [(F "CheckMechanicalIssue")] หรือ P≥0.9 [(F S=4)]

สูตรนี้จะได้รับการยืนยัน (satisfied) ในสถานะ $s_0 = s_0 \models P{\geq}p\ [\ \Phi 1\ U{\leq}k\ \Phi 2\ ]$

อธิบายสัญลักษณ์จากสูตรข้างต้น

ตารางที่ 3.2 อธิบายเครื่องหมายที่ใช้ในสูตร PCTL เพื่อกำหนด PCTL ใน PRISM Model Checker

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Φ	path formula ที่อธิบายเงื่อนไขของเส้นทางที่สนใจ
P≥p	"ความน่าจะเป็นอย่างน้อย p" โดยที่ p เป็นค่าความน่าจะเป็นที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นตัวเลขระหว่าง 0 และ 1
⊨	ชื่อว่า "models" หรือ "satisfies" และมีการใช้งานในบริบทต่างๆ
X	(next) ความน่าจะเป็นที่สถานะถัดไปจะตรงตามเงื่อนไข
G	(globally) ความน่าจะเป็นที่เงื่อนไขจะเป็นจริงตลอดเวลา
U	(until) ความน่าจะเป็นที่เงื่อนไขหนึ่งจะเป็นจริงจนกระทั่งเงื่อนไขอื่นเป็นจริง
F	(finally) ความน่าจะเป็นที่เงื่อนไขจะเป็นจริงในอนาคตที่ไม่ระบุเวลา

ตารางการทวนสอบค่าความน่าจะเป็นจากโมเดล PTA สามารถทำได้โดยการรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทวนสอบและจัดเรียงข้อมูลเหล่านั้นในรูปแบบที่เข้าใจง่ายและสามารถวิเคราะห์ได้ จากรูปที่ 3.4 ตามที่ออกแบบไว้ อธิบายด้วยตารางแสดงผลและรายละเอียดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างโมเดล PTA ประกอบด้วยคอลัมน์ต่างๆ ดังนี้

1. เหตุการณ์ (Event) รายการของเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือที่สามารถเกิดขึ้นได้ในโมเดล PTA
2. ค่าความน่าจะเป็น (Probability) ค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์นั้นจะเกิดขึ้น
3. ช่วงเวลา (Time Bounds) ช่วงเวลาที่กำหนดสำหรับเหตุการณ์นั้นๆ ที่จะเกิดขึ้น
4. ผลลัพธ์ที่คาดหวัง (Expected Outcome) ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นหากเหตุการณ์นั้นเกิดขึ้นจริง
5. ความเสี่ยง (Risk) การประเมินความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์นั้นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6. หมายเหตุ (Notes) ข้อมูลเพิ่มเติมหรือหมายเหตุที่สำคัญเกี่ยวกับเหตุการณ์หรือค่าความน่าจะเป็น ตัวอย่างตารางสรุปดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 สรุปภาพรวมของความน่าจะเป็นและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือ

เหตุการณ์	ค่าความน่าจะเป็น	ช่วงเวลา	ผลลัพท์ที่คาดหวัง	ความเสี่ยง	หมายเหตุ
สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม (Bad Weather)	badWeather (i.g. 0.02)	0-6 ชั่วโมง ตั้งค่าเริ่มต้น ตัวอย่างการนำไปใช้งาน {t} = delay time = set value as suitability delay time (i.g. 0-6 hrs. จาก THLCH to SGSIN)	ความล่าช้าในการเดินทาง Delay time > 0 ,Sum of total delay time occurred	ปานกลาง	เกิดความล่าช้า และนับ Clock ของ delay time สะสม ที่ส่งผล 30% ของปัจจัยทั้งหมด ต้องมีการตรวจสอบพยากรณ์อากาศอย่างใกล้ชิด
สภาพความไม่พร้อมเครื่องยนต์เรือ (Mechanical Issue)	MechanicalIssue (i.g. 0.01)	ไม่กำหนดที่แน่นอน ตัวอย่างการนำไปใช้งาน {t} = delay time = set value as suitability delay time	การเดินเรือหยุดชะงัก [Delay time > 0 ,Sum of total delay time occurred]	ต่ำ	เกิดความล่าช้า และนับ Clock ของ delay time สะสม ที่ส่งผล 10% ของปัจจัยทั้งหมด ต้องมีการบำรุงรักษาเรืออย่างสม่ำเสมอ
สภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด (Congestion)	BadCongestion (i.g. 0.05)	ช่วงเวลาเร่งด่วน ตัวอย่างการนำไปใช้งาน {t} = delay time = set value as suitability delay time	ความล่าช้าในการเข้าเทียบท่า ตัวอย่างการนำไปใช้งาน [Delay time > 0 ,Sum of total delay time occurred]	สูง	เกิดความล่าช้า และนับ Clock ของ delay time สะสม ที่ส่งผล 60% ของปัจจัยทั้งหมด อาจต้องมีการเปลี่ยนเส้นทางหรือชะลอหรือหยุดพักการเดินเรือเพื่อหลีกเลี่ยง

ตารางนี้จะช่วยให้สามารถเข้าใจภาพรวมของความน่าจะเป็นและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือได้ดีขึ้น และสามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อวางแผนและตัดสินใจได้อย่างมีข้อมูลครบถ้วน ข้อมูลในแต่ละคอลัมน์ควรจะถูกตรวจสอบและปรับปรุงอย่างละเอียดเพื่อให้สะท้อนถึงสถานการณ์จริงที่เรืออาจเผชิญได้ในระหว่างการเดินทาง เพื่อออกแบบบางส่วนจากโมเดล PTA ที่ได้ ดังรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4. นำเข้าข้อมูลตารางการเดินเรือ จากกรณีศึกษาใช้พิจารณากำหนดค่าความน่าจะเป็นโดยผู้ใช้งาน

การนำเข้าข้อมูลตารางการเดินเรือสำหรับบริการ LAEM CHABANG - INDIA SERVICE และการกำหนดค่าความน่าจะเป็นโดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นจากสถิติของข้อมูลการเดินเรือที่ผ่านมานำมาวิเคราะห์ และปรับปรุงให้ได้ค่าความน่าจะเป็นให้ใกล้เคียงและเป็นการกำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้น เพื่อให้ในการทดลอง โดยการนำเข้าข้อมูลดังนี้

1. นำเข้าข้อมูลตารางการเดินเรือข้อมูลตารางการเดินเรือสามารถนำเข้ามาจากไฟล์ หรือฐานข้อมูลอื่นๆ โดยมีรูปแบบข้อมูลดังนี้

Transit Time : West Bound

POL	TERMINAL		SGSIN	MYPKG(W)	MYPKG(N)	INPAV
			FRI	MON	MON	MON
THLCH	Hutchison Laem Canbang Terminal (C1C2)	WED	2	4	5	12
SGSIN	Keppel Terminal (PSA)	SAT	-	1	2	9
MYPKG	West Port Malaysia	SUN	-	-	-	8
MYPKG	North Port (M) BHD	MON	-	-	-	7

รูปที่ 3.5 เวลามาตรฐานที่ใช้ประมาณการในตารางการเดินเรือสำหรับบริการ (RLI)

ตารางที่ 3.4 แสดงสถิติของข้อมูลการเดินเรือถึงท่าตามกำหนดล่าช้าสำหรับบริการ (RLI) และพิจารณาได้ค่าความน่าจะเป็นของปีที่ผ่านมาในปี 2020

PORT TERMINAL	HR(s)	Year:= 2020	ค่าความน่าจะเป็นความล่าช้า	Prob.
THLCH	no delay	27	0.613636364	1
	delay	17	0.386363636	
SGSIN	no delay	55	0.964912281	1
	delay	2	0.035087719	
MYPKG	no delay	87	1	1
	delay	0	0	
INPAV	no delay	22	1	1
	delay	0	0	
Grand Total		210		

ตารางที่ 3.5 แสดงเวลามาตรฐานที่ใช้ในการเดินทางถึงท่าที่หมายของแต่ละท่าเรือ อ้างอิงจากรูปที่ 3.5

ลำดับ	ท่าเรือต้นทาง	ทางเรือปลายทาง	เวลาออก (ชม.)	เวลาออก (ชม.)	ระยเวลาการเดินทาง (ชม.)
1	THLCH	SGSIN	0	48	48
2	SGSIN	MYPKG	48	120	120
3	MYPKG	INPAV	120	288	288

2. กำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นโดยผู้ใช้งาน

ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นสำหรับแต่ละปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการเดินเรือได้ และปรับแต่งค่าความน่าจะเป็นให้มีความใกล้เคียงกลับสถิติข้อมูลจริงเพื่อให้ได้ค่าความน่าจะเป็นที่แม่นยำที่สุด โดยการปรับแต่งคำนึงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความล่าช้าของการเดินเรือ สำรวจสอบถามจากผู้ใช้งานปัจจัยที่ส่งผลวัดจากสถิติและการเดินเรือที่ประสบกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการเดินเรือ รวมไปถึงเรือเทียบท่า เรียงลำดับจากมากไปน้อย สภาพความหนาแน่นของท่าเรือส่งผล 60%, สภาพอากาศไม่เหมาะสมต่อการเดินเรือส่งผล 30% และความพร้อมของเครื่องยนต์เรือไม่ดีส่งผล 10% จากผลที่มีอิธิพลต่อปัจจัยความล่าช้าทั้ง 100% และการปรับแต่งค่าคามน่าจะเป็นจะปรับค่าเริ่มจากปัจจัยที่มีผลกระทบน้อยไปหามาก โดยการปรับแต่งค่าความน่าจะเป็น โดยการคำนวณค่า Scaling Factor (SF) ที่เป็นกระบวนการที่ใช้ในการปรับขนาดของชุดข้อมูลหรือค่าความน่าจะเป็นให้มีผลรวมเท่ากับหรือใกล้เคียงค่าเป้าหมายที่กำหนด Target Probability Sum (TPS)

1. การกำหนดค่า TPS ผลรวมของความน่าจะเป็นที่ต้องการสำหรับชุดข้อมูลหรือสถานการณ์ที่กำลังพิจารณา ซึ่งในกรณีนี้คือ ค่า delay ของแต่ละท่าเรือ (Port Terminal) จากตารางที่ 3.4

2. การคำนวณค่า SF คือปัจจัยที่ใช้ในการคูณกับค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเพื่อให้ผลรวมของค่าความน่าจะเป็นหลังจากการปรับขนาดเท่ากับ TPS สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร โดยที่ Sum of initial probabilities คือผลรวมของค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นที่ยังไม่ได้ปรับขนาด

3. การปรับขนาดค่าความน่าจะเป็น หลังจากได้ค่า SF แล้ว จะทำการคูณค่านี้กับค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นของแต่ละสถานการณ์เพื่อได้ค่าความน่าจะเป็นใหม่ที่มีผลรวมเท่ากับ TPS จากค่า delay ตารางที่ 3.4 แล้วทำการทวนสอบให้ผลค่าความน่าจะเป็นใกล้เคียงกับข้อมูลในตารางที่ 3.4 โดยมีค่าความต่าง (Diff.) ไม่เกิน 10% โดยทำการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นที่ถูกสำรวจสอบถามจากผู้ใช้งานจริง และนำค่าความน่าจะเป็นมาปรับแต่งให้ใกล้ข้อมูลสถิติที่น่าเชื่อถือมากขึ้น

Port	ค่าสถานะของสภาพอากาศไม่เหมาะสมต่อการเดินเรือ (Prob)	ค่าสถานะความพร้อมของเครื่องยนต์เรือไม่ดี (Prob)	ค่าสถานะของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ (Prob)	ผลรวมของค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้น (Sum of initial probabilities)	TPS จากตารางที่ 3.4	SF	ค่าความน่าจะเป็นใหม่หลังจากการปรับแต่งให้ใกล้ข้อมูลสถิติ ตารางที่ 3.4 {Prob_badWeater_new: Prob_mechanicalIssue_new: Prob_congestion_new } Weight {30: 10: 60}
1 THLCH	0.02	0.01	0.05	0.08	0.035087719	0.4385964875	0.00877192975 : 0.004385964875 : 0.021929824375
2 SGSISN	0.03	0.01	0.05	0.09	0	0	0 : 0 : 0
3 MYPKG	0.025	0.015	0.055	0.095	0.386363636	5.1515151466 6667	0.103030302933333 : 0.0772727272 : 0.206060605866667
4 INPAV	0.02	0.015	0.04	0.075	0	0	0 : 0 : 0

ผู้ใช้งานสามารถป้อนค่าความน่าจะเป็นใหม่จากตารางที่ 3.6 จากคอลัมน์ “ค่าความน่าจะเป็นใหม่หลังจากการปรับแต่งให้ใกล้ข้อมูลสถิติ ตารางที่ 3.4 {Prob_badWeater_new: Prob_mechanicalIssue_new: Prob_congestion_new} Weight {30: 10: 60}” นี้ผ่านทางหน้าจอป้อนข้อมูลหรือไฟล์คอนฟิกูเรชัน

