



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์กรณีระหว่างของการพบ
ข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์

โดย นางสาวศิริทิพย์ ดุงคะเสรีรักษ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติประยุกต์

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตยวัจน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ)

กรรมการ

(Dr.Gareth Clayton)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวม จงเจริญ)

การเปรียบเทียบแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ กรณีระหว่างของการพบข้อผิดพลาด
มีการแจกแจงไวบูลล์

นางสาวศิริทิพย์ ตุงคะเสรีรักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถิติประยุกต์ ภาควิชาสถิติประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นางสาวศิริทิพย์ ตุงคะเสรีรักษ์
ชื่อเรื่อง : การเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ กรณีระยะห่างของ
การพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์
สาขาวิชา : สถิติประยุกต์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ
Dr. Gareth Clayton
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ 7 ตัวแบบ : G-O Model Delayed S-Shaped Model Inflection S-Shaped Model Yamada Exponential Model Yamada Rayleigh Model Yamada Imperfect Debugging Model และ Pham-Nordmann Model โดยใช้ข้อมูลระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดที่มีลักษณะการแจกแจงไวบูลล์ การประมาณค่าของพารามิเตอร์จะใช้ Maximum Likelihood Estimation ผลการวิจัยพบว่าในกรณีที่ระยะห่างระหว่างการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ ตัวแบบ Pham-Nordmann มีค่า KS-Distance ต่ำสุดทั้งวิธีการ U-Plot และ Y-Plot ค่า PLR และมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) มีค่าน้อยที่สุดในทุกชุดที่นำมาศึกษาในการวิจัยครั้งนี้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 167 หน้า)

คำสำคัญ : Software Reliability, U-Plot, Y-Plot, PLR, KS - distance

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Miss Siritip Tungcasareerok
Thesis Title : Comparison of Models for Modeling Error Detection in Software Reliability with Weibull Distribution
Major Field : Applied Statistics
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr. Winai Bodhisuwan
Dr. Gareth Clayton
Academic Year : 2006

Abstract

The propose of the research is to compare the efficiency of seven software reliability models : G-O model, Delayed S-Shaped model, Inflection S-Shaped model, Yamada Exponential model, Yamada Rayleigh model, Yamada Imperfect Debugging model and Pham-Nordmann model. Using actual and simulated data which have Weibull distribution to compare the models. Estimation of parameters can be found by Maximum Likelihood Estimation. The conclusion of this research is that Pham - Normann model gives the smallest KS-distance of the U-Plot, Y-Plot. The Prequential Likelihood Ratio (PLR) and Mean Square Error (MSE) and accordingly fitting for most data sets gives smallest value.

(Total 166 pages)

Keyword : Software Reliability, U-Plot, Y-Plot, PLR, KS - distance

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ Dr. Gareth Clayton ที่ได้ให้คำแนะนำ ช้อคิดเห็น ตลอดจนช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เป็นอย่างยิ่งจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความรู้สึกซาบซึ้ง และสำนึกในพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ตำรวม จงเจริญ ในฐานะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบพระคุณบิดา มารดา ที่ส่งเสริมสนับสนุนในการศึกษา และความห่วงใยผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

ศิริทิพย์ ตุงกะเสรีรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 สมมติฐานการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 เกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวแบบ	7
1.6 คำจำกัดความ	7
1.7 ประโยชน์ของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ทฤษฎีความเชื่อถือได้	9
2.2 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์	13
2.3 ตัวแบบความเชื่อถือของซอฟต์แวร์	15
2.4 ประเภทของตัวแบบความเชื่อถือของซอฟต์แวร์	17
2.5 การแจกแจงไบนูลล์	20
2.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธีแมกซิมัมไลกelihood	20
2.7 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่นำมาทำศึกษาคือ	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	43
3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิจัย	43
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล	44
3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ	44
3.4 สถิติที่ใช้ในการหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแบบ	44
3.5 การนำเสนอข้อมูล	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	47
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจำลอง	50
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจริง	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการวิจัย	101
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	102
5.3 ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย	105
ภาคผนวก ข โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์	153
ประวัติผู้วิจัย	167

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงข้อมูลเวลาการเกิดข้อผิดพลาด	22
4-1 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	51
4-2 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	51
4-3 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	54
4-4 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	54
4-5 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	56
4-6 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	56
4-7 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	59
4-8 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	59
4-9 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	61
4-10 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	61
4-11 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	64
4-12 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-13 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	66
4-14 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	66
4-15 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	69
4-16 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	69
4-17 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	71
4-18 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	71
4-19 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	74
4-20 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	74
4-21 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	76
4-22 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	76
4-23 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	79
4-24 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-25	แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	81
4-26	แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	81
4-27	แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	84
4-28	แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	84
4-29	แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	86
4-30	แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	86
4-31	แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	89
4-32	แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	89
4-33	แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	91
4-34	แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	91
4-35	แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	94
4-36	แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-37 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$	96
4-38 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	96
4-39 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	99
4-40 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	99
5-1 แสดงข้อมูลทั้ง 10 ชุดข้อมูล และตัวแบบที่เหมาะสม	101

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 สิ่งที่ตกค้างของข้อบกพร่อง (Defects remaining)	3
2-1 ตัวอย่างการตรวจพบข้อบกพร่องของข้อมูล	8
2-2 โค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเทียบกับเวลา t	12
2-3 แนวความคิดพื้นฐานของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์	13
2-4 โค้งการเจริญเติบโตของความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล	16
2-5 โค้งการเจริญเติบโตของความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์แบบตัวเอส	17
2-6 โค้งการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนแปลง	28
3-1 แผนผังวิธีการดำเนินการวิจัย	46
4-1 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 1	50
4-2 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	52
4-3 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	53
4-4 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 2	55
4-5 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	57
4-6 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	58
4-7 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 3	60
4-8 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	62
4-9 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	63
4-10 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 4	65
4-11 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	67
4-12 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	67
4-13 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 5	70
4-14 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	72
4-15 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	73
4-16 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 6	75
4-17 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	77
4-18 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	77
4-19 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 7	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4-20 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	82
4-21 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	83
4-22 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 8	85
4-23 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	87
4-24 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	88
4-25 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 9	90
4-26 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	92
4-27 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	93
4-28 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 10	95
4-29 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	97
4-29 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของทุกกลุ่มงาน ไม่ว่าจะเป็นด้านธุรกิจ การศึกษา การคมนาคมและขนส่ง การติดต่อสื่อสาร การทหาร และความมั่นคง การรักษาพยาบาล การรักษาความปลอดภัย การเงินการธนาคาร และในอีกหลายด้าน เนื่องจากในกิจกรรมบางอย่าง ถ้าเราใช้มนุษย์เป็นผู้ปฏิบัติงาน อาจเกิดความเสี่ยง หรืออาจเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาปฏิบัติงานแทนมนุษย์ทำให้การดำเนินชีวิตของมนุษย์มีความสะดวกสบาย รวดเร็ว และมีความปลอดภัยมากขึ้น การทำงานของคอมพิวเตอร์ ถูกควบคุมดูแลภายใต้ระบบคอมพิวเตอร์ให้ดำเนินไปตามกระบวนการที่ผู้ใช้ต้องการ

ซอฟต์แวร์จัดทำขึ้นเพื่อใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของแต่ละระบบงานของตน อาทิ ระบบควบคุมการบิน ระบบการทำงานของอุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบควบคุมคุณภาพ ในโรงงานอุตสาหกรรม ระบบการเงินการธนาคาร ระบบควบคุมพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ถ้าระบบการเหล่านี้ เกิดข้อผิดพลาด (Error) หรือให้ผลลัพธ์ที่ล้มเหลว (Failures) อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ [2]

การเกิดข้อผิดพลาดอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ และสาเหตุหนึ่งอาจมาจากผู้ใช้งานสังเกตพบว่าการทำงานของโปรแกรมให้ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามความต้องการ ซึ่งผู้ใช้งานอาจจำแนกระดับความรุนแรงของข้อผิดพลาด เช่น รุนแรงมาก ผิดพลาดในส่วนสำคัญ เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลกระทบที่ได้รับ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของซอฟต์แวร์ เพื่อหาความเชื่อถือได้ในตัวซอฟต์แวร์ (Software Reliability) เหล่านี้ เพื่อให้แน่ใจว่าซอฟต์แวร์นั้นมีความถูกต้องแม่นยำ และมีประสิทธิภาพมากที่สุดหรือเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ผู้ผลิตซอฟต์แวร์ต้องมั่นใจว่าซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นมานั้นมีคุณภาพและความเชื่อถือได้ในระดับที่ยอมรับได้ก่อน นำซอฟต์แวร์ออกสู่ตลาด ดังนั้นผู้ผลิตซอฟต์แวร์จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีเครื่องมือที่ใช้ประเมินความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการหาความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์นั้น จะใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Model)

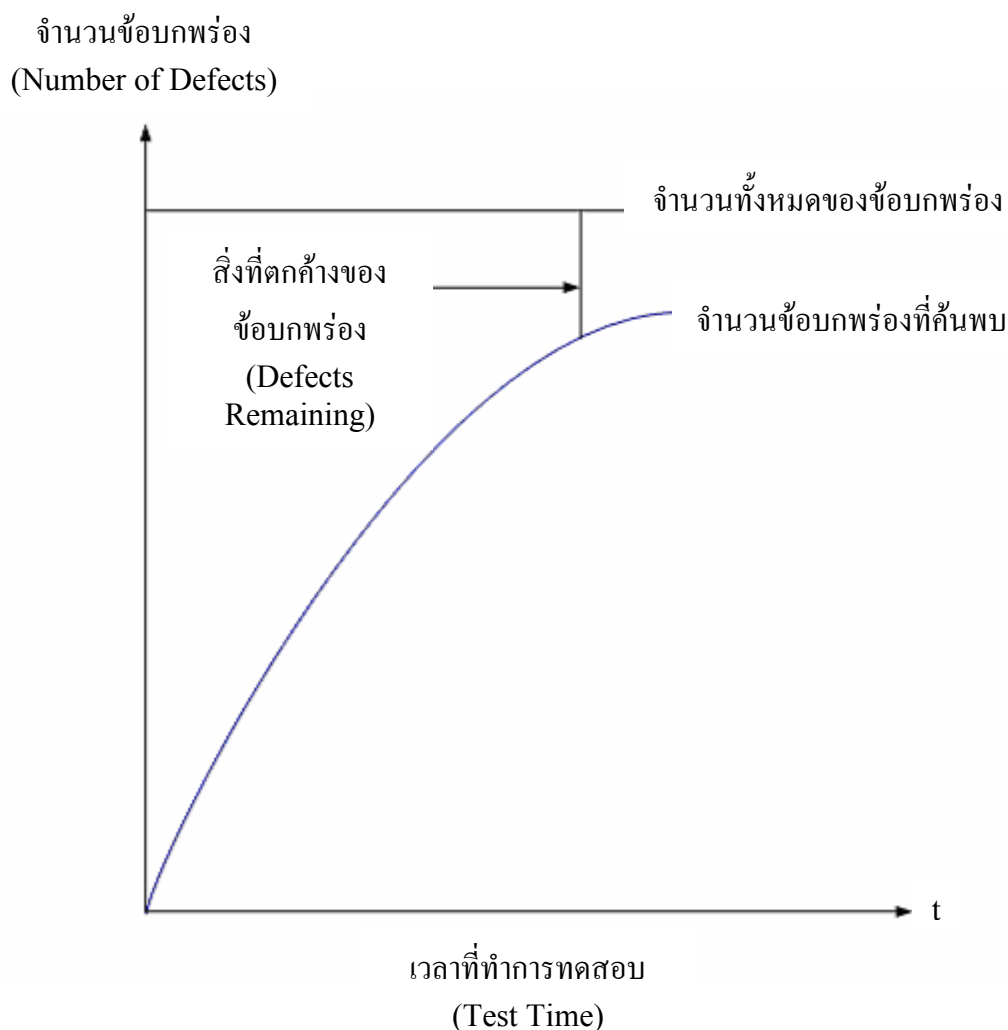
ในการประคํ่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ เป็นการประยุกต์วิธีการทางสถิติ และความน่าจะเป็นเพื่อใช้อธิบายการเกิดข้อผิดพลาดในการทำงานของซอฟต์แวร์ ซึ่งมีนักวิจัยพยายามพัฒนาตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ และเสนอตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ไว้เป็นจํานวนมาก ซึ่งแต่ละตัวแบบมีข้อดีและข้อจํากัดแตกต่างกันไป

ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์เป็นปัญหาที่มีอุปสรรคมาก ปัญหาหนึ่งในทางด้านการอุตสาหกรรมการผลิตซอฟต์แวร์ เมื่อกระบวนการผลิตซอฟต์แวร์เกิดสิ่งผิดปกติอย่างใดก็ตามในอดีตผู้ขายซอฟต์แวร์ต้องการทราบว่ผลิถักัณัที่จําหน่ายให้ลูกค้ามีความเชื่อถือได้หรือไม่ใน อนาคต

ขั้นตอนการพัฒนาซอฟต์แวร์ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [8]

1. การกำหนดและวิเคราะห์ความต้องการ ให้ทราบถึงขอบเขต และกิจกรรมต่างๆ ที่มีการกระทำภายในระบบและภายนอกระบบ
2. การออกแบบระบบ เป็นภาพรวมของระบบที่สามารถกระทำได้ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า
3. การออกแบบโปรแกรม เป็นรายละเอียดที่เกิดขึ้นของระบบ
4. การเขียนโปรแกรม เพื่อให้สามารถทำงานตามที่ต้องการได้
5. การทดสอบโมดูล เป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันของหน่วยย่อยในระดับล่างๆ
6. การทดสอบรวม นำแต่ละส่วนของโปรแกรมที่ทดสอบรวมกัน
7. การทดสอบระบบ ซึ่งทดสอบว่าระบบสามารถทำงานตามหน้าที่และการโต้ตอบได้ตามที่ต้องการหรือไม่
8. การส่งมอบระบบ ส่งมอบระบบให้แก่ลูกค้าพร้อมทั้งคู่มือการใช้งานของระบบ
9. การบำรุงรักษาระบบ เป็นการดูแลระบบให้สามารถทำงานได้ตามปกติ

ส่วนใหญ่ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ เมื่อทราบจํานวนสิ่งที่ยกค้างข้อบกพร่อง (Defects Remaining) จะช่วยในการตัดสินใจในชุดข้อมูลว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ และสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของจํานวนความล้มเหลวที่เกิดขึ้นได้ ดังแสดงในภาพที่ 1-1



ภาพที่ 1-1 สิ่งตกค้างของข้อบกพร่อง (Defects Remaining)

ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ตัวแบบเหล่านี้ ผู้วิจัยจึงสนใจทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่คำนวณจากระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดที่มีการแจกแจงไวบูลล์ ที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ และพัฒนาเกณฑ์การเลือกใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ไปใช้ได้เหมาะสม โดยผู้วิจัยทำการจำลองข้อมูลที่มีระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีลักษณะการแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) โดยพิจารณาเปรียบเทียบ 7 ตัวแบบ ของ G-O Model, Delayed S-Shaped Model, Inflection S-Shaped Model, Yamada Exponential, Yamada Rayleigh, Yamada Imperfect Debugging Model และ Pham-Nordmann Model โดยใช้วิธีการ U-Plot , วิธีการ Y-Plot , ค่า PLR_n และใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เฉลี่ย เฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวแบบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ 7 ตัวแบบ คือ