3. คำนวณและวิเคราะห์

หลังจากที่ข้อมูลตารางการเดินเรือและค่าความน่าจะเป็นถูกนำเข้าและกำหนดแล้ว ระบบสามารถทำการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาความน่าจะเป็นในการเดินทางสำเร็จและความน่าจะเป็นในการเกิดสถานะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5. กำหนดกฎและเงื่อนไขเริ่มต้นของค่าความน่าจะเป็น จากผู้ใช้งานให้กับโมเดล PTA

กำหนดกฎเงื่อนไขเริ่มต้นของโมเดล โดยระบุสถานะเริ่มต้นและค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้น โดยที่โมเดล PTA เป็นโมเดลที่ใช้ในการจำลองระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (timed) และมีการเกิดเหตุการณ์ที่เป็นสุ่ม (probabilistic) เมื่อนำทฤษฎี Random delay และค่า Clock นับเวลาความล่าช้ามาใช้ในโมเดล PTA เพื่อนำค่า Probability จาก 3 ปัจจัยที่สนใจคือ สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม , ความไม่พร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง, และความหนาแน่นของท่าเรือแออัด จากปัจจัยค่าความน่าจะเป็นที่สนใจ หาความน่าจะเป็นในการเดินทางสำเร็จและความน่าจะเป็นในการเกิดสถานะเหตุการณ์ที่สนใจต่อการทวนสอบโมเดล PTA สำหรับกำหนดการเดินเรือเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อนและต้องใช้ความระมัดระวังในการดำเนินการตามเงื่อนไขของกฎสำหรับค่าเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นจากวัตถุประสงค์ที่ต้องการทวนสอบผ่าน สูตร PCTL เริ่มต้นตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบโมเดล PTA

- กำหนดสถานะและการเปลี่ยนแปลงสถานะตามเงื่อนไขเวลาความล่าช้าและความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือ โดยงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญต่อ ปัจจัยที่ทางผู้วิจัยสรุปและรวบรวม คือ

ค่าความน่าจะเป็นสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมต่อการเดินเรือ (Bad Weather)

ค่าความน่าจะเป็นของสภาพความไม่พร้อมของเครื่องยนต์เรือ (Mechnical Issue)

ค่าความน่าจะเป็นของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด (Congestion Port Terminal)

- กำหนดตัวแปรเวลาและนาฬิกาจากความล่าช้าที่เกิดขึ้นเพื่อติดตามเวลาที่ผ่านไปและกำหนดเงื่อนไขเวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงสถานะ

- กำหนดเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้และความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์เหล่านั้น

จากตารางที่ 3.6 ได้กำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นและปรับแต่งให้เหมาะสมแล้ว ต่อไปนี้แสดงการกำหนดค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสถานะดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าตัวแปรนาฬิกาจากความล่าช้าที่สุ่มมาจากผู้ใช้งานผ่านการประเมินจากค่าสถิติ

ท่า/ เหตุการณ์	สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม (ชั่วโมง)	สภาพความไม่พร้อมเครื่องยนต์เรือ (ชั่วโมง)	สภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด (ชั่วโมง)	ค่าความน่าจะเป็นที่ปรับให้มีความยืดหยุ่น เริ่มต้น
THLCH	6	1	8	0.1
SGSIN	2	1	5	0.1
MYPKG	16	5	24	0.1
INPAV	4	2	9	0.1

จากตารางที่ 3.7 สร้างเพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการติดตามเวลาที่ถูกใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงสถานะจากเหตุการณ์ที่สนใจจากปัจจัยที่ส่งผลเกิดความล่าช้า

2. การกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ

- กำหนดคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบในรูปแบบของสูตรตรรกะเชิงเวลา (Temporal Logic) เช่น Computation Tree Logic (CTL) หรือ Linear Temporal Logic (LTL)

- กำหนดคุณสมบัติเหล่านี้ในไฟล์ .pctl (Probabilistic Timed Computation Tree Logic) หรือ .csl (Cost Specification Language) สำหรับการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายหรือเวลา

ตัวอย่างจากการออกแบบคุณสมบัติการตรงสอบโดยใช้สูตร PCTL เป็นภาษาสำหรับการระบุคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์โมเดลที่มีความไม่แน่นอนหรือความน่าจะเป็น เช่น Markov chains และ Markov decision processes ในโปรแกรม PRISM Model Checker [5] ซึ่งเป็นเครื่องมือ

Chulalongkorn University

สำหรับการวิเคราะห์โมเดลที่มีความน่าจะเป็น PCTL ถูกใช้เพื่อระบุคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบบนโมเดลเหล่านั้น นี่คือเหตุผลที่ PCTL ถูกใช้ใน PRISM

- การระบุความน่าจะเป็น PCTL อนุญาตให้ผู้ใช้ระบุคุณสมบัติที่มีความน่าจะเป็น เช่น "ความน่าจะเป็นที่ระบบจะล้มเหลวภายใน 5 นาทีน้อยกว่า 0.01"
- การวิเคราะห์เวลา PCTL สามารถระบุคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับเวลา เช่น "ความน่าจะเป็นที่สถานะเฉพาะจะถูกเข้าถึงภายในเวลาที่กำหนด"
- การสนับสนุนการตัดสินใจ ในโมเดลที่มีการตัดสินใจ (เช่น Markov decision processes) PCTL สามารถใช้เพื่อระบุคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเลือกการกระทำที่ดีที่สุดตามความน่าจะเป็น
- การวิเคราะห์ที่มีความซับซ้อน PCTL สามารถระบุคุณสมบัติที่ซับซ้อนได้ เช่น คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเหตุการณ์หลายอย่างในลำดับหรือการรวมกันที่เฉพาะเจาะจง
- การวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้ การใช้ PCTL ใน PRISM ช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์ที่เชื่อถือได้และมีความแม่นยำสูง เนื่องจาก PRISM ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เข้มงวดในการคำนวณความน่าจะเป็น
- การสนับสนุนการวิเคราะห์อัตโนมัติ PCTL ช่วยให้การวิเคราะห์โมเดลสามารถทำได้อย่างอัตโนมัติ, ทำให้ผู้วิจัยและผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบคุณสมบัติที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย
- การสนับสนุนการวิเคราะห์หลายมิติ PCTL ช่วยให้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติที่มีหลายมิติได้ เช่น การพิจารณาทั้งความน่าจะเป็นและเวลาในคราวเดียว

3. การใช้เครื่องมือทวนสอบโมเดล

- นำเข้าโมเดล PTA และไฟล์คุณสมบัติที่กำหนดไว้ลงในเครื่องมือทวนสอบโมเดล ด้วยเครื่องมือ PRISM Model Checker
- ตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการทวนสอบ เช่น ขอบเขตของเวลาหรือค่าความน่าจะเป็นที่ต้องการจากการกำหนดและปรับแต่งในตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7

4. การทวนสอบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

- เริ่มกระบวนการทวนสอบโมเดลและรอให้เครื่องมือทำงานจนเสร็จ
- วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทวนสอบ เช่น ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ หรือการประเมินเวลาที่คาดว่าจะใช้

5. การปรับแต่งโมเดล

- หากผลลัพธ์ไม่ตรงกับความคาดหวังหรือมีปัญหาที่พบ ให้กลับไปปรับแต่งโมเดล PTA และคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ทำการทวนสอบใหม่หลังจากทำการปรับแต่ง

6. การตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล
   - ใช้ข้อมูลจริงหรือการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล PTA ที่ได้จากการทวนสอบ
   - ปรับปรุงโมเดลตามข้อมูลจริงเพื่อให้ได้โมเดลที่สามารถทำนายผลได้อย่างแม่นยำ
7. การสรุปและการรายงาน
   - สรุปผลลัพธ์และข้อสรุปที่ได้จากการทวนสอบ
   - จัดทำรายงานเพื่อนำเสนอผลลัพธ์และข้อแนะนำสำหรับการปรับปรุงกำหนดการเดินเรือ

การทวนสอบโมเดล PTA ต้องใช้ความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับโมเดลที่กำลังทำงานอยู่และความสามารถในการตีความผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือทวนสอบโมเดลอย่างถูกต้องเพื่อนำไปสู่การปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพ

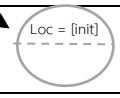
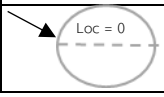
3.6. สร้างโมเดล PTA ตามการออกแบบ จากองค์ประกอบสำคัญที่ออกแบบ

ขั้นตอนรายละเอียดในการสร้าง PTA จากการกำหนดองค์ประกอบสำคัญจากการใช้ Tuples ที่ประกอบของโมเดล PTA จากตารางที่ 3.1 โดยในตารางแสดงค่าความน่าจะเป็น (Probability) ที่กำหนดให้ในแต่ละเหตุการณ์ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนและปรับค่าตามความเหมาะสมของระบบได้ตามต้องการ และการให้ค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากข้อมูลสถิติจากฐานข้อมูลกำหนดตารางการเดินเรือที่ได้จากผู้ใช้งานและปรับแต่งค่าให้แม่นยำจากตารางที่ 3.6

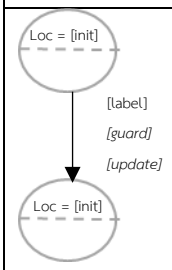
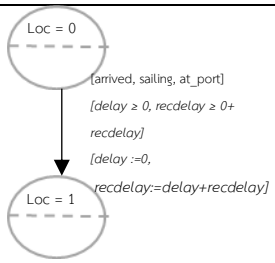
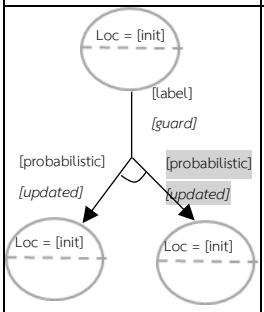
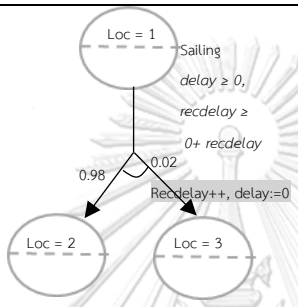
ดังนั้นโมเดล PTA ที่สร้างขึ้นจะมีโหนดและเส้นเชื่อมตามที่กำหนดไว้ในตาราง โดยในแต่ละโหนดจะมีการระบุตำแหน่ง ท่าเรือที่เดินทาง, ปัจจัยที่เกิดความล่าช้าของค่าความน่าจะเป็น (Probability) และจะนับค่า Clock ของความล่าช้า (Delay Time) ที่เป็นเงื่อนไขเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นและนับ clock ที่ถูกสะสมตามแบบจำลอง PTA และการนำ Random delay มาคำนวณตามโมเดล PTA และแปลงโมเดลนำมาเขียนโปรแกรม PRISM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.8 แสดงกฎและเงื่อนไขที่ได้จากหัวข้อ 3.2 - 3.5 ในการสร้างโมเดล PTA [3]

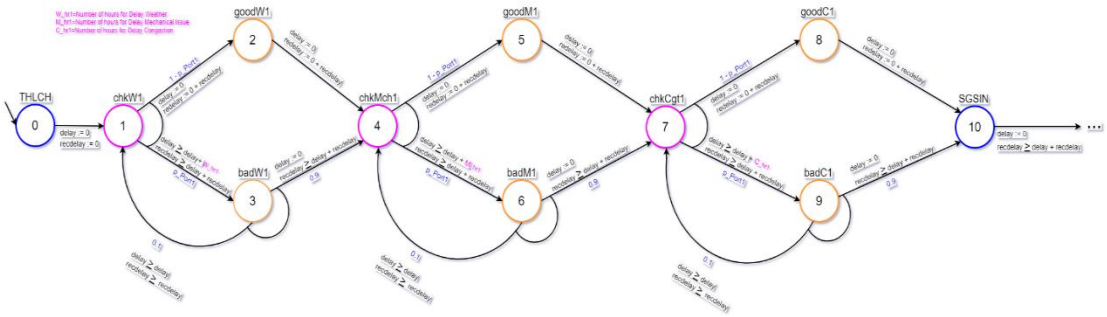
องค์ประกอบของโมเดล PTA	โมเดล PTA ที่ออกแบบ	คำอธิบาย
ตัวแปรในโมเดล	Loc, delay, recdelay	Loc = ตำแหน่งที่เกิดสถานะ, delay = นาฬิกานับค่าความล่าช้าแต่ละท่าเรือ, recdelay = นาฬิกานับค่าความล่าช้าสะสมจากทุกสถานะที่ผ่าน
		โหนดหรือชุดของสถานะเริ่มต้น (Initial States) สถานะที่ระบบอยู่เมื่อเริ่มต้นการทำงาน

ตารางที่ 3.9 แสดงกฎและเงื่อนไขที่ได้จากหัวข้อ 3.2 - 3.5 ในการสร้างโมเดล PTA [3] (ต่อ)

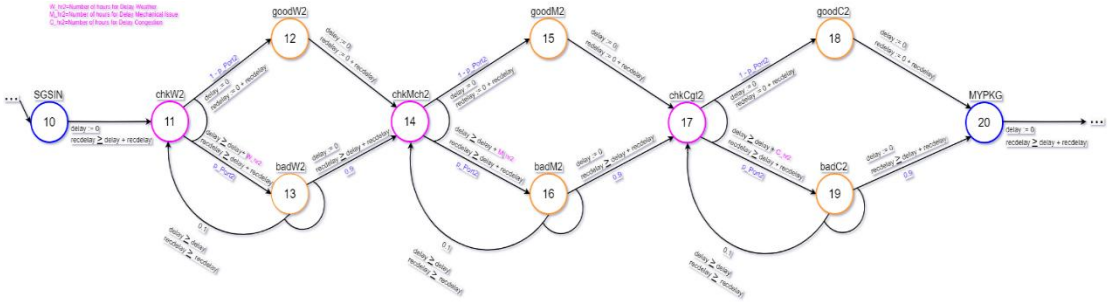
องค์ประกอบของโมเดล PTA	โมเดล PTA ที่ออกแบบ	คำอธิบาย
		เส้นเชื่อมเพื่ออธิบายเงื่อนไขและอัปเดตตัวแปรค่านาฬิกาความล่าช้าและสถานะที่ย้ายที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
		ค่าความน่าจะเป็นอธิบายถึงความเป็นไปได้ที่สถานะหนึ่งหรือหลายสถานะสามารถอัปเดตได้ เช่น เมื่อตำแหน่ง 1 จะเป็นค่า ของตัวแปร delay และ recdelay มากกว่าหรือเท่ากับ 1 และค่าของความพยายามมากกว่า มีโอกาส 98% ที่จะไปที่ตำแหน่ง 2 และโอกาส 2% ที่จะอัปเดตความพยายามของตัวแปรและตัวแปร delay และ recdelay ไปที่ตำแหน่ง 3 ยกตัวอย่างจากรูปที่ 3.4

จากปัจจัยที่ส่งผลต่อความล่าช้า โดยกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากหัวข้อที่ 3.2 – 3.5 นำมาสร้างโมเดล PTA จากการจำลองกำหนดการเดินเรือ โดยอ้างอิงจากบริการเดินเรือจากท่าเรือไทยแหลมฉบังไปยังท่าเรืออินเดีย (RLI : LAEM CHABANG - INDIA SERVICE) ดังรูปที่ 3.3 ดังนี้ จากหัวข้อ 3.2 กำหนดองค์ประกอบสำคัญสำหรับการโมเดล PTA จากตารางที่ 3.9 และหัวข้อที่ 3.3 กำหนดลำดับการทำงานของโมเดล PTA สามารถนำมาปรับใช้สร้างแบบจำลองการเดินเรือจากโมเดล PTA ได้ 4 รูปที่ทำงานต่อเนื่องกัน โดยแบ่งการเดินทางจากท่าเรือเริ่มต้นไปยังปลายทางโดยผ่านปัจจัยส่งผลถึงความล่าช้า 3 กลุ่มหลักๆดังนี้

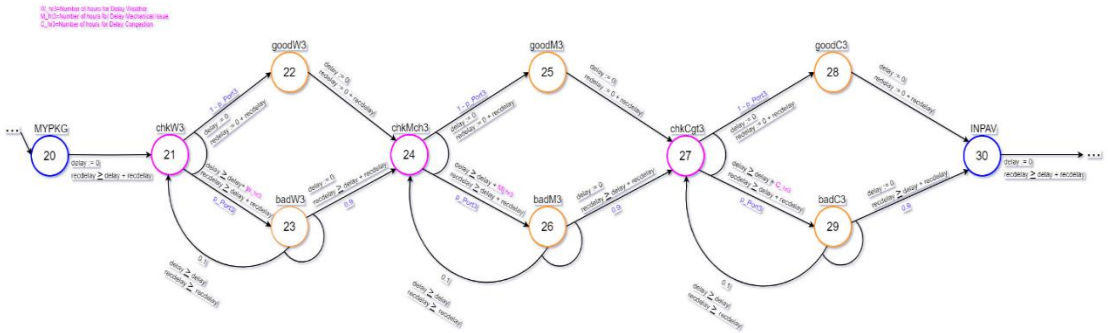
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



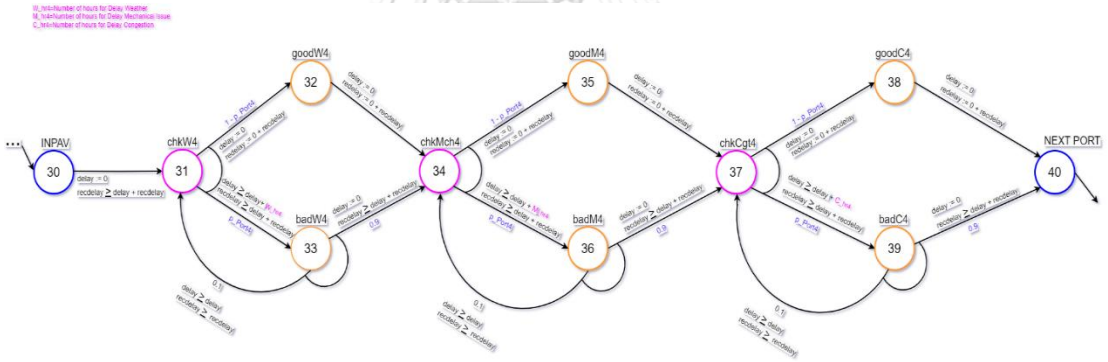
รูปที่ 3.6 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ THLCH ไป ท่าเรือ SGSIN ที่ออกแบบ



รูปที่ 3.7 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ SGSIN ไป ท่าเรือ MYPKG ที่ออกแบบ



รูปที่ 3.8 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ MYPKG ไป ท่าเรือ INPAV ที่ออกแบบ



รูปที่ 3.9 แสดงโมเดล PTA จาก ท่าเรือ INPAV ไป ท่าเรือ ถัดไป สำหรับการพัฒนาโมเดลต่อไปได้

3.7. การทดสอบและประเมินผลค่าความน่าจะเป็น

การสรุปผลและนำไปใช้งาน จากสรุปผลจากการวิเคราะห์และทดสอบนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้งานในการแก้ไขปัญหาหรือใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจ

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เพื่อปรับปรุงแผนการเดินเรือหรือเพื่อตัดสินใจในการดำเนินการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือ รายละเอียดคำอธิบายของแต่ละสถานะที่เกิดขึ้นในโมเดล PTA จากรูปที่ 3.6 – 3.9 ที่จำลอง ดังนี้

โดยกำหนดให้ N = ค่าลำดับของท่าเรือที่เข้าถึงในที่นี้ N : [1..4] init 1 เริ่มต้นจาก 1 ท่าเรือที่ 1

- THLCH: ท่าเรือไทยแหลมฉบังท่าเรือเริ่มต้น (ต้นทาง) (THLCH port)

- recdelay: Global clock: เป็นค่าของนาฬิกาความล่าช้าของทั้งระบบ
- delay: Local clock: เป็นค่าของนาฬิกาความล่าช้าแต่ละสถานะที่เกิดขึ้นในแต่ละ Location ของระบบ
- init: สถานะของท่าเรือเริ่มต้น (Initial state)
- chkWN: สถานะตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นของสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมมีผลต่อเคลื่อนที่ตามเส้นทาง (Weather check) ในท่าเรือที่ N
- goodWN: ค่าความน่าจะเป็นของสภาพอากาศที่เหมาะสม (Good weather) ของท่าเรือที่ N
- badWN: ค่าความน่าจะเป็นของสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม (Bad weather) ของท่าเรือที่ N
- chkMchN: สถานะตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นของความพร้อมของเครื่องยนต์เรือ (Mechanical of vessel check) ในท่าเรือที่ N
- goodMN: ค่าความน่าจะเป็นของความพร้อมของเครื่องยนต์เรือดี (No Mechanical Issue) ของท่าเรือที่ N
- badMN: ค่าความน่าจะเป็นของความพร้อมของเครื่องยนต์เรือแย่ (Mechanical Issue) ของท่าเรือที่ N
- chkCgtN: สถานะตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นสภาพความหนาแน่นแออัดของท่าเรือ (Congestion port check) ในท่าเรือที่ N
- goodCN: ค่าความน่าจะเป็นสภาพไม่เกิดความหนาแน่นแออัดของท่าเรือ (No Congestion port) ของท่าเรือที่ N
- badCN: ค่าความน่าจะเป็นสภาพเกิดความหนาแน่นแออัดของท่าเรือ (Congestion port) ของท่าเรือที่ N
- SGSIN ท่าเรือสิงคโปร์
- MYPKG ท่าเรือมาเลเซีย
- INPAV ท่าเรืออินเดีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากโมเดล PTA ที่จำลองการเส้นทางเดินเรือจาก ท่า THLCH ไป INPAV โดยผ่านปัจจัยที่สนใจที่ส่งผลต่อการเดินทางถึงกำหนดล่าช้า โดยอ้างอิงจาก Route ที่ให้บริการแหลมฉบังไปท่าเรืออินเดีย ทำการประเมินค่าความน่าจะเป็นจากโมเดล PTA ที่ออกแบบ จากเส้นทางโมเดล PTA รูปที่ 3.6 โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าความน่าจะเป็นจากตารางที่ 3.6 และค่านับเวลาความล่าช้าจากตารางที่ 3.7 ดังนี้

ตารางที่ 3.10 การทดสอบและประเมินผลค่าความน่าจะเป็น จากเส้นทางโมเดล PTA รูปที่ 3.6 ผ่านการกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นจากหัวข้อ 3.2 – 3.5

Path ID	Description	Probability	Time Bounds	Expected Outcom	Risk Assessment
Path 1	เรือออกจากท่า THLCH ไปท่าเรือ SGSIN โดยไม่มีเหตุการณ์ปัจจัยที่ส่งผล	0.95477	0-48 hrs	Successful Transit	Low
Path 2	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี	0.0	0-48 hrs	Successful Transit	Low
Path 3	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์	0.0	0-48 hrs	Successful Transit	Low
Path 4	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.04523	49-64 hrs	Delayed Arrival	High
Path 5	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์	0.0	0-48 hrs	Successful Transit	Low
Path 6	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.04523	49-64 hrs	Delayed Arrival	High
Path 7	เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์ และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.04523	49-64 hrs	Delayed Arrival	High
Path 8	เรือออกจากท่า THLCH ไปท่าเรือ SGSIN โดยมีเหตุการณ์ปัจจัยที่ส่งผลทั้งหมด	0.04523	49-78 hrs	Delayed Arrival or Cancelled	Highest

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการออกแบบแบบจำลอง PTA ที่ถูกออกแบบจากตารางเดินเรือ จากตารางข้างต้นจะถูกนำมาเป็นต้นแบบเขียนโค้ดโปรแกรมภาษา PRISM ซึ่งมีค่า Probability ที่ตรวจสอบค่าความน่าจะเป็นจาก 3 ปัจจัย คือ สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, สภาพความไม่พร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ สามารถทดสอบหรือตรวจสอบด้วยเครื่องมือ PRISM Model Checker ต่อได้

บทที่ 4
การพัฒนาสร้างแบบจำลอง ด้วยการเขียนภาษา PRISM ผ่านเครื่องมือ PRISM Model checker จากโมเดล PTA

4.1.กำหนดสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจากเครื่องมือ PRISM Model Checker

ขั้นตอนนี้ เป็นการจำกัดสภาพแวดล้อมสำหรับการออกแบบและเขียนโปรแกรมด้วยเครื่องมือ PRISM Model Checker โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1.1. กำหนดภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจากแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น โดยใช้ภาษา PRISM เท่านั้น

4.1.2. กำหนดเฟรมเวิร์กที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจากต้นแบบของแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็นประยุกต์การติดตั้ง Java Runtime Environment (JRE) เวอร์ชัน 8 หรือใหม่กว่าจากเว็บไซต์อย่างเป็นทางการของ Java เพื่อก่อนทำการติดตั้ง PRISM Model Checker โดยใช้จาวารันไทม์เฟรมเวิร์คเท่านั้น

4.1.3. กำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมภาษา PRISM จากต้นแบบของแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่า (PTA) โดยใช้เครื่องมือ PRISM Model Checker เท่านั้น

4.2. กำหนด Model Type ในการเขียนภาษา PRISM

การจำลองและสร้างแบบจำลองการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็นนำมาเขียนภาษา PRISM โดยเลือกใช้ Model Type เป็น Discrete Time Markov Chain (DCMT) ที่ใช้เพื่อแสดงถึงเส้นทางเดินเรือของเรือและผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ในการเดินทาง การนำ DTMC เป็นรูปแบบของระบบความน่าจะเป็นที่สถานะถัดไปขึ้นอยู่เพียงกับสถานะปัจจุบัน ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งไม่ขึ้นอยู่กับประวัติของระบบ แต่ขึ้นอยู่เพียงกับสถานะปัจจุบันเท่านั้น ซึ่งเรียกว่า "คุณสมบัติของ Markov" เหตุผลในการนำ Model Type DTMC มาใช้งาน ดังนี้

- ความง่ายในการวิเคราะห์ DTMC มีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบได้.
- การทำนายผลลัพธ์ สามารถใช้ DTMC เพื่อทำนายผลลัพธ์ของการเดินทางของเรือ โดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพอากาศ, ความพร้อมของเครื่องยนต์, และความหนาแน่นของท่าเรือ
- การประเมินความเสี่ยง DTMC ช่วยให้สามารถประเมินความเสี่ยงและความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ต่างๆได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการวางแผนการเดินเรือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