1.2.1.1 Goel - Okumoto Model (G-O Model) [5]

1.2.1.2 Delayed S-Shaped Model [20]

1.2.1.3 Inflection S-Shaped Model [13]

1.2.1.4 Yamada Exponential Model [21]

1.2.1.5 Yamada Rayleigh Model [21]

1.2.1.6 Yamada Imperfect Debugging Model [21]

1.2.1.7 Pham-Nordmann Model [15]

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ดังกล่าวกับตัวแบบข้างต้น กรณีระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ 7 ตัวแบบ และเลือกใช้ตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูล

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ภายใต้ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นกระบวนการปัวส์ซองแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (NHPP) โดยตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่คำนวณจากระยะห่างของการพบข้อผิดพลาด มีการแจกแจงไวบูลล์ ที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ 7 ตัวแบบ และ ตัวแบบ Pham-Nordmann น่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแบบอื่น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ข้อมูลที่นำมาทำการศึกษาเป็นข้อมูลจริงซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์ที่ได้จากการเก็บรวบรวมของนักวิจัยในอดีต จำนวน 6 ชุดข้อมูล

1.4.2 ข้อมูลที่นำมาศึกษาเป็นข้อมูลที่ทำการจำลอง ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์มีลักษณะการแจกแจงไวบูลล์ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ (m,c) เป็น (15, 120), (10, 80), (4, 60), (2, 40) ตามลำดับ

1.4.3 ศึกษาเฉพาะในขั้นตอนของการทดสอบโปรแกรม

1.4.4 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่ทำการศึกษาคือ

1.4.4.1 Goel - Okumoto Model (G-O Model)

1.4.4.2 Delayed S-Shaped Model

1.4.4.3 Inflection S-Shaped Model

1.4.4.4 Yamada Exponential Model

1.4.4.5 Yamada Rayleigh Model

1.4.4.6 Yamada Imperfect Debugging Model

1.4.4.7 Pham-Nordmann Model

1.4.5 วิธีการเปรียบเทียบ มีดังต่อไปนี้

1.4.5.1 วิธีการ U-Plot

มีฟังก์ชันการคำนวณค่าดังนี้

$$U_j = \hat{F}_j(t_j) \quad (1-1)$$

กำหนดให้ลำดับฟังก์ชันการพยากรณ์ $\hat{F}_j(t)$, $t=s, \dots, i$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และตำแหน่ง $U_s, U_{s+1}, \dots, U_j$ แต่ละจำนวนมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

1.4.5.2 วิธีการ Y-Plot

มีฟังก์ชันการคำนวณค่าดังนี้

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^i x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (1-2)$$

จะกำหนดให้ $x_j = -\ln(1 - U_j)$ เมื่อ n คือ เวลาการเกิดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น i คือ ฟังก์ชันของแต่ละ x_j

1.4.5.3 The Prequential Likelihood Ration (PLR)

โดยมีฟังก์ชันการคำนวณดังนี้

$$PLR_n^{AB} = \frac{\prod_{i=j+1}^{j+n} f_i^A(t_i)}{\prod_{i=j+1}^{j+n} f_i^B(t_i)} \quad (1-3)$$

กำหนดให้ฟังก์ชันพยากรณ์ที่ระยะเวลาที่ j โดยจะนำฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Prediction Density Function (pdf, $f_j(t) \equiv F'_j(t)$)) ของเวลาถัดไปที่จะเกิดข้อผิดพลาด ฟังก์ชันพยากรณ์ทั้งสองตัวแบบที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ j ก็จะทำให้เห็นจำนวนที่เกิดข้อผิดพลาด ณ เวลาที่ t_j

โดยใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) เป็นการเกณฑ์
ในการเปรียบเทียบ โดยมีฟังก์ชันการคำนวณดังนี้

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^k [y_i - m(t_i)]}{n - k} \quad (1-4)$$

โดยที่ $y_{i(t_i)}$ คือจำนวนข้อผิดพลาดสะสม ณ เวลาที่ $[0, t_i)$
คือจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าของแต่ละตัวแบบ ณ
เวลา t_i
 n คือจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดที่ตรวจพบ
 k คือจำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละตัวแบบ

1.5 เกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวแบบ

วิธีการ U-Plot และวิธีการ Y-Plot จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance (Kolmogorov – Smirnov distance statistic) ต่ำที่สุด The Prequential Likelihood Ration (PLR) จะเลือกตัวแบบมีค่า PLR ต่ำที่สุด และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เฉลี่ย เฉลี่ยที่มีค่าน้อยที่สุด เป็นเกณฑ์
ในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวแบบที่เหมาะสม

1.6 คำจำกัดความ

1.6.1 ความเชื่อถือของซอฟต์แวร์ (Software Reliability) คือ ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์สามารถให้ผลลัพธ์ตรงตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ภายใต้สภาวะแวดล้อมและช่วงเวลาที่กำหนด [8]

1.6.2 ตัวแบบความเชื่อถือของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Models) คือ ฟังก์ชันที่อธิบายจำนวนข้อผิดพลาดซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ตามพฤติกรรมของการเกิดข้อผิดพลาด อาทิ อัตราการเกิดข้อผิดพลาด กระบวนการแก้ไขข้อผิดพลาด ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม เป็นต้น [8]

1.6.3 ข้อผิดพลาด (Failure) เกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้งานสังเกตพบว่าการทำงานของโปรแกรมให้ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามความต้องการซึ่งผู้ใช้งานอาจจำแนกระดับของข้อผิดพลาดได้ เช่น ผิดพลาดในส่วนสำคัญ เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลกระทบที่ได้รับ [8]

1.7 ประโยชน์ของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 จากผลการวิจัยครั้งนี้จะเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์กรณีระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์

1.7.2 เป็นแนวทางในการวิจัยพัฒนาตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

1.7.3 เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์อื่นๆ ต่อไป

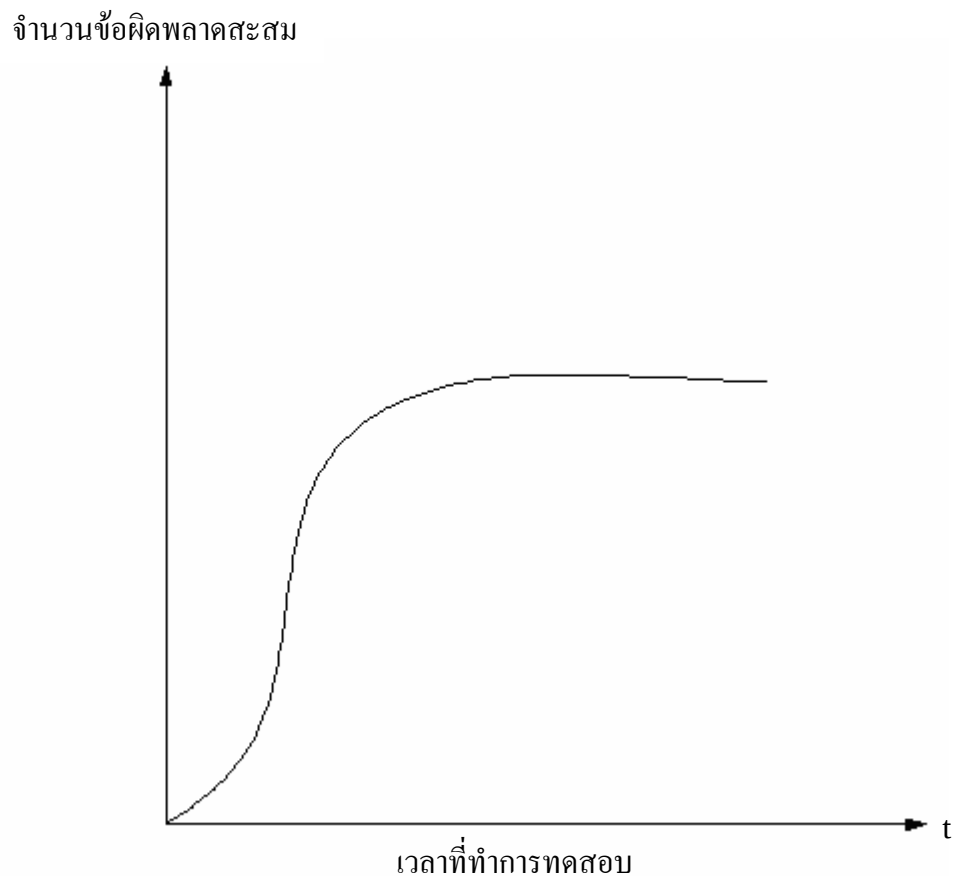
1.7.4 ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

ทฤษฎี และตัวสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีความเชื่อถือได้ (Reliability Theory)

ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ซึ่งมีนิยามว่าความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์สามารถให้ผลลัพธ์ตรงตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน ภายใต้สภาวะแวดล้อมและช่วงเวลาที่กำหนด และเราสามารถหาค่าอัตราการตรวจพบข้อบกพร่อง โดยการหาการพล็อตกราฟสะสมข้อบกพร่องกับเวลาของการทดสอบ ดังจะแสดงในรูป 2-1



ภาพที่ 2-1 ตัวอย่างการตรวจพบข้อบกพร่องข้อมูล

จากภาพที่ 2-1 แสดงให้เห็นว่าอัตราการตรวจพบข้อบกพร่องจะลดลงเมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น

2.1.1 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Theory)

Barlow [1] ได้ให้นิยามของความเชื่อถือได้ดังนี้ ความเชื่อถือ (Reliability) คือความน่าจะเป็นที่ระบบหรือสินค้า (สิ่งที่เราสนใจ) จะสามารถทำหน้าที่ตามที่กำหนดอย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาพแวดล้อมและช่วงเวลาที่กำหนด

ถ้าให้ $R(t)$ แทนฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$F(t)$ แทนฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของการเกิดข้อผิดพลาด

โดยที่ $F(t) = 0$ เมื่อ $t < 0$

T แทนตัวแปรสุ่มของเวลาที่ระบบเกิดข้อผิดพลาด

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} R(t) &= \Pr(T > t) \\ &= 1 - F(t) \end{aligned} \quad (2-1)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นของการเกิดข้อผิดพลาด ($f(t)$) คือ

$$\begin{aligned} f(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2-2)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2-3)$$

2.1.2 ฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate Function)

อัตราการเกิดข้อผิดพลาด คือ ความน่าจะเป็นที่ข้อผิดพลาดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา $[t, t + \Delta t]$ โดยที่ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นก่อนเวลา t ดังนั้นอัตราข้อผิดพลาดก็คือ อัตราที่ข้อผิดพลาดเกิดขึ้นในช่วงเวลา $[t, t + \Delta t]$ เราสามารถเขียนแทนด้วยสมการ $\lambda(t)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \frac{\Pr(t \leq T + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \\ &= \frac{\Pr(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t \times \Pr(T > t)} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \times R(t)}\end{aligned}\quad (2-4)$$

อัตราความเสี่ยง (Hazard Rate) $h(t)$ เป็นอัตราของการเกิดข้อผิดพลาดในทันทีทันใด ที่เวลา t โดยที่ $h(t)$ เป็นตัววัดแนวโน้มของข้อผิดพลาดในรูปของฟังก์ชันของเวลา ตั้งแต่ข้อผิดพลาดก่อนหน้าที่เกิดขึ้น เราสามารถเขียนเป็นสมการอธิบาย $h(t)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t \times R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \\ &= \frac{d}{dt} [-\ln(1 - F(t))] \\ &= \frac{d}{dt} [-\ln R(t)]\end{aligned}\quad (2-5)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่น ($f(t)$) ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ($F(t)$) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ($R(t)$) และฟังก์ชันอัตราความเสี่ยง ($h(t)$) มีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t h(u) du\right\} \quad (2-6)$$

$$f(t) = h(t) \exp\left\{-\int_0^t h(u) du\right\} \quad (2-7)$$

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t h(u) du\right\} \quad (2-8)$$

2.1.3 เวลาเฉลี่ยของการเกิดข้อผิดพลาด (Mean Time to Failure)

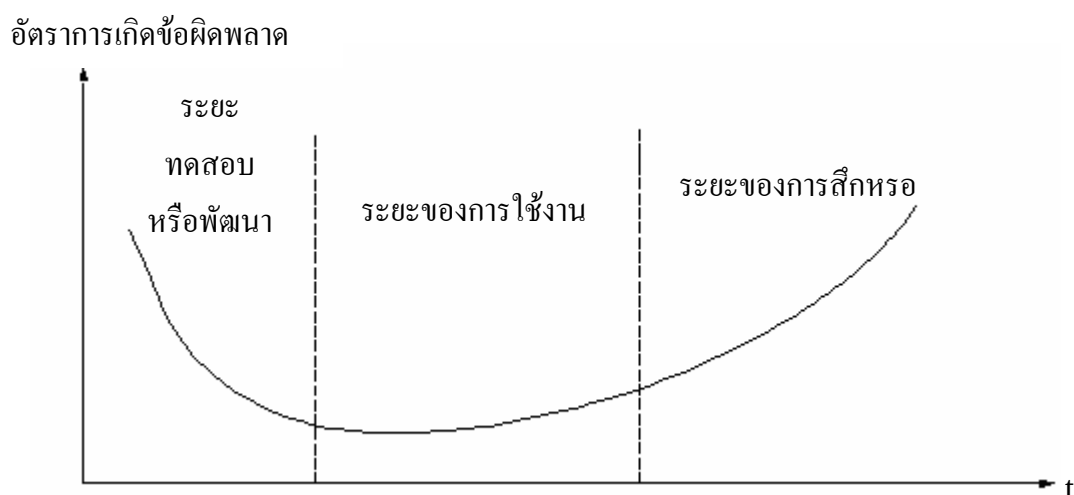
เวลาเฉลี่ยของการเกิดข้อผิดพลาด คือ เวลาคาดหวังที่จะเกิดข้อผิดพลาดถัดไป ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF} &= E(t) \\
 &= \int_0^{\infty} t f(t) dt \\
 &= \int_0^{\infty} R(t) dt
 \end{aligned} \tag{2-9}$$

2.1.4 โค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Hazard Rate Curve)

อัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงช่วงชีวิตของระบบ โดยใช้โค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาด บางครั้งเรียกว่า Bathtub Curve ได้แบ่งโค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาดออกเป็น 3 ส่วนคือ [8]

ส่วนที่ 1 เป็นระยะเริ่มแรกของระบบ ซึ่งเรียกกันว่า ระยะการทดสอบ (Debugging Phase or Infant Mortality Phase) หรือระยะพัฒนา ระยะนี้จะพบข้อผิดพลาดได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 โค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาด

ส่วนที่ 2 เป็นระยะของการเกิดข้อผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Failure Phase) หรือระยะของการใช้งาน (Use Life Phase) จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดข้อผิดพลาดมีค่าเกือบคงที่ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเกิดแบบสุ่ม ซึ่งเป็นช่วงของการใช้งานหรือดำเนินงานตามปกติ สมมติฐานที่ว่าอัตราการเกิดข้อผิดพลาดคงที่ใช้ได้กับระบบเกือบทุกระบบ อย่างไรก็ตามบางระบบอาจมีอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และอาจมีบางระบบที่มีอัตราการเกิดข้อผิดพลาดลดลงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าเมื่อเวลาผ่านไประบบได้มีการปรับปรุง