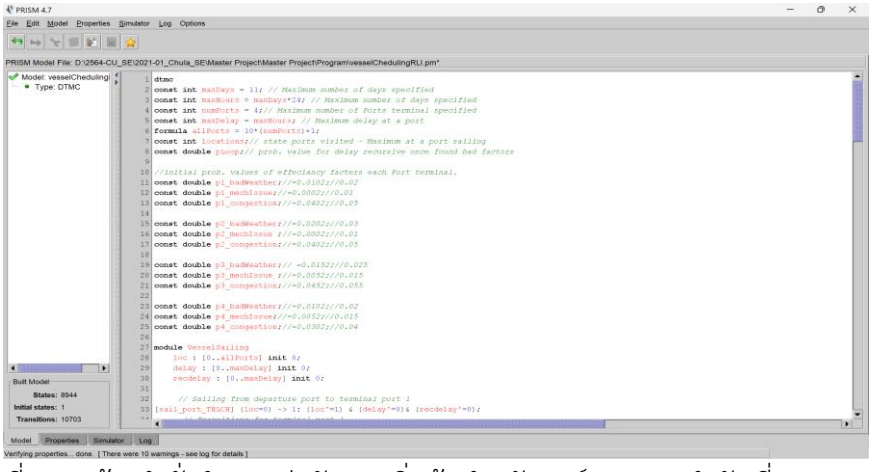
- การตัดสินใจที่ดีขึ้น ด้วยการวิเคราะห์โมเดล DTMC, ผู้จัดการการเดินเรือสามารถทำการตัดสินใจที่ดีขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน
- การจำลองสถานการณ์ DTMC ช่วยให้สามารถจำลองสถานการณ์ต่างๆ และประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆได้

ด้วยเหตุผลเหล่านี้ DTMC จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และจำลองการเดินเรือ, ช่วยให้สามารถทำการตัดสินใจที่ดีขึ้นและลดความเสี่ยงในการดำเนินงาน

4.3. กำหนดค่าตัวแปรและชุดข้อมูล ของสถานะการณ์ที่จะเกิดขึ้น พฤติกรรมที่แสดงออก และเงื่อนไขการทำงานบนเครื่องมือ PRISM Model Checker

กำหนดค่าความน่าจะเป็นโดยผู้ใช้งาน โดยการวิเคราะห์ชุดข้อมูลตารางเดินเรือของข้อมูล รูปที่ 3.6 -3.9 ในการได้แบบจำลอง PTA ให้กับแต่ละสถานะ โดยใช้ข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับค่าความน่าจะเป็นจากปัจจัยที่ส่งผลกำหนดล่าช้าของเรือ ที่สามารถส่งผลต่อเวลาการเดินทางล่าช้า ประกอบด้วยปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, สภาพความไม่พร้อมของเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และ สภาพความหนาแน่นของท่าเรือที่ผู้จัดทำงานวิจัยนี้ได้นำศึกษากำหนดการตารางเดินเรือจากรูปที่ 3.3 เป็นกรณีศึกษาทดลองการสร้างแบบจำลอง จากการเดินเรือที่ให้บริการของบริษัทขนส่งทางเรือ RCL Group Co.,Ltd จาก Route ที่ให้บริการท่าเรือไทยแหลมฉบังไปท่าเรืออินเดีย ใช้ในสร้างโมเดล PTA ที่จำลองการเดินเรือจาก ท่า THLCH ไป INPAV ใช้รหัสเรียก บริการของสาย RLI โดยมีตัวอย่างรูปที่ 3.2 โดยออกแบบการจำลองโมเดล PTA ของกำหนดการเดินเรือ และปัจจัยที่ส่งผลต่อกำหนดการล่าช้า ทำให้เกิดแนวทางในการรองรับและคาดการณ์สถานการณ์ฉุกเฉินล่วงหน้าในการปรับเปลี่ยนกำหนดตารางเดินเรือ (Vessel scheduling) ให้เหมาะสมและแม่นยำภายใต้เงื่อนไขกำหนดการของเวลาที่วางแผน

ในขั้นตอนนี้ เป็นการสร้างและกำหนดค่าตัวแปรจากการวิเคราะห์และแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2 – 3.5



รูปที่ 4.1 สร้างคำสั่งกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นสำหรับองค์ประกอบสำคัญที่ออกแบบไว้

จากรูปที่ 4.1 เพื่อเริ่มต้นเขียนโปรแกรมภาษา PRISM บน เครื่องมือ PRISM Model Checker เลือกประกาศค่า Model Type ในงานวิจัยนี้เลือกเป็น dtmc ในบรรทัดที่ 1 จากเหตุผลหัวข้อ 4.2 และประกาศตัวแปรคงที่จากบรรทัดที่ 2-8 และการสร้างตัวแปรรับพารามิเตอร์ที่เมธอดรับค่าความน่าจะเป็นจากปัจจัยที่ส่งผลล่าช้าจากบรรทัดที่ 11-25 และสร้างส่วนของโมดูลโดยการประกาศชื่อโมดูลจากบรรทัดที่ 27 จากรูปที่ 4.1 ในส่วนของบรรทัดที่ 28-30 แสดงตัวแปรที่ใช้เก็บค่ารายละเอียด จากการกำหนดองค์ประกอบสำคัญสำหรับการสร้างโมเดล PTA จากการจำลองเส้นทางเดินเรือ จากตารางข้างต้นจะอธิบายจากตัวอย่างรหัสต้นฉบับจากโค้ดตั้งต้นเมื่อสร้างบน เครื่องมือ PRISM Model Checker ด้วยโค้ดข้างต้นอธิบายโค้ดดังนี้

1. ชื่อการกำหนดค่าคงที่ (Constants)

- maxDays จำนวนวันสูงสุดที่จำลอง, กำหนดไว้ที่ 11 วัน
- maxHours จำนวนชั่วโมงสูงสุดที่จำลอง, คำนวณจาก “maxDays”
- numPorts จำนวนท่าเรือทั้งหมด, กำหนดไว้ที่ 4
- maxDelay จำนวนชั่วโมงสูงสุดของการล่าช้าที่ท่าเรือ, กำหนดเท่ากับ “maxHours”
- allPorts คำนวณจาก “numPorts”, ใช้ในการกำหนดขอบเขตของสถานะ
- locations จำนวนสถานะท่าเรือที่เรือเยือน
- pLoop ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการล่าช้าเมื่อพบปัจจัยที่ไม่ดี

2. ชื่อพารามิเตอร์ที่เมธอดรับค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความล่าช้าการเดินเรือที่แต่ละท่าเรือ (Efficiency Factors)

- p1_badWeather, p1_mechIssue, p1_congestion ค่าความน่าจะเป็นสำหรับสภาพอากาศไม่เหมาะสมต่อการเดิน, ปัญหาทางเทคนิคของความไม่พร้อมเครื่องยนต์เรือ, และความหนาแน่นที่ท่าเรือที่ 1 ไทยแหลมฉบัง (THLCH) และทำแบบเดียวกันสำหรับท่าเรือที่ 2, 3, และ 4 ต่อไปตามลำดับสำหรับค่าความน่าจะเป็น ดังนี้
- p2_badWeather, p2_mechIssue, p2_congestion
- p3_badWeather, p3_mechIssue, p3_congestion

และ p4_badWeather, p4_mechIssue, p4_congestion

3. ชื่อโมดูล VesselSailing

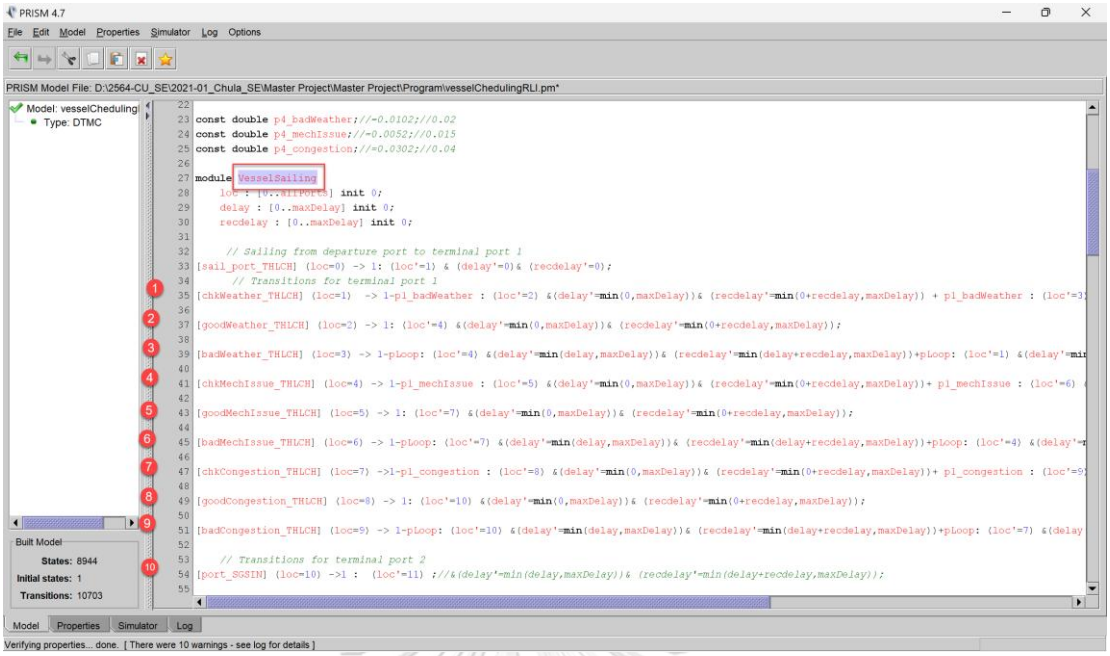
- loc แสดงถึงตำแหน่งปัจจุบันของเรือ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึงตำแหน่งที่เข้าถึงได้ทั้งหมด (allPorts_
- delay แสดงถึงเวลาล่าช้าที่ท่าเรือปัจจุบัน มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ค่าสูงสุดของความล่าช้าทั้งหมด (maxDelay)
- recdelay แสดงถึงเวลาล่าช้าสะสม มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง ค่าสูงสุดของความล่าช้าทั้งหมด (maxDelay)

4. การสร้างแต่ละ Tuples สำหรับ PTA จากโค้ดที่กำหนดสามารถสร้าง Tuples สำหรับ PTA ได้ดังนี้

- States (S) เป็นชุดของตำแหน่งที่เรือสามารถอยู่ได้ รวมถึงสถานะที่เกี่ยวข้องกับเวลาล่าช้า
- Actions (Act) การกระทำที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของเรือและการเกิดล่าช้า
- Transitions ($\longrightarrow$) การเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะตามเวลาและเหตุการณ์ต่างๆ
- Clocks (delay, recdelay) นาฬิกาที่ใช้วัดเวลาล่าช้า (delay time) และนาฬิกาที่ใช้วัดเวลาล่าช้าสะสม (recdelay time)
- L (Labeling function) เป็นฟังก์ชันที่จับคู่แต่ละสถานะกับชุดของประพจน์พื้นฐานที่เป็นจริงในสถานะนั้น. ฟังก์ชันนี้กำหนดว่าประพจน์ใดบ้างที่ถูกติดป้ายกำกับให้กับสถานะที่กำหนด ตัวอย่างเช่น, ถ้าเรืออยู่ที่ท่าเรือ, ฟังก์ชัน L อาจกำหนด L("AtPort") = {"at_port"} และถ้าเรือกำลังเดินทาง, L("Sailing") = {"sailing"}
- AP (Atomic Propositions) เป็นชุดของประพจน์พื้นฐานที่สามารถเป็นจริงหรือเท็จในแต่ละสถานะของระบบ ประพจน์เหล่านี้ใช้สำหรับการอธิบายคุณสมบัติที่สามารถสังเกตได้หรือเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับสถานะนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ในการจำลองการเดินเรือ, AP อาจประกอบด้วย {"at_port", "sailing", "arrived"} ซึ่งแสดงถึงสถานะที่เรืออาจอยู่ ที่ท่าเรือ, กำลังเดินทาง, หรือถึงปลายทาง
- Prob (Probabilities) ค่าความน่าจะเป็นของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งหมดนี้รวมกันเพื่อสร้างรูปแบบ PTA ที่สามารถใช้จำลองและวิเคราะห์การเดินทางของเรือที่มีอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ

4.4. เขียนโปรแกรมภาษา PRISM โดยประยุกต์ตามการทำงานที่ออกแบบโมเดล PTA

ในขั้นตอนการจำลองโมเดล PTA ที่ออกแบบจากการจำลองตารางเดินเรือที่ได้ โดยมีวิธีการจากการจำลองโมเดล PTA โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PRISM เพื่อให้สอดคล้องดังรูปที่ 3.6-3.9 หลังจากประกาศตัวแปรและสร้างโมดูลจากหัวข้อ 4.3 มาแล้ว เริ่มต้นเขียนโปรแกรมคำสั่งในการทำงานให้สอดคล้องกับสถานะที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์และสถานะที่เปลี่ยนแปลงจากเงื่อนไขโมเดล PTA ที่ได้ ไปเขียนโปรแกรมภาษา PRISM โดยเครื่องมือจะทำการวิเคราะห์และอ่านโค้ด โดยสนใจที่โมดูล VesselSailing



รูปที่ 4.2 การเขียนโค้ดจากภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model checker นำต้นแบบจากแบบจำลองการเดินเรือโมเดล PTA จากรูปที่ 3.6

เมื่อสร้างคำสั่งการทำงานด้วยการเขียนโค้ดภาษา PRISM ด้วยการทำงานภายใต้โมดูลนี้ เริ่มจากการสร้างสถานะที่เป็นไปได้ โดยจากรูปที่ 4.2 หมายเลขตามที่ระบุจะสอดคล้องกับสถานะที่เกิดขึ้นจากโมเดล PTA สร้างตัวแปรค่าคงที่และพารามิเตอร์ที่รับเข้า ทั้งหมดในโปรแกรมเริ่มสร้างคำสั่งสร้างการกระทำหรือพฤติกรรม (action) ที่เกิดขึ้น และ เงื่อนไข (guard) ในการเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะที่มีเหตุการณ์ของค่าความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้น และการอัปเดตค่าสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลง จากโค้ด PRISM ดังรูป 4.2 โดยจะมีรูปแบบการเขียนโค้ดรูปแบบดังนี้

[action] guard -> prob_1 : update_1 + ... + prob_n : update_n;

บรรทัดที่ 33 หมายถึง การกระทำแรกที่เกิดขึ้นและใส่เงื่อนไขเพื่ออัปเดตเมื่อเรืออยู่ที่สถานะเริ่มต้น (loc=0) มีการเปลี่ยนไปยังสถานะถัดไป (loc=1) โดยไม่มีการเพิ่มค่า delay หรือ recdelay สอดคล้องดังรูปที่ 3.6

บรรทัดที่ 35 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมถัดไปจากสถานะ loc=1 มีการตรวจสอบสภาพอากาศที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าอากาศดี (1-p1_badWeather) จะไปยัง loc=2 โดยไม่มี delay แต่ถ้าหากอากาศไม่ดี (p1_badWeather) จะไปยังสถานะ loc=3 และเพิ่ม delay อย่างน้อย 6 ชั่วโมง (หรือตามค่า maxDelay ถ้ามีการกำหนด) เพื่อส่งไปยังเงื่อนไขถัดไปตามค่าความน่าจะเป็นที่ระบุให้เกิดพฤติกรรมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรทัดที่ 37 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพอากาศที่เหมาะสมจากอากาศดีที่ สถานะ loc=2 จะไปยัง loc=4 โดยไม่มีการเพิ่ม delay เพื่อส่งไปยังพฤติกรรมต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

บรรทัดที่ 39 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมจากสถานะ loc=3 (อากาศไม่ดี) และมีโอกาส (1-pLoop) ที่จะไปยัง loc=4 โดยมี delay ตามที่กำหนดไว้แล้ว หรือโอกาส (pLoop) ที่จะกลับไปยัง loc=1 และเริ่มตรวจสอบสภาพอากาศใหม่อีกครั้ง แล้วส่งไปยังพฤติกรรมต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

บรรทัดที่ 41 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมถัดไปจากสถานะ loc=4, มีการตรวจสอบปัญหาความพร้อมของเครื่องยนต์เรือต่อการเดินเรือหรือไม่ ถ้าไม่มีปัญหา (1-p1_mechIssue) จะไปยังสถานะ loc=5 โดยไม่มี delay ถ้ามีปัญหา (p1_mechIssue) จะไปยังสถานะ loc=6 และเพิ่ม delay อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ตรวจสอบปัญหาความพร้อมของเครื่องยนต์เรือต่อการเดินเรือหรือไม่ เพื่อส่งไปยังเงื่อนไขถัดไปตามค่าความน่าจะเป็นที่ระบุให้เกิดพฤติกรรมต่อไป

บรรทัดที่ 43 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพความพร้อมของเครื่องยนต์เรือ ถ้าไม่มีปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์เรือที่จากสถานะ loc=5 จะไปยังสถานะ loc=7 โดยไม่มีการเพิ่ม delay เพื่อส่งไปยังพฤติกรรมต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

บรรทัดที่ 45 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพไม่ความพร้อมของเครื่องยนต์เรือจากสถานะ loc=6 (มีปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์เรือ), มีโอกาส (1-pLoop) ที่จะไปยัง loc=7 โดยมี delay ตามที่กำหนดไว้แล้ว หรือโอกาส (pLoop) ที่จะกลับไปยังสถานะ loc=4 และเริ่มตรวจสอบปัญหาความพร้อมของเครื่องยนต์เรือใหม่อีกครั้ง เพื่อส่งไปยังพฤติกรรมการชะลอการเดินทางต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรทัดที่ 47 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมถัดไปจากสถานะที่ 1 ที่เป็นสถานะตรวจสอบสภาพอากาศที่เหมาะสมหรือไม่เพื่อส่งไปยังเงื่อนไขถัดไปตามค่าความน่าจะเป็นที่ระบุให้เกิดพฤติกรรมต่อไป

บรรทัดที่ 49 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือจากสถานะ loc=7 มีการตรวจสอบความสภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด ถ้าสภาพความหนาแน่นของท่าเรือไม่แออัด (1-p1_congestion) จะไปยัง loc=8 โดยไม่มี delay ถ้าสภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด (p1_congestion) จะไปยัง loc=9 และเพิ่ม delay อย่างน้อย 8 ชั่วโมง เพื่อส่งไปยังพฤติกรรมต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

บรรทัดที่ 51 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพความหนาแน่นแออัดของท่าเรือ ถ้าสภาพความหนาแน่นของท่าเรือไม่แออัดจากสถานะ loc=8 จะไปยัง loc=10 โดยไม่มีการเพิ่ม delay เพื่อส่งไปยังพฤติกรรมต่อไปที่สถานะถัดไปเกิดขึ้น

บรรทัดที่ 54 หมายถึง การกระทำของพฤติกรรมที่มีค่าความน่าจะเป็นของสภาพความหนาแน่นของท่าเรือจากสถานะ loc=9 (สภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัด) มีโอกาส (1-pLoop) ที่จะไปยัง loc=10 โดยมี delay ตามที่กำหนดไว้แล้ว หรือโอกาส (pLoop) ที่จะวนกลับไปยัง loc=7 และเริ่มตรวจสอบสภาพความหนาแน่นของท่าเรือแออัดใหม่อีกครั้ง

ในทุกบรรทัดจะมีการกำหนดช่วงของการเก็บค่าเวลา **min(x, maxDelay)** หมายถึงการใช้ค่าน้อยที่สุดระหว่าง x และค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ใน **maxDelay** เป็นวิธีที่ใช้ในการจำกัดค่า delay ไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้

ในขั้นตอนโมเดล PTA รูปที่ 3.7-3.9 สามารถปรับใช้จากการเขียนโค้ดภาษา PRISM จากรูปที่ 4.2 ต่อไปจนครบทุกท่าเรือปลายทางจากงานวิจัยนี้จะสร้างโค้ดให้ทำงานตามคำสั่งถึงท่าเรือที่ 4 คือ INPAV ท่าเรืออินเดีย และสถานะที่เกิดขึ้นทั้งหมดของระบบการจำลองการเดินเรือด้วยการใช้ไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็นมาใช้ และทวนสอบวิเคราะห์ผลลัพท์ผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker จากการสร้าง Properties ด้วยการสร้างสูตร PCTL ในขั้นตอนถัดไป

4.5. กำหนดสูตร PCTL ผ่านการใช้เครื่องมือ PRISM จาก สร้าง Properties ในไฟล์ .pctl (Probabilistic)

สูตร PCTL ที่นำมานั้นเป็นการกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบในโมเดล Discrete Time Markov Chain (DTMC) โดยใช้เครื่องมือ PRISM Model Checker สำหรับการวิเคราะห์การเดินเรือที่อาจเกิดความล่าช้าตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยผ่านการคำนึงถึงปัจจัยค่าความน่าจะเป็นที่ส่งผลต่อการเดินเรือล่าช้า

การใช้ PCTL ใน PRISM จึงเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติที่มีความน่าจะเป็นและเวลาเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้บ่อยในระบบที่มีความซับซ้อนและระบบที่มีการตัดสินใจอัตโนมัติ จากการพิจาณาคุณสมบัติและการนำมาใช้งานจากการออกแบบได้สูตร PCTL เพื่อนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมจากภาษา PRISM ต่อไปดังนี้

สูตร PCTL เป็นสูตรที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่มีความไม่แน่นอนหรือความน่าจะเป็นสำหรับการตรวจสอบโมเดลที่มีความน่าจะเป็น (probabilistic model checking) สูตรที่ผู้วิจัยทำการออกแบบเพื่อทวนสอบและกำหนดกฎและเงื่อนไขนี้ใช้ในการคำนวณความน่าจะเป็นของ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบตามเงื่อนไขที่กำหนดและใช้เครื่องหมายจากตารางที่ 3.6 ในหัวข้อที่ 3 (กรณีตรวจสอบความหมายของเครื่องหมายที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้) อธิบายสูตร PCTL ที่ได้มาดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบสูตร PCTL ที่ออกแบบในการนำไปใช้ PCTL ใน PRISM

สูตร PCLT	ความหมาย	ผลลัพท์ที่คาดหวัง
P=? [F loc=locations&(recdelay>0)]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะถึงสถานที่ปลายทางพร้อมกับความล่าช้าโดยมีความล่าช้ามากกว่า 0 (recdelay > 0)	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P=? [F loc=locations&(recdelay=0)]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะถึงสถานที่ปลายทางโดยไม่มีความล่าช้า (recdelay = 0)	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P=? [F loc=locations]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะถึงสถานที่หมายปลายทางภายในเวลาที่กำหนด โดยไม่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับความล่าช้า	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P=? [F loc=locations&recdelay=countDelay]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะถึงสถานที่ปลายทางพร้อมกับความล่าช้ากำหนดได้จากตัวแปรที่เท่ากับ “countDelay”	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P=? [F loc=locations&recdelay>countDelay]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะถึงสถานที่ปลายทางพร้อมกับความล่าช้าที่มากกว่ากำหนดได้จากตัวแปร “countDelay”	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
filter(exists, P>=1 [F loc=locations&recdelay>=countDelay])	ตรวจสอบว่ามีสถานะใดหรือหาสถานะที่มีความน่าจะเป็น 100% ในการถึงสถานที่ปลายทางโดยมีความล่าช้าอย่างน้อยที่เท่ากับหรือมากกว่า กำหนดได้จากตัวแปร “countDelay”	True / False
P=? [F loc=locations&recdelay>countDelay]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะประสบกับความล่าช้าที่เฉพาะเจาะจงในท่าเรือปลายทางที่กำหนด	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบสูตร PCTL ที่ออกแบบในการนำไปใช้ PCTL ใน PRISM (ต่อ)

สูตร PCLT	ความหมาย	ผลลัพท์ที่คาดหวัง
P=? [F loc=locations&recdelay<countDelay]	คำนวณความน่าจะเป็นที่จะประสบกับความล่าช้าน้อยกว่ากำหนดจากตัวแปร “countDelay” ในท่าเรือปลายทางที่กำหนด	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>=1 [G ("at_port" U F "arrived")]	ความน่าจะเป็นคือ 100% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือจะถึงสถานที่หมายปลายทางในที่สุด	True / False
P>0.9 [G ("at_port" U F "arrived")]	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	True / False
R{"delay_time"}=? [F loc=locations]	คำนวณเวลาความล่าช้าที่คาดหวังเมื่อถึงสถานที่ปลายทาง	จำนวนเวลาหน่วยเป็นชั่วโมงที่ต้องการตามค่าความน่าจะเป็นส่งผลล่าช้า
P>0.9 [G ("arrived" U F "no_delay_SGSIN")]	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ SGSIN โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	True / False
P=? [G ("arrived" U F "no_delay_SGSIN")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ SGSIN โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>0.9 [G ("arrived" U F "delay_SGSIN")	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ SGSIN และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	True / False

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปแบบสูตร PCTL ที่ออกแบบในการนำไปใช้ PCTL ใน PRISM (ต่อ)

สูตร PCLT	ความหมาย	ผลลัพท์ที่คาดหวัง
P=? [G ("arrived" U F "delay_SGSIN")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ SGSIN และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>0.9 [G ("arrived" U F "no_delay_MYPKG")]	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ MYPKG โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	True / False
P=? [G ("arrived" U F "no_delay_ MYPKG")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ MYPKG โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ ปลายทางในที่สุด	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>0.9 [G ("arrived" U F "delay_ MYPKG")	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ MYPKG และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	True / False
P=? [G ("arrived" U F "delay_MYPKG")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ MYPKG และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>0.9 [G ("arrived" U F "no_delay_INPAV")]	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ INPAV โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	True / False
P=? [G ("arrived" U F "no_delay_ INPAV")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ INPAV โดยไม่มีความล่าช้าจะถึงสถานที่ปลายทางในที่สุด	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]
P>0.9 [G ("arrived" U F "delay_INPAV")	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ INPAV และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	True / False
P=? [G ("arrived" U F "delay_INPAV ")]	คำนวณความน่าจะเป็นที่เรือที่อยู่ที่ท่าเรือ INPAV และมีความล่าช้าจะถึงสถานที่หมายปลายทาง	ค่าความน่าจะเป็น [0;1]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในสูตรเหล่านี้มีการประกาศตัวแปรที่กำหนดดังนี้