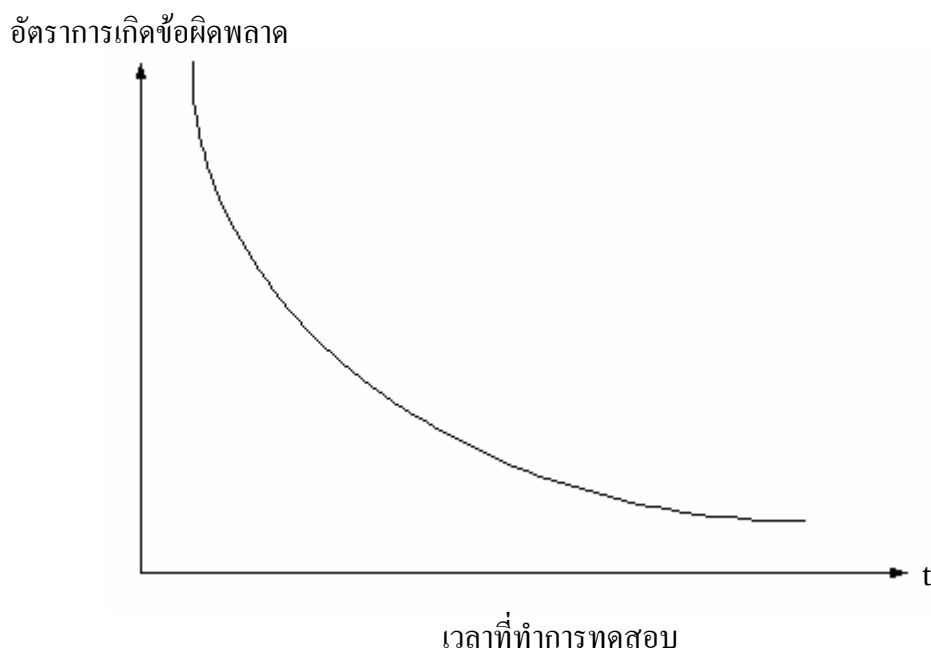
ส่วนที่ 3 เป็นช่วงระยะของการสึกหรอ (Wear Out Phase) จะพบว่าอัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากอายุการใช้งานของระบบที่เสื่อมไปตามกาลเวลา ทำให้เกิดข้อผิดพลาดมากขึ้น

จะสังเกตว่าในส่วนของซอฟต์แวร์ อาจจะไม่ได้อิงไปตามอัตราการเกิดข้อผิดพลาด ดังในภาพที่ 2-2 ในส่วนที่ 3 เนื่องจากโปรแกรมเมื่อผ่านการแก้ไข เช่น การกำจัดข้อผิดพลาด การเพิ่มคำสั่งและการแก้ไขอื่นๆ ทำให้การทำงานของซอฟต์แวร์เกิดข้อผิดพลาดน้อยลง และมีความเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น ระยะของการสึกหรอจึงไม่ค่อยพบในระบบซอฟต์แวร์ [8]

2.2 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability)

Musa [9] ได้ให้คำนิยามความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ไว้ว่า ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability) คือ ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์สามารถประมวลผลและให้ผลลัพธ์ตรงตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งาน โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดภายใต้สภาพแวดล้อมและช่วงเวลาที่กำหนด

แนวความคิดพื้นฐานของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สามารถอธิบายในรูปแบบของโค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาด ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 โค้งอัตราการเกิดข้อผิดพลาด

จากภาพที่ 2-3 จะเห็นว่าอัตราการเกิดข้อผิดพลาดของระบบซอฟต์แวร์มีลักษณะลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเราตรวจพบข้อผิดพลาด โปรแกรมเมอร์จะทำการแก้ไข หรือกำจัดข้อผิดพลาดนั้นออกไป อัตราการเกิดข้อผิดพลาดจึงลดลง

ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะมีความสัมพันธ์กับข้อผิดพลาดและระยะเวลา Musa [9] ได้แบ่งข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดข้อผิดพลาดและระยะเวลาไว้ 4 ลักษณะคือ

1. ระยะเวลาของการเกิดข้อผิดพลาด (Time to Failure)
2. ช่วงเวลาระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Time Interval Between Failure)
3. จำนวนข้อผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้นในเวลาที่ทำการทดสอบ
4. จำนวนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา (Failure Experienced in a Time Interval)

ฟังก์ชันของข้อผิดพลาด (Failure Function) ที่เกี่ยวข้องกับเวลาแสดงได้ 4 รูปแบบคือ

1. ฟังก์ชันข้อผิดพลาดสะสม (Cumulative Failure Function) หมายถึง ฟังก์ชันของจำนวนข้อผิดพลาดสะสมที่อยู่ในช่วงของเวลา $[0, t]$ เราเขียนแทนด้วย $N(t)$
2. ฟังก์ชันค่าเฉลี่ย (Mean Value Function) หมายถึง ฟังก์ชันค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงของเวลา $[0, t]$ เราเขียนแทนด้วย $m(t)$

$$m(t) = E[N(t)] \quad (2-10)$$

3. ฟังก์ชันเวลาเฉลี่ยของการเกิดข้อผิดพลาด (Mean Time to Failure)

$$\begin{aligned} \text{MTTF} &= E(T) \\ &= \int_0^{\infty} tf(t) \\ &= \int_0^{\infty} R(t) \end{aligned} \quad (2-11)$$

4. ฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Intensity Function) แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันข้อผิดพลาดสะสมต่อหน่วยเวลา เราเขียนแทนด้วย $\lambda(t)$

$$\lambda(t) = \frac{dm(t)}{dt} \quad (2-12)$$

2.3 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Model)

ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ คือ สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายกระบวนการเกิดข้อผิดพลาดภายใต้ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ ลักษณะของข้อมูล การแก้ไขข้อผิดพลาด และการใช้งาน การเกิดข้อผิดพลาดขึ้นอยู่กับลักษณะของการผลิต และกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ การแก้ไขข้อผิดพลาดขึ้นอยู่กับเวลา รูปแบบการดำเนินการทดสอบซอฟต์แวร์ และประสิทธิภาพของการกำจัดข้อผิดพลาด การใช้งานเป็นลักษณะรูปแบบของกระบวนการทำงานของซอฟต์แวร์ [8]

ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะพยากรณ์โค้งของอัตราการเกิดข้อผิดพลาด โดยวิธีการทางสถิติซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อ

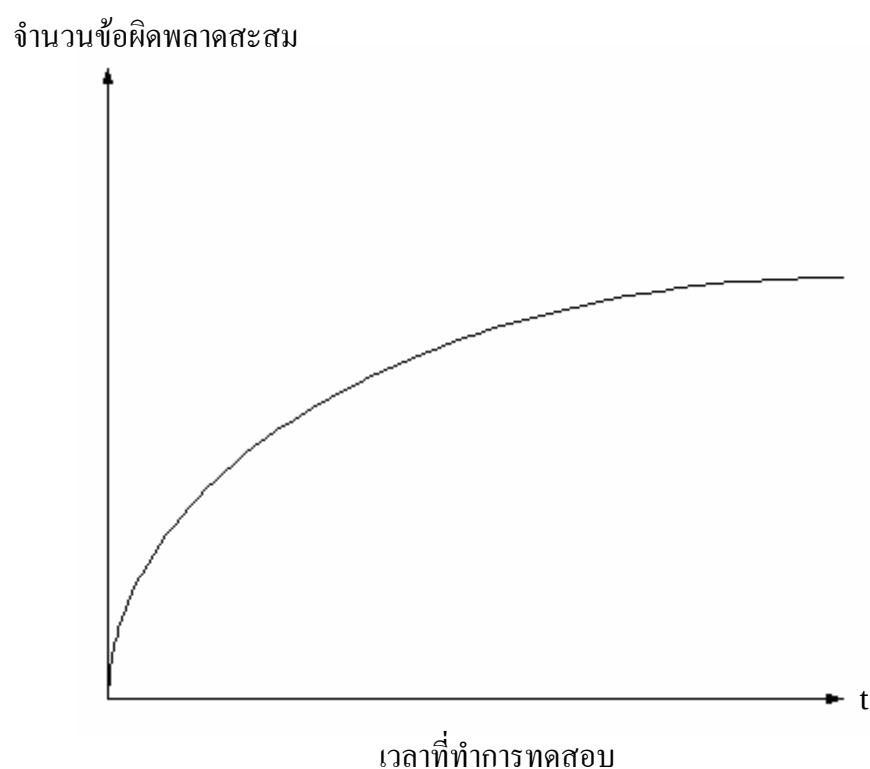
1. พยากรณ์เวลาที่ต้องใช้ทำการทดสอบซอฟต์แวร์
2. พยากรณ์ค่าคาดหวังของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ

ในช่วงระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้ทำการพัฒนาตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ และเสนอตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ภายใต้ความสัมพันธ์ของกระบวนการทดสอบซอฟต์แวร์ไว้เป็นจำนวนมาก ซึ่งผลงานที่เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายว่าเป็นต้นแบบของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ก็คือตัวแบบของ Jenlinski และ Moranda [6] เป็นตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ตัวแบบแรก ซึ่งได้นำเสนอผลงานไว้ในปี ค.ศ. 1972 และหลังจากนั้นเป็นต้นมา ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ก็ถูกพัฒนาขึ้นมา

เป็นลำดับ อาทิแบบ Musa –Okumoto Logarithmic Poisson Execution Time [9] , Goel และ Okumoto [5] เป็นต้น ซึ่งรูปแบบต่างๆ จะอยู่บนพื้นฐานของข้อตกลงเบื้องต้น (Assumptions) ที่เกี่ยวกับลักษณะการเกิดข้อผิดพลาด

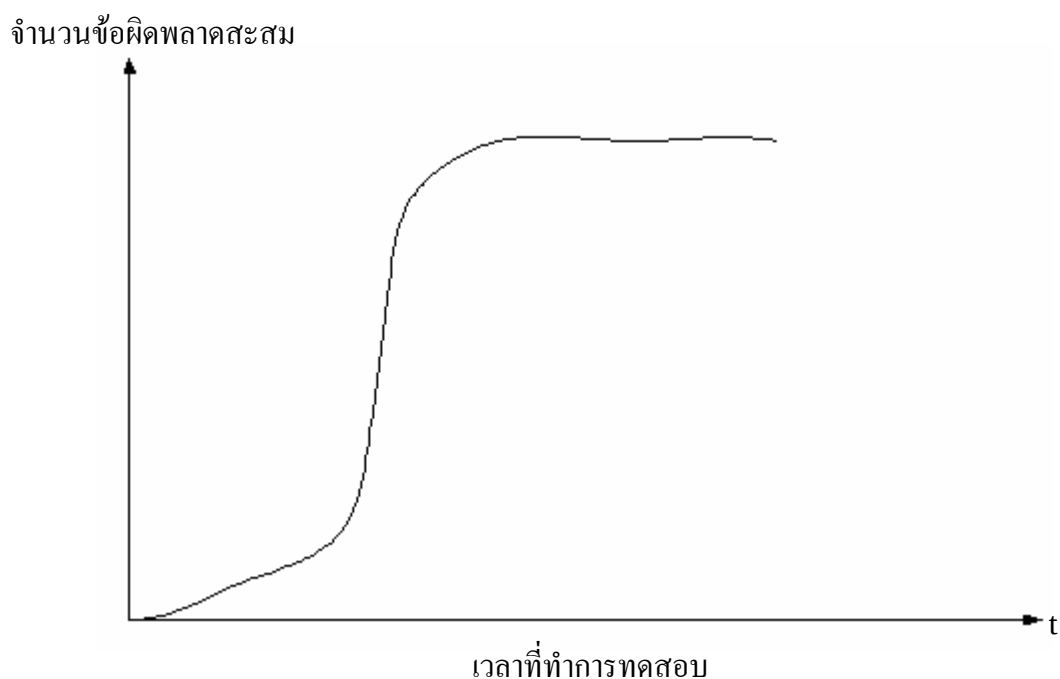
นอกจากนี้รูปแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ยังสามารถอธิบายในรูปของโค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Growth Curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเวลาที่ใช้ไปในการทดสอบโปรแกรม และจำนวนข้อผิดพลาดสะสมที่ตรวจพบ [22]

รูปแบบของโค้งการเจริญเติบโตโดยทั่วไปจะพบอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังแสดงในภาพที่ 2-4 และโค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์แบบตัวเอส (S-Shaped) ดังแสดงในภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-4 โค้งการเจริญเติบโตของความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

จากภาพที่ 2-4 จะเห็นว่าในช่วงแรกจะพบข้อบกพร่อง (Fault) เป็นจำนวนมาก ไค้การเจริญเติบโตจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ช้าลงในตอนหลังเนื่องจากจุดบกพร่อง ถูกกำจัดออกไปจึงทำให้จำนวนจุดบกพร่องที่เหลืออยู่ลดลง การเจริญเติบโต ในช่วงท้ายของการทดสอบค่อยๆ เพิ่มช้าลง



ภาพที่ 2-5 ไค้การเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์แบบตัวเอส (S-Shaped)

จากภาพที่ 2-5 ในระหว่างช่วงแรกของการทดสอบไค้การเจริญเติบโตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากบางจุดบกพร่องจะไม่ถูกตรวจพบถ้าไม่ได้กำจัดจุดบกพร่องที่พบออกไปก่อน และเมื่อจุดบกพร่องถูกกำจัดออกไปจำนวนมาก จึงทำให้จุดบกพร่องที่ยังเหลืออยู่มีจำนวนลดลง ดังนั้นไค้การเจริญเติบโตจึงค่อยๆ ลดลงในตอนช่วงท้ายของการทดสอบ

2.4 ประเภทของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

Farr [3] ได้แบ่งประเภทของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ตามชนิดของจำนวนข้อผิดพลาด ออกเป็น 2 ประเภท

1. ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่มีจำนวนข้อผิดพลาดแบบจำกัด (Finite) เมื่อค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดเมื่อเวลา $t \rightarrow \infty$ หาค่าได้นั้นคือ $\lim_{t \rightarrow \infty} E[N(t)] < \infty$

2. ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่มีจำนวนข้อผิดพลาดแบบไม่จำกัด (Infinite) เมื่อค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดเมื่อเวลา $t \rightarrow \infty$ หาค่าได้นั้นคือ $\lim_{t \rightarrow \infty} E[N(t)] = \infty$

โดยที่ $N(t)$ คือจำนวนข้อผิดพลาดสะสม ณ เวลา t

Musa และ Okumoto [11] ได้แบ่งประเภทของตัวแบบตามคุณลักษณะไว้ดังนี้

1. เวลาของการเกิดข้อผิดพลาด (Time Domain) แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ เวลาปกติที่อยู่ในรูปของปี เดือน สัปดาห์ หรือ วัน (Calendar Time) และเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ไปในการทำงานของซอฟต์แวร์ (Execution Time)

2. จำนวนของข้อผิดพลาด (Number of Failure) ลักษณะของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution)

3. ชนิดของข้อผิดพลาด (Type of Failure) การแจกแจงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นภายในเวลาที่กำหนดมีการแจกแจงที่สำคัญ 2 การแจกแจงคือ การแจกแจงปัวส์ซอง (Poisson Distribution) การแจกแจงทวินาม (Binomial Distribution)

4. ชั้นของข้อผิดพลาด (Class of Failure) (เฉพาะประเภทของข้อผิดพลาดแบบจำกัดเท่านั้น) รูปแบบฟังก์ชันของอัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะอยู่ในรูปของเวลา

5. กลุ่มของข้อผิดพลาด (Family of Failure) (เฉพาะประเภทของข้อผิดพลาดแบบไม่จำกัดเท่านั้น) รูปแบบฟังก์ชันของอัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะอยู่ในรูปของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด

2.4.1 ชนิดของข้อผิดพลาดที่มีการแจกแจงปัวส์ซอง

ถ้าให้ $z_i; i=1,2,3,\dots,n$ เป็นจำนวนของข้อผิดพลาดที่ตรวจพบในช่วงเวลา t_{i-1} ถึง t_i เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง และเป็นอิสระกัน