- “P=?” หมายถึงคำนวณความน่าจะเป็น
- “F” หมายถึง "ในที่สุด" (eventually) ใช้เพื่อแสดงว่าเหตุการณ์จะเกิดขึ้นในอนาคตไม่ว่าจะเมื่อไหร่ก็ตาม
- “G” หมายถึง "โดยทั่วไป" (globally) ใช้เพื่อแสดงว่าเงื่อนไขจะเป็นจริงตลอดเวลา
- “U” หมายถึง "จนกว่า" (until) ใช้เพื่อแสดงว่าเงื่อนไขหนึ่งจะเป็นจริงจนกว่าเงื่อนไขอื่นจะเป็นจริง
- loc=locations หมายถึงตัวแปรที่ใช้แสดงถึงสถานที่หรือสถานะที่เฉพาะเจาะจงปลายทางที่กำหนดในโมเดล
- delay หมายถึงตัวแปรที่ใช้แทนเวลาความล่าช้าที่บันทึกไว้ และจะถูกรีเซ็ตเริ่มเริ่มเดินทางจากท่าเรือถัดไป
- recdelay หมายถึงตัวแปรที่ใช้แทนเวลาความล่าช้าที่บันทึกสะสมไว้
- countDelay หมายถึงค่าคงที่ที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับเวลาความล่าช้า
- R{"delay_time"}=? หมายถึง "คำนวณค่าคาดหวังของเวลาความล่าช้า"
- THLCH หมายถึงท่าเรือไทยแหลมฉบัง
- SGSIN หมายถึงท่าเรือสิงคโปร์
- MYPKG หมายถึงท่าเรือมาเลเซีย
- INPAV หมายถึงท่าเรืออินเดีย

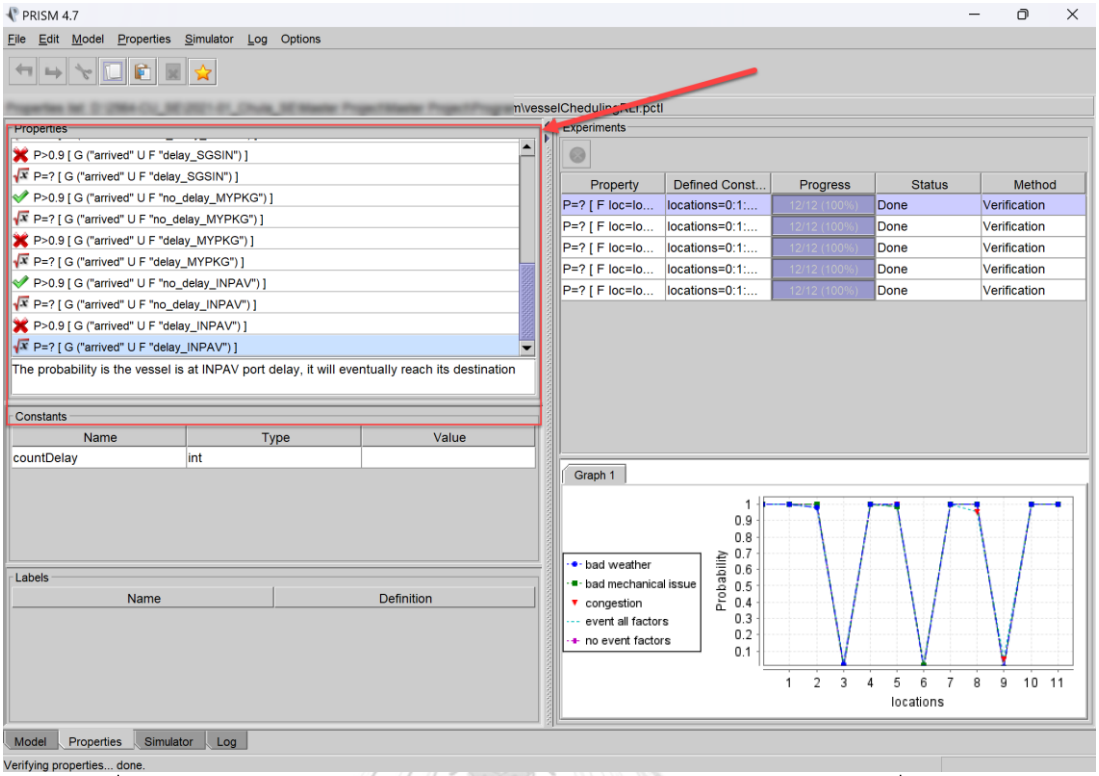
ต่อไปนี้คือการอธิบายรายละเอียดของแต่ละคุณสมบัติที่ผู้วิจัยได้ออกแบบและกำหนดสูตรดังตารางที่ 4.1 ได้อธิบายถึงรายละเอียดการใช้คำสั่ง นำมาสร้างไฟล์ .pctl ด้วย Properties ในเครื่องมือ PRISM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Model Checker ด้วยโค้ด ดังนี้

```
const int countDelay;
P=? [ F loc=locations&(recdelay>0) ]
// Probability of No Delay
P=? [ F loc=locations&(recdelay=0) ]
// Time-Bounded Reachability
P=? [ F loc=locations ]
// Probability of Reaching Destination with Delays
P=? [ F loc=locations&recdelay=countDelay ]
// Probability of Reaching Destination with Delays more than assign date (HRs) > countDelay
P=? [ F loc=locations&recdelay>countDelay ]
filter(exists, P>=1 [ F loc=locations&recdelay>=countDelay ])
 // Probability of Experiencing a Specific Delay at a Specific Port
P=? [ F loc=locations&recdelay>countDelay ]
// // Probability of Experiencing a Specific Delay at a Specific Port in accordance with over than Specific Hours
P=? [ F loc=locations&recdelay<countDelay ]
//The probability is 1 (or 100%) that, if the vessel is at port, it will reach its destination eventually
P>=1 [ G ("at_port" U F "arrived") ]
P>0.9 [ G ("at_port" U F "arrived") ]
P=? [ F loc=locations&recdelay<=countDelay ]
// Expected Delay Upon Arrival
R{"delay_time"}=? [ F loc=locations ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at SGSIN port without delay, it will eventually reach its destination.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "no_delay_SGSIN") ]
// The probability is the vessel is at SGSIN port without delay, it will eventually reach its destination
P=? [ G ("arrived" U F "no_delay_SGSIN") ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at SGSIN port delay, it will eventually reach its destination.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "delay_SGSIN") ]
P=? [ G ("arrived" U F "delay_SGSIN") ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at MYPKG port without delay, it will eventually reach its dest.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "no_delay_MYPKG") ]
// The probability is the vessel is at MYPKG port without delay, it will eventually reach its destination
P=? [ G ("arrived" U F "no_delay_MYPKG") ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at MYPKG port delay, it will eventually reach its destination.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "delay_MYPKG") ]
// The probability is the vessel is at MYPKG port delay, it will eventually reach its destination
P=? [ G ("arrived" U F "delay_MYPKG") ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at INPAV port without delay, it will eventually reach its dest.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "no_delay_INPAV") ]
// The probability is the vessel is at INPAV port without delay, it will eventually reach its destination
P=? [ G ("arrived" U F "no_delay_INPAV") ]
// The probability is more than 90% that, if the vessel is at INPAV port delay, it will eventually reach its destination.
P>0.9 [ G ("arrived" U F "delay_INPAV") ]
// The probability is the vessel is at INPAV port delay, it will eventually reach its destination
P=? [ G ("arrived" U F "delay_INPAV") ]
```

รูปที่ 4.3 โค้ดสูตร PCTL จากตารางที่ 4.1 จากไฟล์ .pctl ใช้สำหรับการทวนสอบโค้ดที่เขียนจากเครื่องมือ



รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงการสร้าง Properties ผ่านหลักการของสูตร PCTL ที่ออกแบบไว้

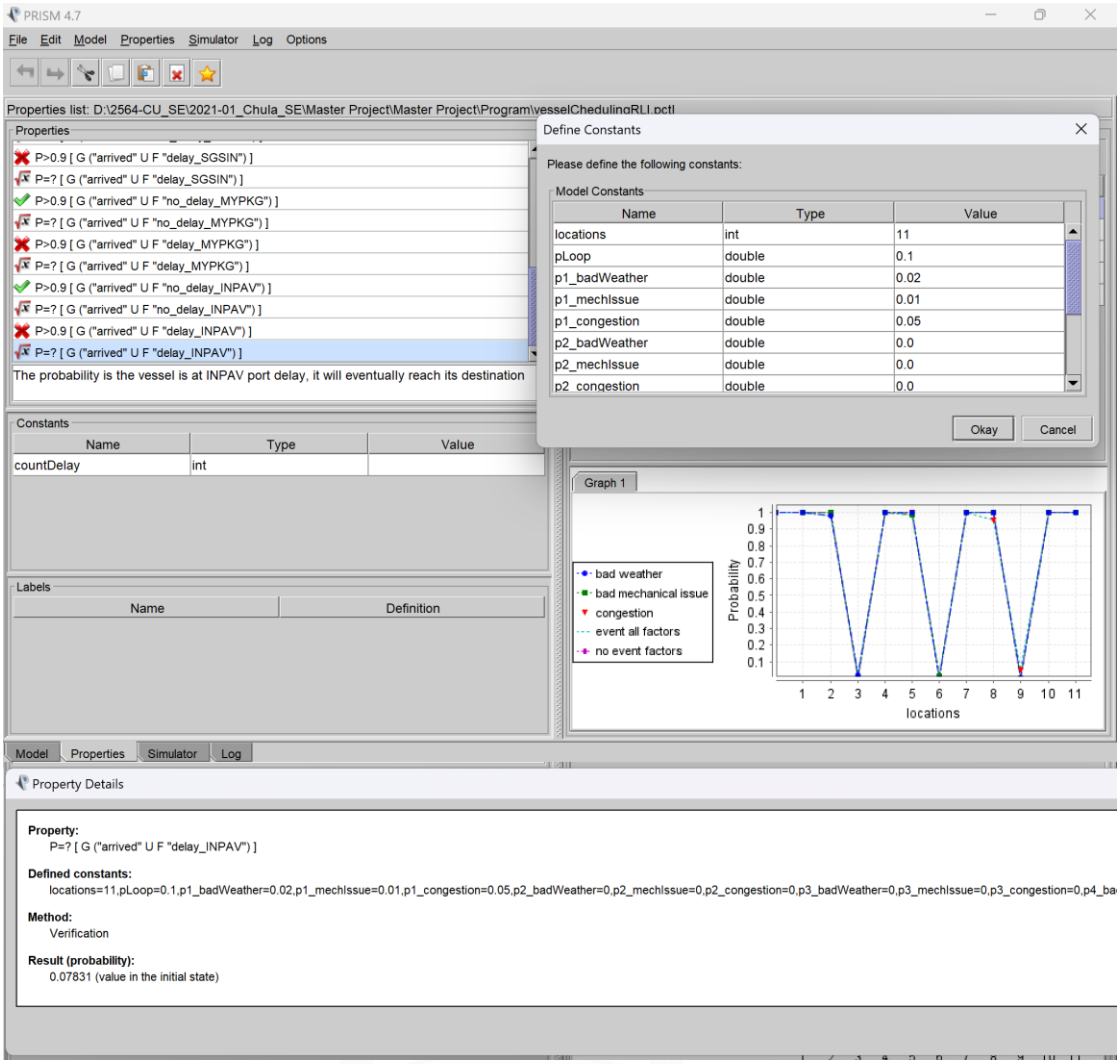
คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถประเมินความเสี่ยงของความล่าช้าในเส้นทางการเดินเรือได้โดยวิธีความน่าจะเป็น โดยปรับตัวแปร **countDelay** และตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงและขอบเขตเวลา ผู้ใช้สามารถปรับแต่งคำถามเหล่านี้ให้สะท้อนถึงสถานการณ์ที่แตกต่างกันและใช้ผลลัพธ์เพื่อตัดสินใจอย่างมีข้อมูลเกี่ยวกับการวางแผนเส้นทาง การจัดการโลจิสติกส์ และการจัดการความเสี่ยง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6. ทดสอบและทดลองประยุกต์ใช้ เครื่องมือ PRISM Model Checker ที่เขียนโปรแกรมขึ้นเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงนำมาใช้งาน

เมื่อทำแบบจำลองจากตารางเดินเรือเป็นแบบจำลองโมเดลด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา PRISM [5] ด้วยเทคนิค Model Checking และให้สอดคล้องกับโมเดล PTA ที่ออกแบบไว้ โดยใช้ PRISM เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ต่างๆที่อ่านจากคำสั่งที่สร้างในไฟล์ .pctl ที่เกิดขึ้นในระบบโดยพิจารณา state ของระบบและ transition probability ในแต่ละสถานะ ทำให้เกิดเป็นการกระทำที่แสดงพฤติกรรมสามารถจำลองคำนวณวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นโดยสามารถคำนวณเข้าถึงในทุกสถานะและประเมินได้ค่าเชิงปริมาณ ชุดข้อมูลค่าความน่าจะเป็น

การทดลองที่สามารถแสดงผลเป็นกราฟให้สามารถทวนสอบง่ายขึ้นและสามารถรันแสดงผลเป็นคาดตามที่คาดหวังได้ และนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบค่าที่ต้องการจากการตั้งคำถามผ่านสูตร PCTL โดยการอ่านค่าผ่านเครื่องมือ PRISM [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
การทดสอบและประเมินผลความสามารถจากผลลัพท์ที่ได้จากการเขียนโปรแกรมบนเครื่อง PRISM Model Checker

5.1. ทดลองและประเมินผลความสอดคล้องที่เขียนโปรแกรมบนเครื่องมือ และโมเดล PTA จากค่าความน่าจะเป็น Prob. (Probabilistic)

ผลลัพธ์จากการออกแบบจำลองโมเดล PTA จากกำหนดการเดินเรือโดยผ่านปัจจัยที่สนใจ จะแสดงให้เห็นถึงเส้นทางที่ดีที่สุดโดยการพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นแต่ละ Location

จากเส้นทางหรือสถานะที่ดีที่สุด จาก ท่าเรือต้นทาง THLCH ถึง ปลายทาง INPAV พิจารณาจากรูปที่ 3.6– 3.9 เส้นทาง (Path) ออกมาดังนี้

Init (0) – 1 – 2 – 4 – 5 – 7 – 8 – 10 – 11 – 12 – 14 – 15 – 17 – 18 – 20 – 21 – 22 – 24 – 25 – 27 – 28 – 30 – 31 – 32 – 34 – 35 – 37 – 38 – 40 – 41 (EndNode) ซึ่งเส้นทางข้างต้นหมายถึงค่าความน่าจะเป็นที่ได้ที่จะถึงกำหนดการเร็วที่สุดและเกิดความน่าจะเป็นที่จะถึงกำหนดดีที่สุด

เครื่องมือ PRISM ช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลระบบที่มีค่าความน่าจะเป็นและเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่สามารถระบุได้เป็นตารางหรือแบบกราฟได้ ดังนั้นสามารถใช้ PRISM Model Checker เพื่อทดสอบและพิสูจน์ว่าแบบจำลอง PTA ที่ออกแบบมีค่า Probability ที่ตรวจสอบจาก 3 ปัจจัย ตรงกับโค้ดใน PRISM หรือไม่

ในการทดสอบหรือตรวจสอบด้วย PRISM Model Checker จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- กำหนดโครงสร้างและค่าเริ่มต้นของระบบใน PRISM Model Checker
- กำหนดโครงสร้างและค่าเริ่มต้นของ PTA ให้เหมือนกับที่ออกแบบจากตารางเดินเรือ
- กำหนดสถานะเริ่มต้นของระบบใน PRISM Model Checker ให้ตรงกับท่าเรือที่ต้องการทดสอบ
- กำหนดโครงสร้างการทดสอบหรือการสังเกตใน PRISM Model Checker ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบ เช่น สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม, ความพร้อมเครื่องยนต์เรือต่อการเดินทาง และความหนาแน่นของท่าเรือ
- เรียกใช้ PRISM Model Checker เพื่อตรวจสอบหรือทำการทดสอบตามโครงสร้างที่กำหนด
- วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จาก PRISM Model Checker เพื่อพิจารณาว่า PTA ที่ออกแบบตรงกับโค้ดใน PRISM หรือไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ดังนั้นสามารถใช้ PRISM Model Checker เพื่อทดสอบหรือตรวจสอบว่าแบบจำลอง PTA ที่ออกแบบมีค่า Probability ที่ตรวจสอบจาก 3 ปัจจัย ตรงกับโค้ดในPRISM ได้หรือไม่ จากตารางของ PTA ในตารางของ PTA จะมี Node แทนท่าเรือและจุดตรวจสอบปัจจัยค่าความน่าจะเป็น โดย Node จะแสดงสถานะหรือท่าเรือที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยที่เกิดขึ้น และจะมี Edge ที่เชื่อมต่อกันแสดงถึงการเปลี่ยนสถานะจากตัวอย่างปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยที่เส้นเชื่อมแสดงถึงการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนสถานะของท่าเรือเมื่อปัจจัยมีค่าความน่าจะเป็นที่ตรวจสอบแล้ว

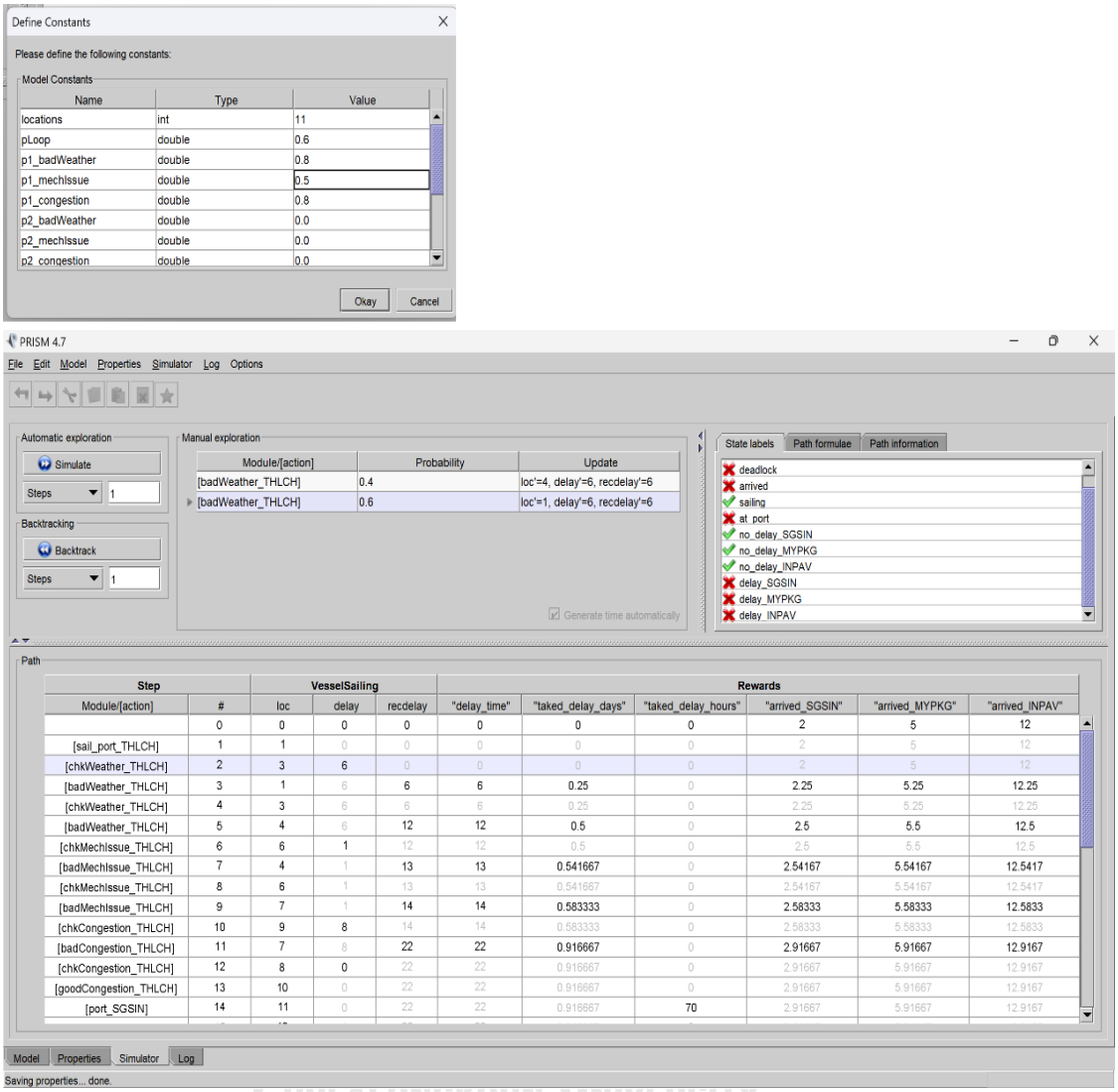
5.2. ทวนสอบผลลัพท์จาก PRISM Model Checker

นำผลลัพธ์ที่ได้จาก PRISM ที่ได้ค่าความน่าจะเป็น (Probabilistic) มาวิเคราะห์และอธิบายเพื่อช่วยในการตัดสินใจหรือการวางแผนการจัดการเรือในสภาพที่ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น โดยจะวิเคราะห์และตรวจสอบจากเหตุการณ์ที่สนใจด้วยทวนสอบหาค่า Probability ที่ส่งผลต่อกำหนดการเดินเรือถึงกำหนดโดยไม่เกิดความล่าช้า หรือหากเกินความล่าช้าระบบนับมาได้กี่ชั่วโมง จากการกำหนด Properties ด้วยคำสั่งตรรกะเวลาแบบน่าจะเป็นสูตร PCTL ใช้ตัวดำเนินการแบบความน่าจะเป็นเสมือนเป็นตัวดำเนินการเปรียบเทียบและ ทั้งสมาชิกของเซตข้อมูลที่สนใจใน AP ของ [0..1] เป็นความน่าจะเป็น

เมื่อได้ลำดับของการทวนสอบ เครื่องมือ PRISM ยังมีความสามารถในการทำการทดลองด้วยการทำ Simulation จากเลือกคำถามจากสูตร PCTL ที่ออกแบบมาจำลองทดลองได้หลายๆครั้งจนสามารถแสดงผลข้อมูลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.5 พร้อมทั้งสามารถจำลอง Simulation ในแต่ละขั้นตอนเพื่อวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็น (Probabilities) โดยทำการตรวจสอบและพิสูจน์ว่า โมเดล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

PTA ที่ออกแบบ สอดคล้องต้องกันกับการโปรแกรมที่เขียนโค้ดในเครื่องมือ PRISM Model Checker



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 5.1 แสดงผลการทดลองเสมือนจริง (Simulation) จากแต่ละสถานะ บน PRISM จากแต่ละเงื่อนไขที่สนใจ

การทดสอบด้วยการทำการทดลองจากสูตร PCTL ที่สร้างไว้เพื่อตอบสนองของผลลัพท์ที่ต้องการจามสถานะและเหตุการณ์ ด้วยฟีเจอร์ Simulation สามารถเรียกใช้งานโค้ด PRISM ด้วยแบบจำลอง PTA ที่ออกแบบมาและดูผลลัพธ์จากการทำงาน ถ้าผลลัพธ์ตรงกับความคาดหวังจากแบบจำลอง PTA แสดงว่าโมเดลและโค้ดสอดคล้องกันต่อการทดสอบด้วยฟีเจอร์ซิมูเลชัน (Simulation feature) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบว่า PTA และโค้ด PRISM สอดคล้องกันหรือไม่ ขั้นตอนสำหรับการทดสอบด้วยซิมูเลชันคือ

- สร้างProperties เป็นสถานการณ์ทดสอบ กำหนดสถานการณ์หรือเงื่อนไขที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ในโมเดล PTA วัดเงื่อนไขเหล่านี้ควรครอบคลุมทุกฟีเจอร์หรือส่วนที่สำคัญของโมเดล

- เรียกใช้ซิมูเลชันใน PRISM โดยใช้โค้ดที่เขียนใน PRISM ทำการเรียกใช้ซิมูเลชันด้วยสถานการณ์ทดสอบที่ได้กำหนดไว้
- เปรียบเทียบผลลัพธ์ หลังจากได้ผลลัพธ์จากการทดสอบด้วยซิมูเลชัน ควรเปรียบเทียบผลลัพธ์เหล่านี้กับผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้จากโมเดล PTA
- วิเคราะห์ ถ้าผลลัพธ์จากการทดสอบด้วยซิมูเลชันใน PRISM ตรงกับผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้จากโมเดล PTA นั่นคือการยืนยันว่าโมเดล PTA และโค้ด PRISM สอดคล้องกัน หากไม่ตรงกัน ควรทบทวนและปรับปรุงโมเดลหรือโค้ดใน PRISM ให้สอดคล้องกับกัน

จากการสร้างโมเดล PTA โดยการจำลองออกแบบจากกำหนดการเดินเรือ ผู้จัดทำได้ทำการทดสอบความสอดคล้องของ โมเดล PTA ที่ออกแบบได้ จากรูปที่ 3.6 - 3.9 ตรงกับ การเขียนโปรแกรมภาษา PRISM ในหัวข้อที่ 4.4 พิสูจน์ว่าสอดคล้องและตรงกันจากผลการประเมินค่าความน่าจะเป็นที่ได้ ในงานวิจัยนี้นำเสนอโมเดล PTA รูปที่ 3.6 และกำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นจากตารางที่ 3.6