โดยที่เวลาการเกิดข้อผิดพลาด $t_0 = 0, t_1, \dots, t_{i-1}, t_i, \dots, t_n = t$ เป็นส่วนย่อยของเวลา 0 ถึง t โดยมีค่าเฉลี่ย $E(z_i) = m(t_i) - m(t_{i-1})$ ดังนั้นสำหรับแต่ละ $z_i; i=1,2,3,\dots,n$ มีฟังก์ชันความหนาแน่นคือ

$$\Pr(z_i = x) = \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^x e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]}}{x!} \quad (2-13)$$

ถ้า $m(t)$ เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) นั่นคือ $m(t) = \alpha t; \alpha > 0$ เราเรียกว่าเป็นกระบวนการปัวส์ซอง (Poisson Process) และ $N(t)$ เป็นกระบวนการปัวส์ซองที่มีลักษณะเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous Poisson Process : HPP) แต่ถ้า $m(t)$ ไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของเวลา (nonlinear function) เราเรียกว่า $N(t)$ ว่าเป็นกระบวนการปัวส์ซองแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Nonhomogeneous Poisson Process : NHPP)

ถ้าเรามีตัวแบบเป็นกระบวนการปัวส์ซอง เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด $\lambda(t)$ และฟังก์ชันความเชื่อถือได้ $R(t)$ ได้ดังนี้

สมมติให้ $R(t + \Delta t | t)$ เป็นฟังก์ชันความเชื่อถือได้แบบมีเงื่อนไขที่ซอฟต์แวร์จะยังคงทำงานอยู่หลังจากเวลา $t + \Delta t$ โดยที่ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเวลา t

$$R(t + \Delta t) = \Pr(f_t = 0 | t) \quad (2-14)$$

โดยที่ z_i เป็นตัวแปรสุ่มแบบปัวส์ซองในช่วงเวลา t ถึง $t + \Delta t$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} R(t + \Delta t | t) &= \exp\{-(m(t + \Delta t) - m(t))\} \\ &= \exp\{-\lambda(t')\Delta t\} \\ &= \exp\left\{\int_t^{t+\Delta t} \lambda(x)dx\right\} \end{aligned} \quad (2-15)$$

โดยที่ t' คือจุดในช่วงเวลา $[t, t + \Delta t]$

ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด $\lambda(t)$ และฟังก์ชันอัตราความเสี่ยง $h(t)$

$$h(\Delta t | t_{i-1}) = \lambda(t_{i-1} + \Delta t) \quad (2-16)$$

ซึ่ง t_{i-1} เป็นเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดที่ $i-1$ และ $t_{i-1} \leq t_{i-1} + \Delta t < t_i$ นั้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันอัตราความเสี่ยงแบบมีเงื่อนไขและฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเหมือนกัน ถ้าฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเป็นค่าที่เวลา $t_{i+1} + \Delta t$

2.4.2 ชนิดของข้อผิดพลาดที่มีการแจกแจงทวินาม

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ให้ N เป็นค่าคงที่ของจุดบกพร่องในซอฟต์แวร์ ณ เวลาเริ่มต้นทำการทดสอบโปรแกรม
2. เมื่อข้อผิดพลาดถูกตรวจพบจะทำการกำจัดออกไปทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก
3. ถ้า T_a เป็นตัวแปรสุ่มแทนเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดของจุดบกพร่อง a ดังนั้น $T_a, a = 1, 2, 3, \dots, n$ เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงเหมือนกันและเป็นอิสระกัน

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม $F_a(t)$,ฟังก์ชันความหนาแน่น $f_a(t)$ และฟังก์ชันอัตราความเสี่ยง $h_a(t)$ มีรูปแบบเหมือนกันทุกจุดบกพร่องสำหรับในข้อผิดพลาดชนิดนี้ ฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด $\lambda(t)$ และฟังก์ชันค่าเฉลี่ย $m(t)$ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\lambda(t) = Nf_a(t) \quad (2-17)$$

$$m(t) = Nf_a(t) \quad (2-18)$$

2.5 การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution)

การแจกแจงไวบูลล์ ซึ่งจะให้ X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงไวบูลล์ด้วยพารามิเตอร์ m และ c โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น คือ

$$f(x) = \frac{m}{x} \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^m \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^m} \quad \text{เมื่อ } x > 0 \quad (2-19)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมคือ

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^m} \quad (2-20)$$

โดยที่ $m, c \geq 1$

2.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood

Maximum Likelihood Estimate (MLE) เป็นวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งมีวิธีการดังนี้ให้ $X_1, \dots, X_n$ เป็นตัวอย่างสุ่มจากการแจกแจงที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $f(x; \theta)$ เมื่อ θ เป็นพารามิเตอร์เดี่ยวหรือเป็นเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ (Vector Parameter) จะมีฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นร่วม (Joint Density Function) ของ $X_1, \dots, X_n$ คือ $f(x_1, \dots, x_n; \theta) = f(x_1; \theta)f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta)$ ฟังก์ชันความน่าจะเป็นนี้อาจจะเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ θ ถ้าเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ θ เราจะเรียกว่า Likelihood Function ของตัวอย่างสุ่มเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ L

ดังนั้น L จะเขียนอยู่ในรูป

$$\begin{aligned}
 L(x; \theta) &= L(x_1, \dots, x_n; \theta) \\
 &= f(x_1, \dots, x_n; \theta) \\
 &= f(x_1; \theta) f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta) \\
 &= \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta)
 \end{aligned} \tag{2-21}$$

จากนั้นเราหาค่าประมาณของ $\hat{\theta}$ ที่ทำให้ L มีค่าสูงสุด

$$\text{นั่นคือหา } L(x; \hat{\theta}) \geq L(x; \theta) \tag{2-22}$$

เมื่อ $\hat{\theta}$ หาค่าได้ (Exist)

เราจะได้ว่า $\hat{\theta}$ เป็นตัวประมาณค่า (Estimator) แบบ Maximum Likelihood ของ θ โดยการแก้สมการ 2-23 นั่นคือ

$$\frac{\partial}{\partial \theta} L(x; \theta) = 0 \tag{2-23}$$

หาค่าประมาณของ $\hat{\theta}$ ที่เป็นค่าสูงสุดของ Likelihood Function ออกมาในฟังก์ชันของ $X_1, \dots, X_n$

ในกรณีที่ $L(x; \theta)$ เป็นฟังก์ชันที่ยู่ยากในการหาอนุพันธ์ เราอาจหาค่าของ MLE โดยวิธีการหาอนุพันธ์ $\ln L(x; \theta)$ เทียบกับ θ แทน ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับ $\frac{\partial}{\partial \theta} L(x; \theta) = 0$ และง่ายกว่าจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \ln L(x; \theta) = 0 \quad \text{ถ้า } \theta \text{ เป็นพารามิเตอร์เดียว} \tag{2-24}$$

หรือ

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} \ln L(x; \theta) = 0 \quad \text{ถ้า } \theta \text{ เป็นเวกเตอร์พารามิเตอร์} \tag{2-25}$$

2.7 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่ใช้ในการวิจัย

2.7.1 Goel - Okumoto Model (G-O Model)

Goel และ Okumoto [5] ได้เสนอตัวแบบนี้ในปี ค.ศ.1995 ซึ่งเป็นตัวแบบชนิดปัวส์ซอง (Poisson Type Model) ที่ให้จำนวนข้อผิดพลาดต่อหน่วยเวลาเป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซองและเป็นอิสระกัน มีลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดเป็นกระบวนการปัวส์ซองแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (NHPP)

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสมที่ตรวจพบ ณ เวลา t $N(t)$ มีรูปแบบการแจกแจงปัวส์ซองด้วยฟังก์ชันค่าเฉลี่ย $m(t)$
2. ช่วงเวลาการเกิดจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ $(z_1, z_2, \dots, z_j)$ ในแต่ละจำนวนที่เกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ j และเป็นอิสระกัน
3. ทุกข้อผิดพลาดที่ตรวจพบจะถูกกำจัดออกไปในทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก นั่นคือกระบวนการแก้ไขเสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ (Perfect Debugging)

Goel - Okumoto Model (G-O Model) ตัวแบบความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ในรูปของฟังก์ชันค่าเฉลี่ย $m(t)$ คือ

$$m(t) = a(1 - \exp(-bt)) \quad (2-26)$$

โดยที่ $m(t)$ คือฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$

b คืออัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ; $b > 0$

a คือค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด $t \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} a &= m(\infty) ; m(0) = 0 \\ &= E[N(\infty)] \end{aligned} \quad (2-27)$$

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลเวลาการเกิดข้อผิดพลาด

ข้อผิดพลาดครั้งที่ j	ระยะห่างของการเกิดข้อผิดพลาด	ระยะห่างของการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	t_1	$n_1 = x_1$
2	t_2	$n_2 = x_1 + x_2$
3	t_3	$n_3 = x_1 + x_2 + x_3$
.	.	.
.	.	.
j	t_j	.
		$n_j = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_j$

ให้ระยะห่างการเกิดข้อผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้น (n_j) และ $N(t)$ เป็นตัวแปรสุ่มซึ่งมีการแจกแจงปัวส์ซง (Poisson Distribution) ด้วยฟังก์ชันค่าเฉลี่ย $m(t)$ โดยที่ความน่าจะเป็นที่ $N(t)$ จะมีค่าเท่ากับ n คือ

$$\Pr[N(t) = n] = \frac{[m(t)]^n}{n!} \times e^{-m(t)} \quad (2-28)$$

โดยที่ n_i คือระยะห่างของการเกิดข้อผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้น ณ ขณะเวลา t_i

n_{i+1} คือระยะห่างของการเกิดข้อผิดพลาดสะสมที่เกิดขึ้น ซึ่ง $n_{i+1} > n_i$

ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขของ $N(t_{i+1}) = n_{i+1}$ โดยที่ $N(t_i) = n_i$ คือ

$$\begin{aligned} \Pr[N(t_{i+1}) = n_{i+1} | N(t_i) = n_i] &= \Pr[N(t_{i+1}) - N(t_i) = n_{i+1} - n_i] \\ &= \frac{[m(t_{i+1}) - m(t_i)]^{n_{i+1} - n_i}}{(n_{i+1} - n_i)!} \times e^{-[m(t_{i+1}) - m(t_i)]} \end{aligned} \quad (2-29)$$

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, k$ คือ

$$\begin{aligned} \Pr[N(t_0), N(t_1) = n_1, N(t_2) = n_2, \dots, N(t_j) = n_j] \\ = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \end{aligned} \quad (2-30)$$

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ b สามารถหาได้โดยใช้วิธีการ Maximum Likelihood Estimation

โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้ว่า

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-31)$$

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \end{aligned} \quad (2-32)$$

แทนค่าสมการ $m(t)$ จากสมการ (2-26) ในสมการ (2-32) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\ln L &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[a(1 - e^{-bt_i}) - a(1 - e^{-bt_{i-1}}) \right] - \\
&\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j \left[a(1 - e^{-bt_i}) - a(1 - e^{-bt_{i-1}}) \right] \\
&= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[a(1 - e^{-bt_i}) - a(1 - e^{-bt_{i-1}})] - \\
&\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - a(1 - e^{-bt_j})
\end{aligned} \tag{2-33}$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ b ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - (1 - e^{-bt_j}) = 0 \tag{2-34}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{a} = \frac{n_j}{1 - e^{-bt_j}} \tag{2-35}$$

และ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial b} = at_j e^{-bt_j} - \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \left[\frac{t_i e^{-bt_i} - t_{i-1} e^{-bt_{i-1}}}{e^{-bt_{i-1}} - e^{-bt_i}} \right] = 0 \tag{2-36}$$

แทนค่าสมการ(2-35) ในสมการ (2-36) จะได้ว่า

$$\frac{n_j t_j e^{-bt_j}}{1 - e^{-bt_j}} - \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \left[\frac{t_i e^{-bt_i} - t_{i-1} e^{-bt_{i-1}}}{e^{-bt_{i-1}} - e^{-bt_i}} \right] = 0 \tag{2-37}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{b} = \frac{n_j}{\sum_{i=1}^j t_j + \frac{n_j t_j e^{-t_j}}{(1 - e^{-bt_j})}} \tag{2-38}$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ได้จากสมการ (2-38) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลขใช้วิธีการเซแคนด์

2.7.2 Delayed S-Shaped Model

Yamada [20] ได้เสนอตัวแบบนี้ในปี ค.ศ.1983 โดยพิจารณาจากฟังก์ชันค่าเฉลี่ย มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโต เมื่อข้อมูลมีลักษณะ ของโค้งการเจริญเติบโตเป็นรูปตัวเอส ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโปรแกรมเป็นอิสระซึ่งกันและกัน
2. ความน่าจะเป็นของจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ ณ เวลาใดๆ จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนของข้อผิดพลาดในโปรแกรมทั้งหมดจนถึงเวลาปัจจุบัน และสัดส่วนนั้นเป็นค่าคงที่
3. ข้อผิดพลาดในโปรแกรมจะเกิดขึ้นอย่างสุ่ม
4. ข้อผิดพลาดในโปรแกรมที่พบ ณ เวลาใดๆ สาเหตุมาจากความผิดพลาดของระบบของซอฟต์แวร์
5. เวลาระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดคือ $(i-1)$ และ เวลาที่ i ขึ้นอยู่กับเวลา $(i-1)$ ที่เกิดข้อผิดพลาด
6. ข้อผิดพลาดที่ถูกตรวจพบจะถูกกำจัดออกไปในทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก

Delayed S-Shaped Model เป็นตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ในรูปของฟังก์ชันค่าเฉลี่ย $m(t)$ คือ

$$m(t) = a(1 - (1 + bt)e^{-bt}) \quad (2-39)$$

- โดยที่ $m(t)$ คือฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$
- b คืออัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ; $b > 0$
- a คือค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$

กำหนดให้เวลาขณะที่เกิดข้อผิดพลาด (t_i) จำนวนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น (z_i) แต่ละช่วงเวลา และจำนวนข้อผิดพลาดสะสมตั้งแต่เวลา $[0, t_i)$ (n_i) ดังแสดงในตารางที่ 2-1

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, j$ คือ

$$\begin{aligned} & \Pr[N(t_1) = n_1, N(t_2) = n_2, \dots, N(t_j) = n_j] \\ &= \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \end{aligned} \quad (2-40)$$

ซึ่งฟังก์ชันความน่าจะเป็นนี้อาจจะใช้เป็น Likelihood Function สำหรับการประมาณค่าของพารามิเตอร์ a และ b ของตัวแบบ

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ b สามารถหาได้โดยใช้วิธีการ Maximum Likelihood Estimation)

โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้ว่า

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-41)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \end{aligned} \quad (2-42)$$

แทนค่าสมการ $m(t)$ จากสมการ (2-39) ในสมการ (2-42) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[a(1 - (1 + bt_i)e^{-bt_i}) - a(1 - (1 + bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}}) \right] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j \left[a(1 - (1 + bt_i)e^{-bt_i}) - a(1 - (1 + bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}}) \right] \\ = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[a(1 - (1 + bt_i)e^{-bt_i}) - a(1 - (1 + bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}})] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - a(1 - (1 + bt_j)e^{-bt_j}) \\ = & \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[a((1 - (1 + bt_i)e^{-bt_i}) - (1 - (1 + bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}})) \right] - \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - a(1 - (1 + bt_j)e^{-bt_j}) \end{aligned} \quad (2-43)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & n_k \ln a \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[(1 - (1 + bt_i)e^{-bt_i}) - (1 - (1 + bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}}) \right] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - a(1 - (1 + bt_j)e^{-bt_j}) \end{aligned} \quad (2-44)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ b โดยให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_i} = 0$ แล้วทำการแก้สมการ

จะได้ว่า

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - (1 - (1 + bt_j)e^{-bt_j}) = 0 \quad (2-45)$$

ดังนั้น

$$\hat{a} = \frac{n_j}{(1 - (1 + bt_j)e^{-bt_j})} \quad (2-46)$$

และ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial b} = \left[\sum_{i=1}^j z_i \times (t_i(1-(1+bt_i)e^{-bt_i}bt_i) - t_{i-1}(1-(1+bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}}bt_{i-1}) + (t_i e^{-bt_i} - t_{i-1} e^{-bt_{i-1}})) \right] / \left((1-(1+bt_i)e^{-bt_i}) - (1-(1+bt_{i-1})e^{-bt_{i-1}}) \right) - \left\{ at_j(1-(1+bt_j)e^{-bt_j}) \right\} = 0 \quad (2-47)$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ ได้จากสมการ (2-47) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลขวิธีเซแคนต์

2.7.3 Inflection S-Shaped Model

Ohba [13] ได้เสนอตัวแบบนี้ ในปี ค.ศ.1984 บนพื้นฐานของ NHPP ซึ่งมีลักษณะโค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-Shaped) ภายใต้ข้อตกลงที่ว่า มีบางข้อผิดพลาดในโปรแกรมมีความสัมพันธ์กัน

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. บางข้อผิดพลาดในโปรแกรมมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน
2. ความน่าจะเป็นของจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ ณ เวลาใดๆ จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนข้อผิดพลาดในโปรแกรมทั้งหมดจนถึงเวลาปัจจุบัน และสัดส่วนนั้นเป็นค่าคงที่
3. ข้อผิดพลาดที่ถูกตรวจพบจะถูกกำจัดออกไปในทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก นั่นคือกระบวนการ Debugging เสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์ (Perfect Debugging)

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ $m(t)$ คือ

$$m(t) = \frac{a(1 - e^{(-bt)})}{1 + \beta \exp(-bt)} \quad (2-48)$$

โดยที่ a คือ พารามิเตอร์ของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$

b คือ พารามิเตอร์ของอัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

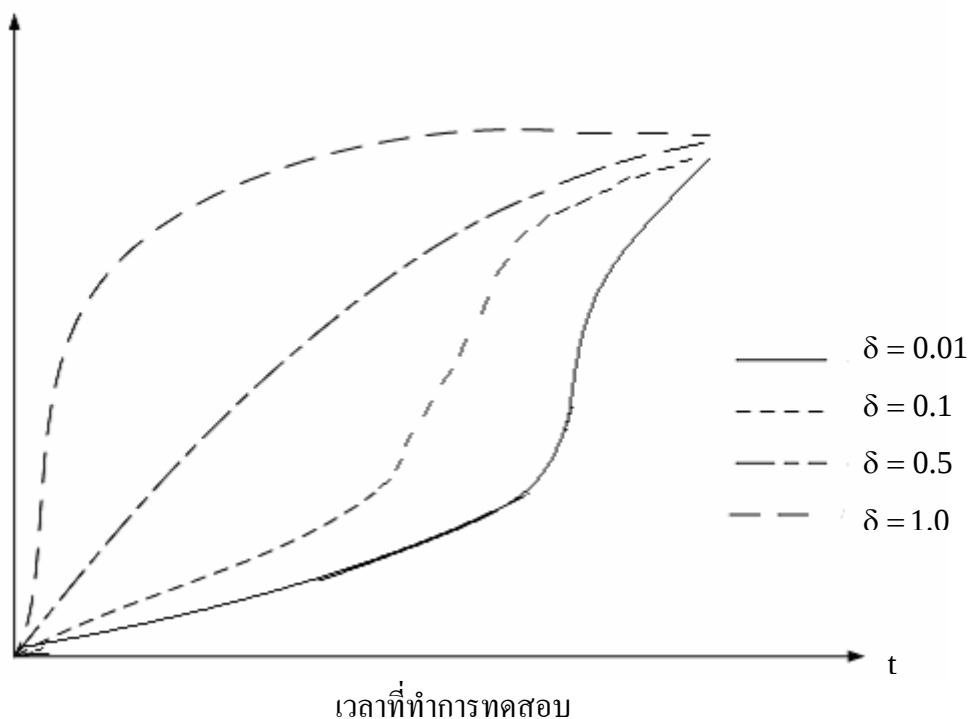
β คือ พารามิเตอร์ของการเปลี่ยนแปลง (Inflection Parameter)

ซึ่งค่าของพารามิเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลง (δ) ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงอัตราส่วนของจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบกับจำนวนของข้อผิดพลาดทั้งหมดในโปรแกรม ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\beta(\delta) = \frac{1-r}{r}; \delta > 0 \quad (2-49)$$

ถ้า $(\delta) = 1$ โค้งการเจริญเติบโตจะมีลักษณะแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล นั่นคือทุกข้อผิดพลาดของโปรแกรมจะถูกตรวจพบในช่วงแรกของการทดสอบ และจะเป็นแบบลอจิสติก เมื่อ δ เข้าใกล้ 0 นั่นคือเท่ากับว่ามีบางข้อผิดพลาดของโปรแกรมถูกตรวจพบในช่วงแรกของการทดสอบและต่อมาถูกตรวจสอบพบโดยทันทีทันใด ดังแสดงในภาพที่ 2-6

จำนวนข้อผิดพลาดสะสม



ภาพที่ 2-6 โค้งการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนแปลง (δ)

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมร่วมของ $[t_i, n_i]$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, j$ คือ

$$\begin{aligned} & \Pr\{N(t_0) = 0, N(t_1) = n_1, N(t_2) = n_2, \dots, N(t_j) = n_j\} \\ &= \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \end{aligned} \quad (2-50)$$

ซึ่งฟังก์ชันความน่าจะเป็นนี้จะใช้เป็น Likelihood Function สำหรับการประมาณค่าของพารามิเตอร์ a, b และ β ของสมการ (2-51)

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b และ β สามารถหาได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าแมกซิมัมไลกลีฮูด โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-51)$$

$$\ln L = \prod_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \prod_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \quad (2-52)$$

แทนค่า $m(t)$ จากสมการ (2-48) ในสมการ (2-52) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\frac{a(1 - e^{-bt_i})}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \frac{a(1 - e^{-bt_{i-1}})}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[n_i - n_{i-1}!] - \sum_{i=1}^j \left[\frac{a(1 - e^{-bt_i})}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \frac{a(1 - e^{-bt_{i-1}})}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right] \\ &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\frac{a(1 - e^{-bt_i})}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \frac{a(1 - e^{-bt_{i-1}})}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \frac{a(1 - e^{-bt_j})}{1 + \beta e^{-bt_j}} \\ &= \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[a \left(\frac{1 - e^{-bt_i}}{1 + \beta e^{-kt_i}} - \frac{(1 - e^{-bt_{i-1}})}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right) \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \frac{a(1 - e^{-bt_j})}{1 + \beta e^{-bt_j}} \\ \ln L &= n_j \ln a + \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[\frac{(1 - e^{-bt_i})}{1 - \beta e^{-kt_i}} - \frac{(1 - e^{-bt_{i-1}})}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \frac{a(1 - e^{-bt_j})}{1 + \beta e^{-bt_j}} \end{aligned} \quad (2-53)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b และ β ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - \frac{1 - e^{-bt_j}}{1 + \beta e^{-bt_j}} = 0 \quad (2-54)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{a} = \frac{n_j(1 + \beta e^{-bt_j})}{1 - \beta e^{-bt_j}} \quad (2-55)$$

$$\text{และ} \quad \frac{\partial \ln L}{\partial b} = \left\{ \sum_{i=1}^j z_i \times \left(\frac{t_i(1 - e^{-bt_i})\beta e^{-bt_i}}{(1 + \beta e^{-bt_i})^2} - \frac{t_{i-1}(1 - e^{-bt_{i-1}})\beta e^{-bt_{i-1}}}{(1 + \beta e^{-bt_{i-1}})^2} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{t_i e^{-bt_i}}{1+\beta e^{-bt_i}} - \frac{t_{i-1} e^{-bt_{i-1}}}{1+\beta e^{-bt_{i-1}}} \right) / \left(\frac{1-e^{-bt_i}}{1+\beta e^{-kt_i}} - \frac{1-e^{-bt_{i-1}}}{1+\beta e^{-kt_{i-1}}} \right) \Bigg\} - \left\{ \frac{at_j e^{-bt_j}}{1+\beta e^{-bt_j}} + \frac{a(1-e^{-bt_j})\beta t_j e^{-bt_j}}{(1+\beta e^{-bt_j})^2} \right\} = 0 \quad (2-56)$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{\beta}$ และ $\hat{\beta}$ ได้จากสมการ (2-56) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลขได้จากวิธีเซแคนต์

2.7.4 Yamada Exponential Model

Yamada [20] ได้เสนอ ในปี ค.ศ.1986 ตัวแบบของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะมีอิทธิพลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Testing Effort) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมนี้ ได้แก่ ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมของโปรแกรมเมอร์ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบ ได้แก่ โปรแกรม งบประมาณในการดำเนินงาน ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมนี้ จะไม่มีรูปแบบคงที่ตลอดการทดสอบ ซึ่งตัวแบบอื่นจะกำหนดให้ระดับความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมมีรูปแบบที่คงที่ รูปแบบของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

1. ถ้าความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมค่อยๆ ลดลงลักษณะคล้ายการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียล โค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Curve)

2. ถ้าความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างช้าๆ ลักษณะคล้ายการแจกแจงเรย์ลีย์ (Rayleigh Distribution) ในช่วงหลังของการทดสอบ โค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะมีลักษณะเป็นแบบตัวเอส

3. ถ้าความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงหลังของการทดสอบ มีลักษณะคล้ายการแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) โค้งการเจริญเติบโตของความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์จะมีลักษณะเป็นแบบตัวเอสอย่างชัดเจน

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ซอฟต์แวร์เกิดข้อผิดพลาดที่เวลาใดๆ มีสาเหตุมาจากจุดบกพร่องที่เหลื่ออยู่ในโปรแกรม
2. แต่ละครั้งของการเกิดข้อผิดพลาด จุดบกพร่องที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดนั้นจะถูกกำจัดออกไปในทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก

3. ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้มีการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียล

4. ข้อผิดพลาดที่ตรวจจับได้ในการทดสอบโปรแกรมมีลักษณะเป็น NHPP

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ คือ

$$m(t) = a \left[1 - \exp(-r\alpha(1 - e^{-\beta t})) \right] \quad (2-57)$$

โดยที่ a คือพารามิเตอร์ของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$

b คือพารามิเตอร์ของอัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

r คืออัตราการตรวจพบข้อผิดพลาดต่อจำนวนข้อผิดพลาด (Error Detection Rate Per Error) โดยที่ $0 < r < 1$

α คือผลรวมทั้งหมดของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Total of Testing Effort)

β คือพารามิเตอร์ของการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม

ฟังก์ชันการแจกแจงของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม $w_E(t)$ และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม $W_E(t)$ คือ

$$w_E(t) = \alpha\beta \times e^{-\beta t} \quad (2-58)$$

และ

$$W_E(t) = \int_0^t w_E(x) dx \quad (2-59)$$

$$= \alpha \left[1 - e^{-\beta t} \right] \quad (2-60)$$

พารามิเตอร์ α และ β ใน Testing Effort Function สามารถประมาณค่าได้โดย Least Squares Method ได้ค่าประมาณของพารามิเตอร์ดังนี้

$$\hat{\alpha} = \exp \left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^j \ln w_{E_i} - \ln \beta + \frac{\beta}{j} \times \sum_{i=1}^j t_i \right] \quad (2-61)$$

$$\hat{\beta} = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^j \ln w_{E_i} \right) \times \left(\sum_{i=1}^j t_i \right) - j \times \sum_{i=1}^j t_i \times \ln w_{E_i}}{j \times \sum_{i=1}^j t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^j t_i \right)} \right] \quad (2-62)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมร่วมของ $[t_i, n_i]$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, j$ คือ

$$\Pr\{N(t_0) = 0, N(t_1) = n_1, N(t_2) = n_2, \dots, N(t_j) = n_j\}$$

$$= \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-63)$$

ซึ่งฟังก์ชันความน่าจะเป็นนี้จะใช้เป็น Likelihood Function สำหรับการประมาณค่าของพารามิเตอร์ a และ r ของสมการ (2-64)

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ r สามารถหาได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าแมกซิมัมไลกลีฮูด โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-64)$$

$$\ln L = \prod_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \prod_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \quad (2-65)$$

แทนค่า $m(t)$ จากสมการ (2-57) ในสมการ (2-65) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \{a [1 - \exp(-r \times W_E(t_i))]\} \\ & a [1 - \exp(-r \times W_E(t_{i-1}))]\} - \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \\ & \sum_{i=1}^j \{a [1 - \exp(-r \times W_E(t_i))] - a [1 - \exp(-r \times W_E(t_{i-1}))]\} \end{aligned} \quad (2-66)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & n_j \times \ln a + \sum_{i=1}^j z_i \times \ln [\exp(-r \times W_E(t_{i-1})) - \exp(-r \times W_E(t_i))] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln(z_i!) - a [1 - \exp(-r \times W_E(t_j))] \end{aligned} \quad (2-67)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ $\hat{a}$ และ $\hat{r}$ จะได้ว่า

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - [1 - \exp(-r \times W_E(t_j))] = 0 \quad (2-68)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{a} = \frac{n_j}{1 - \exp(-r \times W_E(t_j))} \quad (2-69)$$

และ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial r} = \sum_{i=1}^j \frac{z_i [W_E(t_i) \times \exp(-r \times W_E(t_i)) - W_E(t_{i-1}) \times \exp(-r \times W_E(t_{i-1}))]}{\exp(-r \times W_E(t_{i-1})) - \exp(-r \times W_E(t_i))} - \frac{a \times W_E(t_j) \times \exp(-r \times W_E(t_j))}{\exp(-r \times W_E(t_{j-1})) - \exp(-r \times W_E(t_j))} \quad (2-70)$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{r}$ ได้จากสมการ (2-70) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลข

2.7.5 Yamada Rayleigh Model

Yamada [21] ได้เสนอว่าไค้การเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์สำหรับตัวแบบจะมีอิทธิพลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมนี้ จะมีลักษณะการแจกแจงเรย์ล้ายจ์

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ซอฟต์แวร์เกิดข้อผิดพลาดที่เวลาใดๆ มีสาเหตุมาจากจุดบกพร่องที่เหลืออยู่ในโปรแกรม
2. แต่ละครั้งของการเกิดข้อผิดพลาด จุดบกพร่องที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดนั้นจะถูกกำจัดออกไปทันทีและไม่เกิดขึ้นมาใหม่อีก
3. ความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้มีการแจกแจงเรย์ล้ายจ์
4. ข้อผิดพลาดที่ตรวจจับได้ในการทดสอบโปรแกรมมีลักษณะเป็น NHPP

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ คือ

$$m(t) = a \left[1 - \exp \left(-r\alpha \left(1 - e^{-\frac{\beta t^2}{2}} \right) \right) \right] \quad (2-71)$$

- โดยที่
- a คือพารามิเตอร์ของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$
 - b คือพารามิเตอร์ของอัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
 - r คืออัตราการตรวจพบข้อผิดพลาดต่อจำนวนข้อผิดพลาด (Error Detection Rate Per Error) โดยที่ $0 < r < 1$

α คือผลรวมทั้งหมดของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Total of Testing Effort)

β คือพารามิเตอร์สเกลของการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม

ฟังก์ชันการแจกแจงของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม $W_R(t)$ และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม $W_E(t)$ คือ

$$W_R(t) = \alpha\beta \cdot \exp\left(\frac{\beta t^2}{2}\right) \quad (2-72)$$

$$\text{และ } W_R(t) = \int_0^t w_R(x)dx \quad (2-73)$$

$$= \alpha \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta t^2}{2}\right) \right] \quad (2-74)$$

พารามิเตอร์ α และ β ใน Testing Effort Function สามารถประมาณค่าได้โดย Least Squares Method ได้ค่าประมาณของพารามิเตอร์ดังนี้

$$\hat{\alpha} = \exp\left[\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^j \ln\left(\frac{w_{Ri}}{t_i}\right) - \ln \beta + \frac{\beta}{j} \times \sum_{i=1}^j t_i^2\right] \quad (2-75)$$

$$\hat{\beta} = 2 \times \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^j \ln\left(\frac{w_{Ri}}{t_i}\right)\right) \times \left(\sum_{i=1}^j t_i^2\right) - j \times \sum_{i=1}^j t_i^2 \times \ln\left(\frac{w_{Ri}}{t_i}\right)}{j \times \sum_{i=1}^j t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^j t_i\right)^2} \right] \quad (2-76)$$

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a และ r สามารถหาได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าแมกซิมัมไลกลิสต์ โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1}))^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1}))]} \quad (2-78)$$

$$\ln L = \prod_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1}))] - \prod_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1}))] \quad (2-79)$$

แทนค่า $m(t)$ จากสมการ (2-71) ในสมการ (2-79) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \{a[1 - \exp(-r \times W_R(t_i))]\} \\ & a[1 - \exp(-r \times W_R(t_{i-1}))]\} - \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \\ & \sum_{i=1}^j \{a[1 - \exp(-r \times W_R(t_i))]\} - a[1 - \exp(-r \times W_R(t_{i-1}))]\} \end{aligned} \quad (2-80)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & n_j \times \ln a + \sum_{i=1}^j z_i \times \ln [\exp(-r \times W_R(t_{i-1})) - \exp(-r \times W_R(t_i))]\} - \\ & \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - a[1 - \exp(-r \times W_R(t_j))] \end{aligned} \quad (2-81)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ $\hat{a}$ และ $\hat{r}$ โดยให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \theta} = 0$ แล้วทำการแก้สมการจะได้ว่า

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - [1 - \exp(-r \times W_R(t_j))] = 0 \quad (2-82)$$

ดังนั้น
$$\hat{a} = \frac{n_j}{1 - \exp(-r \times W_R(t_j))} \quad (2-83)$$

และ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial r} = \sum_{i=1}^j z_i \frac{[W_R(t_i) \times \exp(-r \times W_R(t_i)) - W_R(t_{i-1}) \times \exp(-r \times W_R(t_{i-1}))]}{\exp(-r \times W_R(t_{i-1})) - \exp(-r \times W_R(t_i))} - a \times W_R(t_j) \times \exp(-r \times W_R(t_j)) = 0 \quad (2-84)$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{r}$ ได้จากการหาคำตอบเชิงตัวเลขวิธีเซแคนต์

2.7.6 Yamada Imperfect Debugging Model

Yamada [21] ได้เสนอว่าความสามารถในการทดสอบโปรแกรมมีอิทธิพลต่อตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์โดยสมมติให้ความสามารถในการทดสอบมีการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียล

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ตัวแบบที่ทำการแก้ไขข้อผิดพลาดไม่สามารถทำได้โดยสมบูรณ์ (Imperfect Debugging)

2. ความน่าจะเป็นของจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ ณ เวลาใดๆ จะเป็นสัดส่วนกับจำนวนข้อผิดพลาดในโปรแกรมทั้งหมดจนถึงเวลาปัจจุบัน และสัดส่วนนั้นเป็นค่าคงที่

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ คือ

$$m(t) = \frac{ab}{\alpha + b} (e^{\alpha t} - e^{-bt}) \quad (2-85)$$

โดยที่ a คือพารามิเตอร์ของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$

b คือพารามิเตอร์ของอัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

α คือผลรวมทั้งหมดของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Total of Testing Effort)

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b และ α สามารถหาได้โดยใช้วิธีการประมาณค่า Maximum Likelihood Estimation

โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้ว่า

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1} - 1}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-87)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \end{aligned} \quad (2-88)$$

แทนค่าสมการ $m(t)$ จากสมการ (2-85) ในสมการ (2-88) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-bt_i}) \right) - \left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-bt_{i-1}}) \right) \right] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j \left[\left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-bt_i}) \right) - \left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-bt_{i-1}}) \right) \right] \\ = & \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-bt_i}) \right) - \left(\frac{ab}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-bt_{i-1}}) \right) \right] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \frac{ab}{b+\alpha} (e^{\alpha t_j} - e^{-bt_j}) \\ = & \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[a \left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-bt_i}) \right) - \left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-bt_{i-1}}) \right) \right] - \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \frac{ab}{b+\alpha} (e^{\alpha t_j} - e^{-bt_j}) \end{aligned} \quad (2-89)$$

$$\begin{aligned} \ln L = & n_k \ln a \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[\left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-bt_i}) \right) - \left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-bt_{i-1}}) \right) \right] - \\ & \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \frac{ab}{b+\alpha} (e^{\alpha t_j} - e^{-bt_j}) \end{aligned} \quad (2-90)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b และ α จะได้ว่า

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - \frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_j} - e^{-bt_j}) = 0 \quad (2-91)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{a} = \frac{b+\alpha}{b} \frac{n_j}{(e^{\alpha t_j} - e^{-bt_j})} \quad (2-92)$$

และ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \ln L}{\partial b} = & \left\{ \left[\sum_{i=1}^j \left(t_i \left(\frac{b}{(b+\alpha)^2} (e^{-\alpha t_i} - e^{-b t_i}) \right) \times (b+\alpha) - t_{i-1} \left(\frac{b}{(b+\alpha)^2} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-b t_{i-1}}) \right) \times (b+\alpha) \right) \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{t_i (e^{-\alpha t_i} - e^{-b t_i})}{b+\alpha} - \frac{t_{i-1} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-b t_{i-1}})}{b+\alpha} \right) \right] / \\
& \left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_i} - e^{-b t_i}) \right) - \left(\frac{b}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_{i-1}} - e^{-b t_{i-1}}) \right) \left. \right\} - \\
& \left\{ \frac{\alpha t_j}{b+\alpha} (e^{-\alpha t_j} - e^{-b t_j}) + \frac{(a b t_j \alpha)}{(b+\alpha)^2} (e^{-\alpha t_j} - e^{-b t_j}) \right\} = 0
\end{aligned} \tag{2-93}$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}$ และ $\hat{\alpha}$ ได้จากสมการ (2-93) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลขจากวิธีเซแคนต์

2.7.7 Pham-Nordmann Model

Pham [15] ได้เสนอตัวแบบนี้ในปี ค.ศ.1995 เป็นตัวแบบที่มีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับอัตราการตรวจพบข้อผิดพลาด

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. อัตราการตรวจพบข้อผิดพลาดเป็นฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Function) ของเวลาที่ทำการทดสอบ

2. ข้อผิดพลาดที่ตรวจพบเป็นอัตราส่วนที่ไม่เพิ่มขึ้น

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ คือ

$$m(t) = \frac{a}{1 + \beta e^{-bt}} \left(\left[1 - e^{-bt} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t \right) \tag{2-94}$$

โดยที่ a คือพารามิเตอร์ของค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลา $t \rightarrow \infty$

b คือพารามิเตอร์ของอัตราข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

α คือผลรวมทั้งหมดของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Total of Testing Effort)

β คือพารามิเตอร์สเกลของการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม

ค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b และ α สามารถหาได้โดยใช้วิธีการ Maximum Likelihood Estimation

โดยให้ L เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ $[t_i, n_i]$ จะได้ว่า

$$L = \prod_{i=1}^j \frac{[m(t_i) - m(t_{i-1})]^{n_i - n_{i-1}}}{(n_i - n_{i-1})!} \times e^{-[m(t_i) - m(t_{i-1})]} \quad (2-96)$$

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln[m(t_i) - m(t_{i-1})] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j [m(t_i) - m(t_{i-1})] \end{aligned} \quad (2-97)$$

แทนค่าสมการ $m(t)$ จากสมการ (2-94) ในสมการ (2-97) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \sum_{i=1}^j \left[\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \left[\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} - \left([1 - e^{-bt_{i-1}}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1} \right) \right] \end{aligned} \quad (2-98)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^j (n_i - n_{i-1}) \times \ln \left[\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right] - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln[(n_i - n_{i-1})!] - \left(\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_j}} - \left([1 - e^{-bt_j}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_j \right) \right) \\ &= \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[\frac{1}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right] - \left(\frac{1}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} - \left([1 - e^{-bt_{i-1}}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1} \right) \right) - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \left(\frac{a}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right) \\ \ln L &= n_k \ln a \sum_{i=1}^j z_i \times \ln \left[\frac{1}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \left([1 - e^{-bt_i}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right) \right] - \left(\frac{1}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} - \left([1 - e^{-bt_{i-1}}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1} \right) \right) - \\ &\quad \sum_{i=1}^j \ln(z_i)! - \frac{a}{1 + \beta e^{-bt_j}} - \left([1 - e^{-bt_j}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_j \right) \end{aligned} \quad (2-99)$$

เราสามารถหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ a, b, α และ β จะได้ว่า

$$\frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{n_j}{a} - \frac{1}{1 + \beta e^{-bt_j}} - \left(\frac{1}{1 + \beta e^{-bt_j}} - \left([1 - e^{-bt_j}] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_j \right) \right) = 0 \quad (2-100)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{a} = 1 + \beta e^{-bt_j} + n_j \left(\frac{\left[1 - e^{-bt_j} \right]}{\left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right]} - \alpha t_j \right) \quad (2-101)$$

และ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln L}{\partial b} = & \left\{ \sum_{i=1}^j z_i \left(\frac{t_i \left(\left[1 - e^{-bt_i} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right)}{\left(1 + \beta e^{-bt_i} \right)^2} \right) - \left(\frac{t_{i-1} \left(\left[1 - e^{-bt_{i-1}} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1} \right)}{\left(1 + \beta e^{-bt_{i-1}} \right)^2} \right) \right\} + \\ & + \left\{ \frac{\left[t_i e^{-bt_i} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i}{1 + \beta e^{-bt_i}} - \frac{\left[t_{i-1} e^{-bt_{i-1}} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1}}{1 + \beta e^{-bt_{i-1}}} \right\} / \\ & \left\{ \left(\frac{\left(\left[1 - e^{-bt_i} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_i \right)}{\left(1 + \beta e^{-bt_i} \right)^2} \right) - \left(\frac{\left(\left[1 - e^{-bt_{i-1}} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_{i-1} \right)}{\left(1 + \beta e^{-bt_{i-1}} \right)^2} \right) \right\} - \\ & \left\{ \frac{a \left[1 - e^{-bt_j} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_j}{1 + \beta e^{-bt_j}} + \frac{a \left[1 - e^{-bt_j} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{\beta} \right] + \alpha t_j \left(\beta t_j e^{-bt_j} \right)}{\left(1 + \beta e^{-bt_j} \right)} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (2-102)$$

เราสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}, \hat{\alpha}$ และ $\hat{\beta}$ ได้จากสมการ (2-102) โดยการหาคำตอบเชิงตัวเลขจากวิธีการเซแคนต์

2.7.8 วิธีการ U-Plot [8]

เป็นเทคนิคสำหรับหาความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันพยากรณ์กับค่าสังเกตของข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเรียกว่า U-Plot ซึ่งหาจากการสร้างกราฟด้วยวิธีการ U-Plot โดยให้สมมติฐานหลักคือการแจกแจงของ U เป็นการของยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 และให้สมมติฐานรองคือ การแจกแจง U ไม่เป็นการแจกแจงยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance (Kolmogorov - Smirnov distance statistic) ต่ำที่สุด

U-Plot เป็นการตัดสินใจใช้ฟังก์ชันพยากรณ์ $\hat{F}_j(t)$ มีเข้าใกล้ฟังก์ชันการแจกแจงที่ถูกต้อง $F_j(t)$ กำหนดให้ตัวแปรสุ่ม t_j มีฟังก์ชันการพยากรณ์ $\hat{F}_j(t)$ ฟังก์ชันการพยากรณ์มีการแจกแจงที่เหมือนกัน และกำหนดให้ $U_j = \hat{F}_j(t_j)$ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จะเรียกว่าแปลง

ค่าความน่าจะเป็นสะสมทางสถิติ (Probability Integral Transform in Statistics) ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$U_j = \hat{F}_j(t_j) \quad (2-103)$$

จะสนใจความเบี่ยงเบนของฟังก์ชันพยากรณ์ โดยจะพลอตฟังก์ชันการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่าง (Sample Distribution Function) ของ ซึ่งจะกำหนดให้ลำดับฟังก์ชันการพยากรณ์ $\hat{F}_j(t)$, $t = s, \dots, i$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และตำแหน่ง $U_s, U_{s+1}, \dots, U_j$ แต่ละจำนวนมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

2.7.9 วิธีการ Y-Plot [8]

นำค่าที่ได้จากวิธีการ U-Plot มาใส่ในฟังก์ชันที่กำหนด และคำนวณค่า Y_i ออกมาเพื่อสร้างกราฟด้วยวิธีการ Y-Plot โดยให้สมมติฐานหลักคือ การแจกแจงของ Y เป็นการของยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 และให้สมมติฐานรองคือ การแจกแจง Y ไม่เป็นการแจกแจงยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance (Kolmogorov – Smirnov distance statistic) ต่ำที่สุด มีวิธีการคล้ายๆ กับ วิธีการ U-Plot ซึ่งจะกำหนดให้ $x_j = -\ln(1 - U_j)$ และสามารถคำนวณค่า Y-Plot ดังนี้

$$Y_i = \frac{\sum_{j=1}^i x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (2-104)$$

เมื่อ n คือ เวลาการเกิดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

i คือ ฟังก์ชันของแต่ละ x_j

2.7.10 The Prequential Likelihood Ration (PLR) [8]

โดยทั่วไปจะเป็นการเปรียบเทียบของฟังก์ชันการพยากรณ์ เพื่อให้เกิดความแม่นยำ และเมื่อเส้นตรงที่โค้งเข้าหาค่าที่ไม่สิ้นสุด (Asymptotically) ซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบของตัวแบบสองตัวแบบ เมื่อเปรียบเทียบตัวแบบสองตัวแบบ ซึ่งจะกำหนดให้ฟังก์ชันพยากรณ์ที่ระยะเวลาที่ j โดยจะนำฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Prediction Density Function (pdf, $f_j(t) \equiv F'_j(t)$)) ของเวลาถัดไปที่จะเกิดความผิดพลาด ฟังก์ชันพยากรณ์ทั้งสองตัวแบบที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่ j ก็จะทำให้เห็นจำนวนที่เกิดความผิดพลาด ณ เวลาที่ t_j

โดยทั่วไปของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่ถูกต้องฟังก์ชัน Prequential Likelihood จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสองตัวแบบที่นำมาศึกษา

นิยามของ Prequential Likelihood (PL) ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม สำหรับช่วงเวลา t_i ซึ่งมีการคำนวณดังนี้

$$PL_n = \prod_{i=k+1}^{j+n} f_i(t) \quad (2-105)$$

การเปรียบเทียบของสองตัวแบบสามารถคำนวณ PLR ได้ดังนี้

$$PLR_n^{AB} = \frac{\prod_{i=j+1}^{j+n} f_i^A(t_i)}{\prod_{i=j+1}^{j+n} f_i^B(t_i)} \quad (2-106)$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัยหลายท่านเช่น Jelinski และ Moranda [6] Musa และ Okmoto [11] Littlewood [7] ได้พัฒนาตัวแบบสำหรับวัดความเชื่อมั่นของซอฟต์แวร์ไว้มากมายตัวแบบเหล่านี้ใช้ประมาณจำนวนข้อผิดพลาดในซอฟต์แวร์ในขั้นตอนของการทดสอบโปรแกรมเพื่อหาค่าความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ และนำไปสู่ขั้นตอนของการพัฒนาซอฟต์แวร์ และหาเวลาที่เหมาะสมในการปล่อยซอฟต์แวร์ออกสู่ตลาดต่อไป

งานวิจัยเกี่ยวกับตัวแบบความเชื่อถือของซอฟต์แวร์ที่สำคัญ มีดังนี้

Pham [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความแม่นยำในการคำนวณของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ซึ่งคำนวณจากจำนวนข้อผิดพลาดที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ 5 ตัวแบบ ได้แก่ Goel และ Okumoto (G-O Model), Ohba (Inflection S-Shaped Model), Yamada (Yamada Imperfect Debugging Model) และ Pham (Pham-Zhang Model) โดยใช้ค่า Sum of Squared Error (SSE) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกใช้ตัวแบบ โดยใช้ข้อมูลจริงที่ได้จากการเก็บรวบรวมจำนวนข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริงจากโปรแกรมทั้งหมด 1,000 บรรทัด ข้อมูลมีลักษณะคล้ายการแจกแจงเอ็กซ์โพเนนเชียลของ Pham และหาฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดในช่วงเวลา $[0, t)$ ซึ่งผลการวิจัยสรุปได้ว่าตัวแบบของ Pham Pham-Zhang Model ให้ค่า Sum of Squared Error (SSE) น้อยที่สุดในทุกชุดข้อมูลจึงทำให้ตัวแบบนี้มีค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด

Tamura Y. และ Yamada S. [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบวิธีการประเมินผลสำหรับการแจกแจงที่สอดคล้องกับระบบ ของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่คำนวณจากจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบตัวแบบ Inflection S-Shaped Model กับตัวแบบ Nonhomogeneous Poisson Process จะประยุกต์ใช้ประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบ โดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจ A kaikes Information Criterion (AIC) และ Mean Square Error (MSE) ผลสรุปการวิจัยได้ว่า ตัวแบบ Nonhomogeneous Poisson Process ให้ค่า AIC และ MSE ต่ำที่สุดในทุกชุดข้อมูล จึงทำให้ตัวแบบนี้มีค่าคลาดเคลื่อนในการคำนวณจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด

S.H. Kan [23] ได้นำตัวแบบความเชื่อถือได้มาปรับปรุงให้อุตสาหกรรมซอฟต์แวร์มีคุณภาพ โดยในอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์ใช้ควบคุมอย่างมีระบบจนกระทั่งได้ผลความแม่นยำในการควบคุมการผลิตซอฟต์แวร์ ตัวแบบความเชื่อถือได้สามารถช่วยในการพัฒนาคุณภาพโดยมีการควบคุมคุณภาพให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับนโยบายของผู้บริหาร ตัวแบบความเชื่อถือได้ที่นำมาเปรียบเทียบความแม่นยำ Rayleigh Model และ Exponential Model นำมาเปรียบเทียบเพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลที่มีการแจกแจงไวบูลล์ โดยใช้ R-Squared มีค่าสูงแสดงว่าตัวแบบนี้เป็นตัวแบบที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลที่มีการแจกแจงไวบูลล์ ผลสรุปการวิจัยได้ว่า ตัวแบบ Rayleigh Model ให้ค่า R-Squared มีค่าสูงกว่าตัวแบบ Exponential Model ดังนั้นตัวแบบ Rayleigh Model จึงมีความความแม่นยำในการวิเคราะห์ลักษณะข้อมูลที่มีการแจกแจงไวบูลล์

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ต้องการเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ 7 ตัวแบบ ได้แก่ G-O Model Delayed S-Shaped Model Inflection S-Shaped Model Yamada Exponential Model Yamada Rayleigh Model Yamada Imperfect Debugging Model และ Pham-Nordmann Model โดยการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแบบว่าเหมาะสมกับข้อมูลจริง และข้อมูลที่มีการแจกแจงไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ลักษณะต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนในการคัดเลือกตัวแบบที่มีความเหมาะสมกับข้อมูล มีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิจัย

3.2 วิเคราะห์ข้อมูล

3.3 ประเมินค่าตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่คำนวณได้จากเวลาที่เกิดข้อผิดพลาดที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ของแต่ละตัวแบบ

3.4 เสนอการตัดสินใจที่ใช้ในการหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแบบ

3.5 การนำเสนอข้อมูล

3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิจัย

เนื่องจากตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่นำมาทำการศึกษา 7 ตัวแบบ ซึ่งข้อตกลงเบื้องต้นของตัวแบบประเภทนี้ข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องมีลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดเป็นกระบวนการปัวซองแบบไม่เอกพันธ์ (Nonhomogeneous Poisson Process : NHPP) ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาวิเคราะห์กับข้อมูลจริงซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมของนักวิจัยในอดีต ซึ่งเก็บรวบรวมไว้ในหนังสือ Handbook of Software Reliability Engineering และข้อมูลจริง 5 ชุดข้อมูล ซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมของนักพัฒนาซอฟต์แวร์บันทึกและเก็บรวบรวมไว้ที่เว็บไซต์ <http://www.softwaretechnews.com> และข้อมูลที่จำลองการแจกแจงไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ (m, c) , $(15, 120)$, $(10, 80)$, $(4, 60)$, $(2, 40)$ ตามลำดับ

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อกำหนดลักษณะที่มาและประเภทของข้อมูลที่นำมาทำการวิเคราะห์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำข้อมูลนั้นมาวาดกราฟแสดงจำนวนข้อผิดพลาดเปรียบเทียบกับเวลาเพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลและโค้งการเจริญเติบโต และนำมาสร้างกราฟความน่าจะเป็นด้วยวิธี U-Plot สร้างกราฟความน่าจะเป็นด้วยวิธี Y-Plot หาค่า PLR ระหว่างสองตัวแบบโดยการทดสอบทุกคู่ที่เป็นไปได้ และ หาค่า MSE ของแต่ละตัวแบบ

3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากโค้งการเจริญเติบโตแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบตามวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่นำเสนอไปในหัวข้อ 2.7 และทำการประมาณค่าฟังก์ชันค่าเฉลี่ย (Mean Value Function) $m(t)$ ของแต่ละตัวแบบ

3.4 เกณฑ์การตัดสินใจที่ใช้ในการหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพของตัวแบบ

3.4.1 วิธีการ U-Plot [8] ซึ่งหาจากการสร้างกราฟด้วยวิธีการ U-Plot โดยให้สมมติฐานหลัก การแจกแจงของ U เป็นการของยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 และให้สมมติฐานรอง การแจกแจง U ไม่เป็นการแจกแจงยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance (Kolmogorov – Smirnov distance statistic) ต่ำที่สุด

3.4.2 วิธีการ Y-Plot [8] นำค่าที่ได้จากวิธีการ U-Plot มาใส่ในฟังก์ชันที่กำหนด และคำนวณค่า Y_i ออกมาเพื่อสร้างกราฟด้วยวิธีการ Y-Plot โดยให้สมมติฐานหลัก การแจกแจงของ Y เป็นการของยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 และให้สมมติฐานรอง การแจกแจง Y ไม่เป็นการแจกแจงยูนิฟอร์มบนช่วง 0 ถึง 1 จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance (Kolmogorov – Smirnov distance statistic) ต่ำที่สุด

3.4.3 The Prequential Likelihood Ration (PLR) [8] เป็นการทดสอบว่าการประมาณค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็น $\hat{f}(t)$ มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริง $f_i(t)$ เพียงใด มีวิธีการดังนี้

3.4.3.1 คำนวณค่า PL (Prequential Likelihood) โดยใช้สูตร

$$PL_n = \prod_{i=k+1}^{j+n} f_i(t)$$
 เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ k คือจำนวนข้อมูลครั้งแรกที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ครั้งแรก

3.4.3.2 เกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกว่าตัวแบบใดใช้ได้ดีโดยอาศัยค่า PLR_n^{AB} มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าตัวแบบ A มีประสิทธิภาพดีกว่า ตัวแบบ B ซึ่งตัวแบบ A เหมาะสม และสามารถใช้อธิบายลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลนั้นได้ดีในทางตรงกันข้ามถ้าหากค่า PLR_n^{AB} มีค่าลดลงแสดงว่าตัวแบบ B มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแบบ A ซึ่งแสดงว่าตัวแบบ B นั้น เหมาะสม และสามารถอธิบายลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลนั้นได้ดี

3.4.4 ใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เฉลี่ย เฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบ [22] ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เฉลี่ย เฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) สามารถคำนวณได้ดังนี้

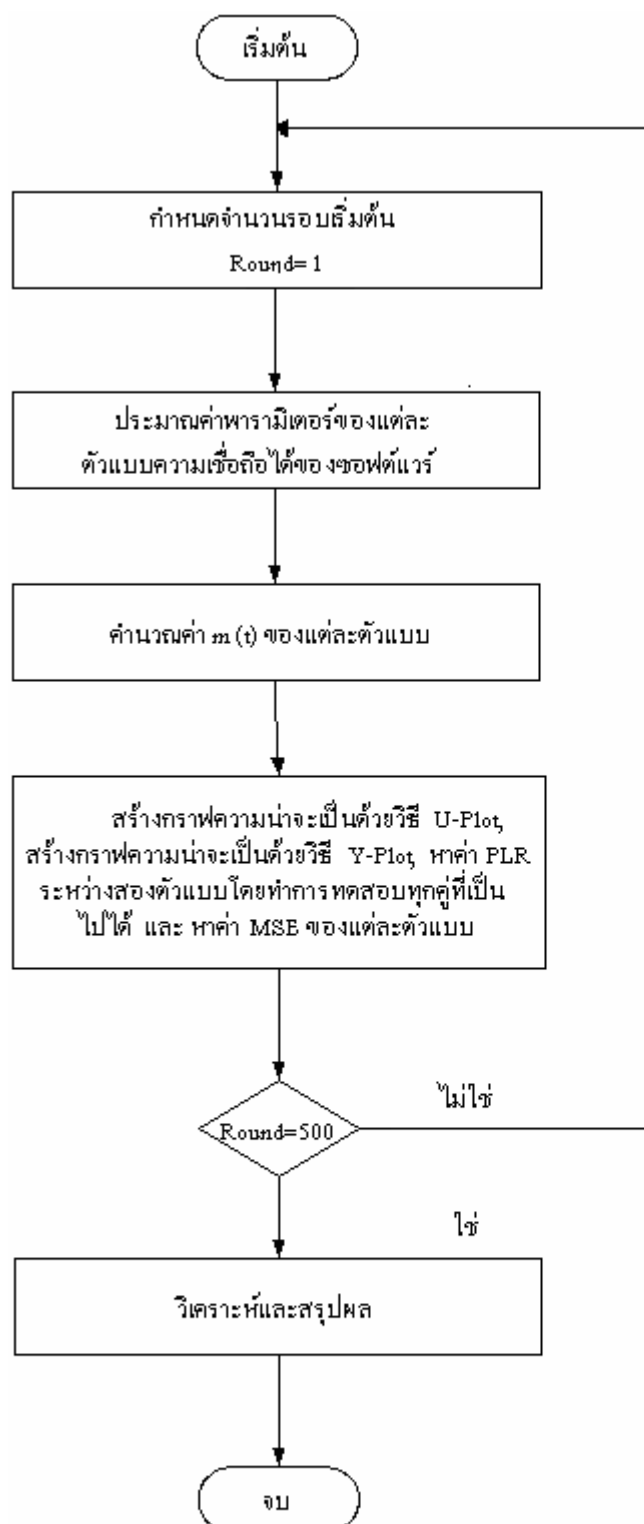
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^k [y_i - m(t_i)]}{n - k} \quad (3-1)$$

โดยที่ y_i คือจำนวนข้อผิดพลาดสะสม ณ เวลาที่ $[0, t_i)$
 $m(t_i)$ คือจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากการประมาณค่าของแต่ละตัวแบบ ณ เวลา t_i
 n คือจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดที่ตรวจพบ
 k คือจำนวนพารามิเตอร์ในแต่ละตัวแบบ

3.5 การนำเสนอข้อมูล

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอข้อมูลในรูปแบบของตารางและกราฟในแต่ละตัวแบบ จากนั้นจะทำการสรุปผลและข้อเสนอแนะ

ทุกขั้นตอนของการทดลองเป็นไปตามภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนผังวิธีการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่คำนวณจากจำนวนข้อผิดพลาด 7 ตัวแบบ คือ

1. Goel -Okumoto Model (G-O Model)
2. Delayed S-Shaped Model
3. Inflection S-Shaped Model
4. Yamada Exponential Model
5. Yamada Rayleigh Model
6. Yamada Imperfect Debugging Model
7. Pham-Nordmann Model

โดยใช้ข้อมูลจริงซึ่งเป็นเวลาการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์ ที่ได้จากการเก็บรวบรวมของนักวิจัยในอดีต จำนวน 1 ชุดข้อมูล เก็บรวบรวมไว้ใน Lyu [8] และข้อมูลจริง 5 ชุดข้อมูล ซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมของนักพัฒนาซอฟต์แวร์บันทึกและเก็บรวบรวมไว้ที่เว็บไซต์ <http://www.softwaretechnews.com> และข้อมูลที่ทำกรจำลอง ซึ่งมีการแจกแจงไวบูลล์

เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ (m,c) , (15, 120), (10, 80), (4, 60), (2, 40) จำนวน 4 ชุด เป็นระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดที่พบระหว่างการทดสอบซอฟต์แวร์ แล้วนำข้อมูลของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมาคำนวณหาตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตัวแบบ ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) สำหรับตัวแบบของ Yamada ทั้ง 3 ตัวแบบ เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถทราบข้อมูลของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Testing Effort) ที่สมมุติให้พารามิเตอร์ของผลรวมของความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม $\gamma = 100$ เพราะในการตรวจสอบโปรแกรม บริษัทผู้ผลิตซอฟต์แวร์จะต้องใช้ Testing Effort ในการดำเนินงานแต่ละโปรแกรม และกำหนดให้อัตราการตรวจพบข้อผิดพลาด $r = 0.90$ เพราะเมื่อเราใช้ Testing Effort ในการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสูง เราย่อมจะตรวจพบข้อผิดพลาดที่สูงเช่นเดียวกัน โดยที่อัตราการตรวจพบข้อผิดพลาดจะอยู่ภายใต้เงื่อนไข $0 < r < 1$

การพิจารณาประสิทธิภาพของตัวแบบ ได้ดังนี้

1. วิธีการ U-Plot จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance น้อยที่สุด
2. วิธีการ Y-Plot จะเลือกตัวแบบที่มีค่า KS-distance น้อยที่สุด
3. ถ้าหากค่า PLR_n^{AB} มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าตัวแบบ A มีประสิทธิภาพดีกว่า ตัวแบบ B ซึ่งตัวแบบ A เหมาะสม และสามารถใช้อธิบายลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลนั้นได้ดี ในทางตรงกันข้ามถ้าหากค่า PLR_n^{AB} มีค่าลดลงแสดงว่าตัวแบบ B มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแบบ A ซึ่งแสดงว่าตัวแบบ B นั้นเหมาะสม และสามารถอธิบายลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลนั้นได้ดี
4. จะใช้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) Zhang และ Pham [22] เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบซึ่งค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error : MSE) ที่มีให้ค่าต่ำสุด จึงจะเป็นตัวแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

การเสนอผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 10 ชุดข้อมูล โดยแต่ละชุดข้อมูลจะมีขั้นตอนการนำเสนอ ดังต่อไปนี้

2. แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้ของตัวแบบทั้ง 7 ตัวแบบ
3. แสดงตารางค่าสถิติ KS ที่คำนวณได้จากทั้ง 7 ตัวแบบ
4. แสดงการเปรียบเทียบกราฟของ U-Plot และ Y-Plot ของทั้ง 7 ตัวแบบ
5. แสดงการเปรียบเทียบค่า MSE ทั้ง 7 ตัวแบบ
6. แสดงตารางค่า PLR_n ลำดับสุดท้าย ทั้ง 7 ตัวแบบ

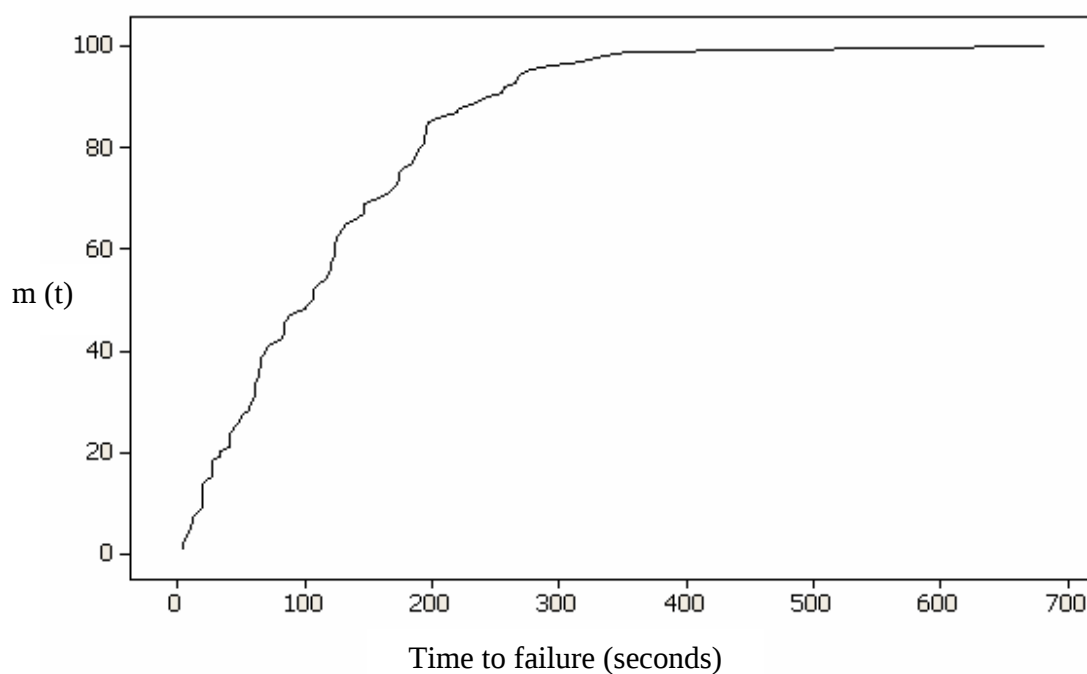
เพื่อความสะดวกในการนำเสนอผลการวิจัยครั้งนี้ จึงกำหนดให้สัญลักษณ์ต่อไปนี้แทนความหมายต่างๆ ดังนี้

G-O	หมายถึงตัวแบบของ Goel และ Okumoto [5]
Delayed S-Shaped	หมายถึงตัวแบบของ Yamada [20]
S-Shaped	หมายถึงตัวแบบของ Ohba [13]
Y-Exp	หมายถึงตัวแบบของ Yamada Exponential [21]
Y-Ray	หมายถึงตัวแบบของ Yamada Rayleigh [21]
Y-Imperfect Debugging	หมายถึงตัวแบบของ Yamada Imperfect Debugging [21]
P-Nordmann	หมายถึงตัวแบบของ Pham-Nordmann [15]
M (t)	หมายถึงจำนวนข้อผิดพลาดสะสม ณ เวลาที่ t

ผลการวิจัยแต่ละชุดข้อมูล มีดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจำลอง

4.1.1 เมื่อระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ที่ $m = 15$ และ $c = 120$ เก็บอยู่ในรูปของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสมข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100 จุด จากเวลาการทดสอบ 681.287 วินาที แสดงในภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 1

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-1 มีรายละเอียดดังนี้

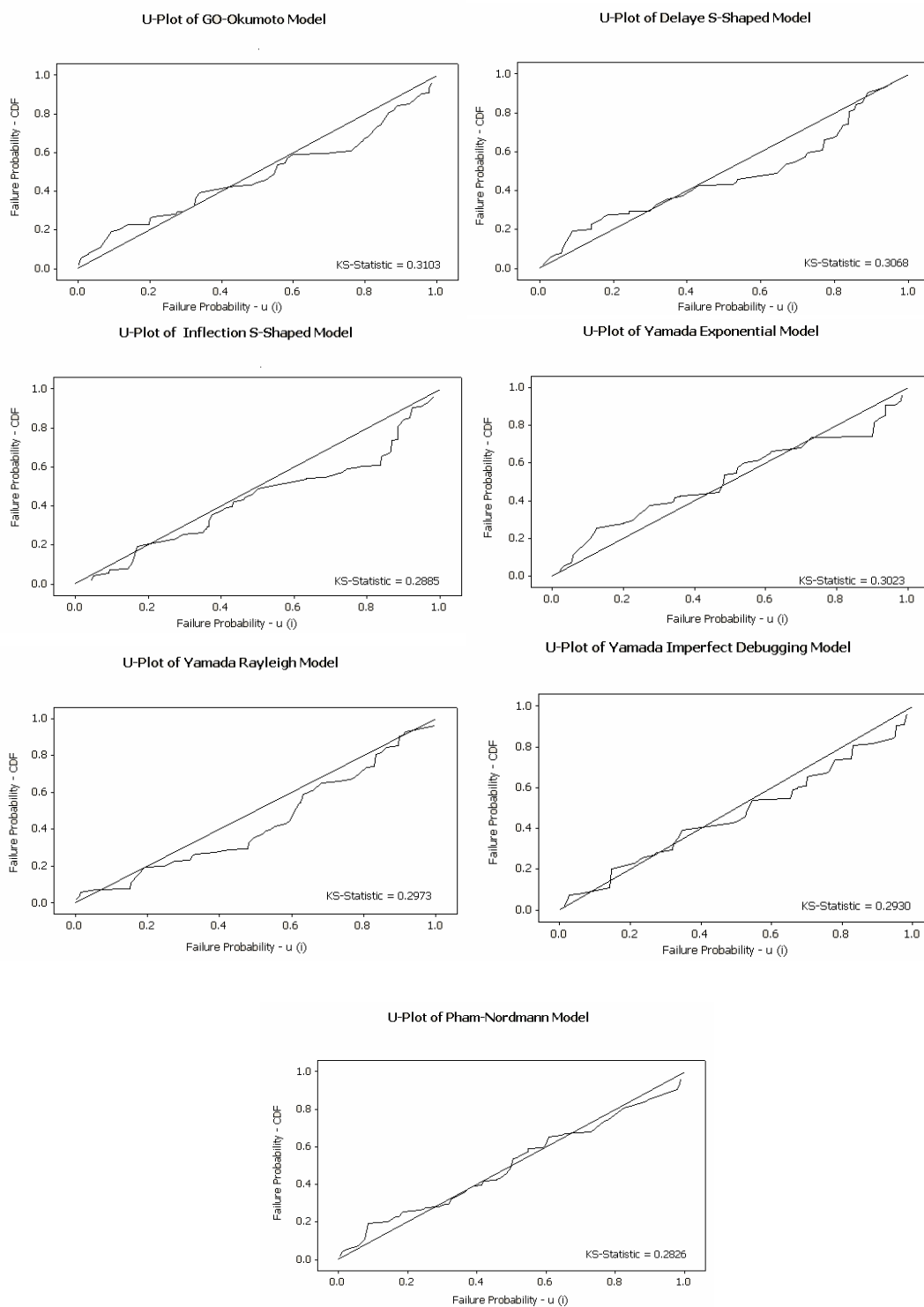
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	674.831	0.0549	-	-
Delayed S-Shaped	704.621	0.0471	-	-
S-Shaped	657.820	0.0411	-	9.823
Y-Exp	887.349	-	0.0642	0.0480
Y-Ray	683.940	-	6.9880	0.00826
Y-Imperfect Debugging	687.954	0.0671	0.0036	-
P-Nordmann	680.352	0.085	0.00049	8.900

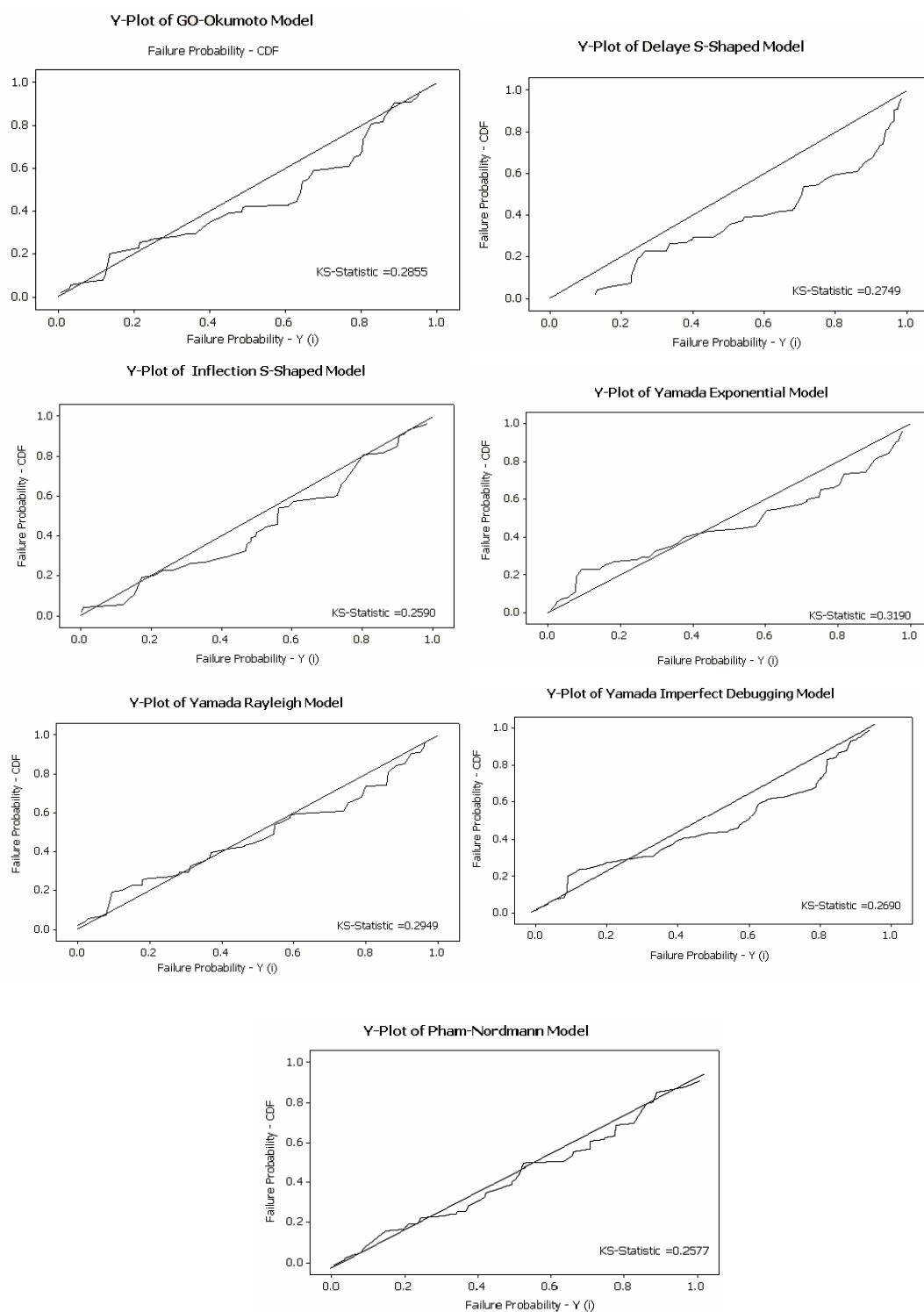
ตารางที่ 4-2 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.3130	0.2855
Delayed S-Shaped	0.3068	0.2749
S-Shaped	0.2885	0.2590
Y-Exp	0.3023	0.3190
Y-Ray	0.2973	0.2949
Y-Imperfect Debugging	0.2930	0.2690
P-Nordmann	0.2826*	0.2577*

จากภาพที่ 4-2 และภาพที่ 4-3 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-2 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1



ภาพที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตัวแบบ	MSE
G-O	5.519465
Delayed S-Shaped	2.10376
S-Shaped	2.66361
Y-Exp	7.663326
Y-Ray	3.92026
Y-Imperfect Debugging	4.887938
P-Nordmann	1.07998*

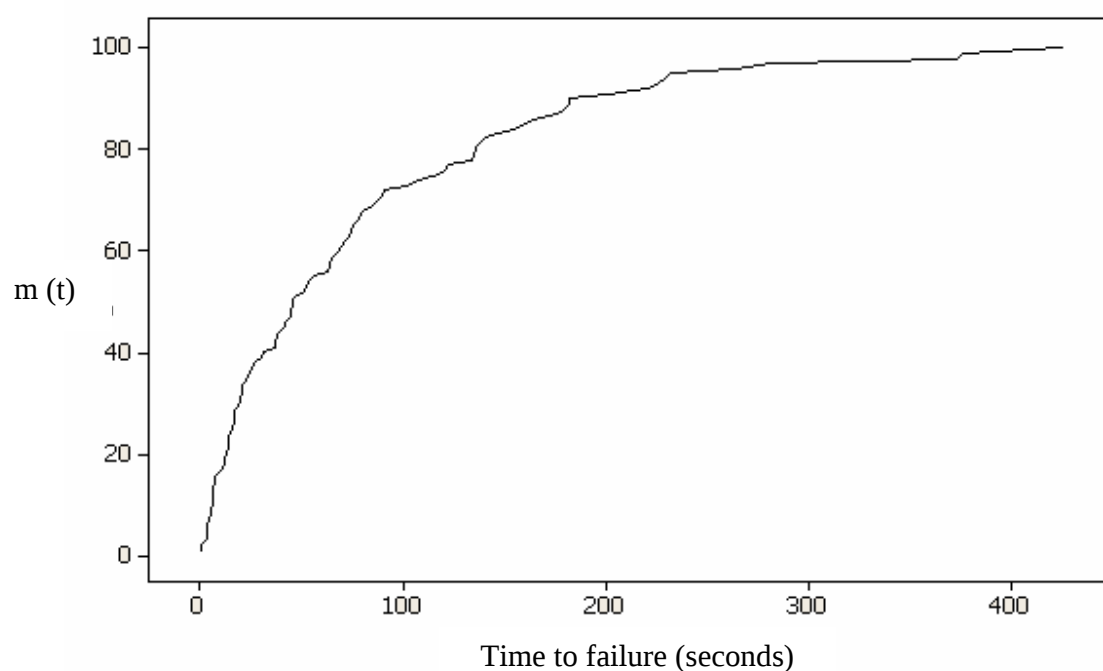
จากตารางที่ 4-3 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.07998 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-4 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.1395
Delayed S-Shaped	1.6524
S-Shaped	1.781
Y-Exp	4.337
Y-Ray	1.9463
Y-Imperfect Debugging	0.8577
P-Nordmann	0.049*

จากตารางที่ 4-4 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.1.2 เมื่อระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ที่ $m = 10$ และ $c = 80$ เก็บอยู่ในรูปของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสมข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100 จุด จากเวลาการทดสอบ 424.998 วินาที แสดงในภาพที่ 4-4



ภาพที่ 4-4 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 2

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-5 มีรายละเอียดดังนี้