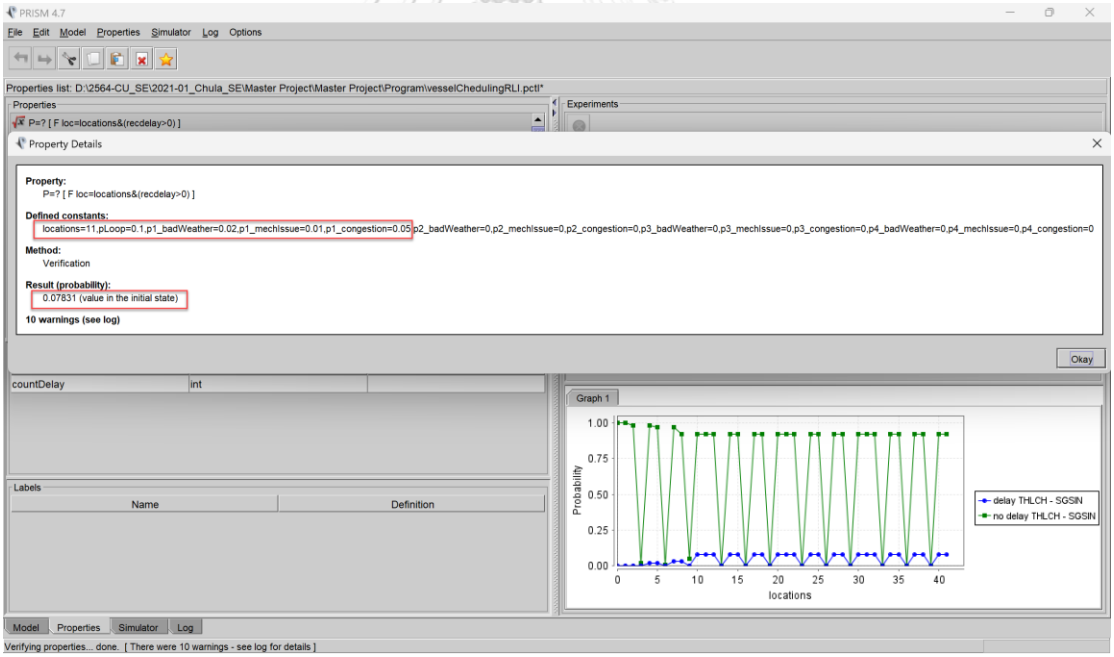
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทวนสอบความถูกต้องระหว่างโมเดล PTA และโค้ดที่เขียนภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model Checker

กรณีทวนสอบและทดสอบ	ค่าความน่าจะเป็น (จาก PTA)	ค่าความน่าจะเป็น (จาก PRISM)	ความสอดคล้อง	หมายเหตุ
1. เรือออกจากท่า THLCH ไปท่าเรือ SGSIN โดยไม่มีเหตุการณ์ปัจจัยที่ส่งผลล่าช้า ถึงจุดหมายภายใน 48 ชั่วโมง	1.0	1.0	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
2. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี	0.02	0.02	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
3. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์	0.01	0.01	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
4. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.05	0.05	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
5. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์	0.0298	0.0298	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
6. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.05	0.05	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
7. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์	0.0298	0.0298	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทวนสอบความถูกต้องระหว่างโมเดล PTA และโค้ดที่เขียนภาษา PRISM บนเครื่องมือ PRISM Model Checker (ต่อ)

กรณีทวนสอบและทดสอบ	ค่าความน่าจะเป็น (จาก PTA)	ค่าความน่าจะเป็น (จาก PRISM)	ความสอดคล้อง	หมายเหตุ
8. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอสภาพอากาศไม่ดี และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.0690	0.06900	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
9. เรือออกจากท่าเรือ THLCH ไปท่าเรือ SGSIN และเจอปัญหาความไม่พร้อมของเครื่องยนต์ และเจอปัญหาสภาพความหนาแน่นของท่าเรือ	0.0595	0.05950	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก
10. เรือออกจากท่า THLCH ไปท่าเรือ SGSIN โดยมีเหตุการณ์ปัจจัยที่ส่งผลล่าช้าทั้งหมด ถึงจุดหมายเกิน 48 ชั่วโมง และอาจจะมากถึง 78 ชั่วโมง	0.0783	0.07831	ถูก	ค่าทั้งสองใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 5.2 แสดงผลการทวนสอบความถูกต้องการด้วยการตรวจสอบ (Verify) ระหว่างโมเดล PTA และโค้ดที่เขียนภาษา PRISM

5.3. ผลการนำเครื่องมือ PRISM Model Checker ที่เขียนโปรแกรมภาษา PRISM มาประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและปรับปรุงกำหนดการเดินเรือ

การใช้เครื่องมือ PRISM Model Checker ในการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและปรับปรุงกำหนดการเดินเรือนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอน

1. การสร้างโมเดล ขั้นตอนแรกคือการสร้างโมเดลการเดินเรือในภาษา PRISM โดยรวมถึงสถานะปัจจัยต่างๆ ที่เรืออาจพบเจอระหว่างการเดินทาง
2. การกำหนดค่าความน่าจะเป็น ในโมเดล PRISM ค่าความน่าจะเป็นจะถูกกำหนดให้กับการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆ เพื่อสะท้อนถึงความไม่แน่นอนในการเดินเรือ
3. การทวนสอบโมเดล (Model Checking) ใช้เครื่องมือ PRISM [5] ในการทวนสอบโมเดลเพื่อคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ต่างๆ ที่กำหนดไว้ใน Properties ของไฟล์ .pctl
4. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทวนสอบโมเดลจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ เช่น การถึงที่หมายล่าช้าหรือไม่ล่าช้า
5. การปรับปรุงกำหนดการ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปปรับปรุงกำหนดการเดินเรือ เช่น การเพิ่มเวลาสำรองในกำหนดการเพื่อรองรับความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้น
6. การทดสอบสถานการณ์ สามารถใช้โมเดล PRISM ในการทดสอบสถานการณ์ต่างๆ เพื่อดูผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อกำหนดการเดินเรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ
7. การตัดสินใจ ผู้จัดการการเดินเรือสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อทำการตัดสินใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับการจัดการกับความเสี่ยงและการปรับปรุงกำหนดการเดินเรือ

การใช้ PRISM Model Checker ในลักษณะนี้ช่วยให้สามารถทำการวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำสูงและสามารถปรับปรุงการตัดสินใจในการจัดการกับความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการเดินเรือได้ดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
บทสรุปโครงงานและข้อเสนอแนะ

6.1. สรุปผลโครงงานมหาบัณฑิต

โครงงานมหาบัณฑิตนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสำหรับการสร้างแผนภาพแบบจำลองกำหนดการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) เพื่อช่วยในการนำแผนภาพนี้ไปเป็นส่วนหนึ่งของต้นแบบการเขียนโปรแกรมภาษา PRISM มาประยุกต์ได้ผ่านเครื่องมือ PRISM Model Checker เมื่อมีการอธิบายที่อยู่ในรูปแบบของแผนภาพแบบจำลองไทม์ออโตมาต้าแบบที่มีความน่าจะเป็น จะช่วยให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจเอกสารส่วนการวิเคราะห์ค่าความจะเป็นที่เป็นไปได้และเขียนโปรแกรมประยุกต์ได้ง่ายยิ่งขึ้น เมื่อนำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ไปประยุกต์ใช้กับโครงการกำหนดการเดินเรือในเส้นทางต่าง ๆ และทำการทดสอบโดยการนำผลลัพท์ค่าความน่าจะเป็นผ่านการสร้างคำถามจากการประยุกต์ใช้สูตร PCTL มาทวนสอบข้อมูลในแต่ละท่าเรือในบริการเดินเรือสาย RLI จำนวน 4 ท่าเรือ บริการท่าเรือที่มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำหนดการล่าช้าอย่างละ 3 ปัจจัยที่เกิดขึ้นในความน่าจะเป็นแต่ละท่าเรือ ทำให้ได้ผลลัพธ์ค่าความน่าจะเป็น เท่ากับ 1 หรือมากกว่า 0.9 เป็นต้นไปจากการวางแผนเดินเรือด้วยการวิเคราะห์ปรับปรุงให้แม่นยำมากขึ้นในการถึงกำหนดที่หมายมีความถูกต้องและแม่นยำ

6.2. ข้อจำกัดในโครงการมหาบัณฑิต

จากการออกแบบ และพัฒนาเครื่องมือในโครงงานมหาบัณฑิตนี้ ได้พบข้อจำกัด จำนวน 3 ข้อดังนี้

6.2.1. การกำหนดข้อมูลค่าความน่าจะเป็นไม่สามารถเปรียบเทียบการทำงานกรณีที่ระบบใช้งานแบบต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น

6.2.2. ข้อมูลจัดเก็บเวลาจำนวนชั่วโมงที่แน่นอนจากวิเคราะห์เชิงเวลาของโมเดลที่มีการรวมเวลาอาจต้องใช้การประมาณค่าหรือการวิเคราะห์เชิงเวลาที่จำกัด ซึ่งอาจไม่สามารถจับภาพพฤติกรรมที่แท้จริงของระบบได้อย่างครบถ้วนได้

6.2.3. โมเดล PTA ที่ออกแบบอาจต้องปรับแต่งทุกครั้ง หากนำไปใช้กับกำหนดการของบริการเดินเรือเส้นทางอื่น ตามความเหมาะสมจากการวิเคราะห์เหตุการที่เกิดขึ้น

6.2.4. การคำนวณวัดค่าความน่าจะเป็นจากคุณลักษณะประเภทของเรือทางกายภาพไม่ได้ถูกนำมาคิดเป็นส่วนหนึ่งของปัจจัยที่ส่งผลความล่าช้าในโมเดล PTA ที่ออกแบบ เพราะยากต่อการออกแบบประเมินผลเนื่องจากบริการเส้นทางเรือไม่ได้เลือกเรือลำใดในการเดินทางสำหรับบริการนั้นๆแบบเฉพาะเจาะจง ปัจจัยที่ส่งผลจึงไม่ได้นำคุณสมบัติประเภทของเรือทางกายภาพของเรือมาคำนวณวิเคราะห์ปัจจัยด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2.5. ต้องมีการพัฒนาโครงสร้างของโมเดล PTA ที่ออกแบบ แบบการสร้างเครื่องมืออัตโนมัติของการสร้างโมเดล PTA ให้แปลงเป็น PRISM Model

จากการศึกษาที่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบการทำงานกรณีที่ระบบใช้งานต่อเนื่องการวิเคราะห์ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น

6.3. ประโยชน์ที่จะได้รับ

สามารถทวนสอบและประเมินความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้น จากการจำลองการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) ด้วยประโยชน์ของการจำลองการเดินเรือโดยใช้ PTA คือ

1. การประเมินความเสี่ยง การใช้ PTA ช่วยให้สามารถประเมินความเสี่ยงในการเกิดการล่าช้าในการเดินเรือได้ โดยการจำลองการเดินเรือแบบนี้สามารถให้ข้อมูลเชิงความน่าจะเป็นเกี่ยวกับเหตุการณ์ที่อาจทำให้เกิดความล่าช้า เช่น การล่าช้าในการจราจรทางเรือในขณะที่เรือกำลังเดินทาง จากปัจจัยด้านสภาพอากาศ ความหนาแน่นของท่า ความพร้อมของเรือต่อการเดินทาง
2. การวางแผนและการจัดตารางเดินเรือ โดยการจำลองการเดินเรือแบบนี้ช่วยให้สามารถปรับแก้และวางแผนตารางการเดินเรือให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยพิจารณาความน่าจะเป็นของการล่าช้าและเงื่อนไขอื่น ๆ เพื่อลดการรอเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร
3. การวิเคราะห์และการตรวจสอบ PTA ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของการเดินเรือได้อย่างชัดเจน โดยใช้ PTA modelling เพื่อหาค่า Probabilistic ของปัจจัยที่ส่งผลให้ถึงกำหนดล่าช้า ซึ่งสามารถใช้ในการพิจารณาปัจจัยที่อาจเกี่ยวข้องกับความล่าช้า ด้วย ปัจจัย ด้านสภาพอากาศ ความหนาแน่นของท่า ความพร้อมของเรือต่อการเดินทาง

ซึ่งการจำลองการเดินเรือโดยใช้ไทม์ออโตมาตาแบบที่มีความน่าจะเป็น (PTA) เพื่อจัดการตารางเดินเรือเป็นปัญหาที่สำคัญในการวางแผนและการบริหารจัดการการขนส่งทางเรือในสถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอนหรือความเปลี่ยนแปลง และสร้างเสถียรภาพในการตัดสินใจและการบริหารจัดการในอุตสาหกรรมทางเรือ

6.4. ข้อเสนอแนะ

โครงงานมหาบัณฑิตนี้ ได้ทำการพัฒนาเครื่องมือโดยใช้ภาษา PRISM และบริการเดินเรือของสาย RLI บริการเดินเรือจากไทยไปอินเดียเท่านั้น หากต้องการนำเครื่องมือไปประยุกต์ใช้กับ

โครงการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษาอื่น ๆ อาจพัฒนาเครื่องมือสร้างโมเดล PTA สำหรับการออกแบบจำลองและสำหรับภาษานั้น ๆ ได้ โดยใช้ตรรกะความคิดและการนำสูตรทาง PCTL ตรรกะคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อทวนสอบวัตถุประสงค์ที่ต้องการดังข้อที่ 4.5 ในบทที่ 4 เป็นแนวทางได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Ratchanok Thianpunyathanakul
วัน เดือน ปี เกิด	24 September 1992
สถานที่เกิด	Bangkok
วุฒิการศึกษา	Bachelor of Science (B.Sc.) in Information Technology Sakon Nakhon Rajabhat University
ที่อยู่ปัจจุบัน	31/814 The Key Sathon-Charoen Rat, Charoen Rat Road, Bang Khlo, Bang Kho Laem, Bangkok 10120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY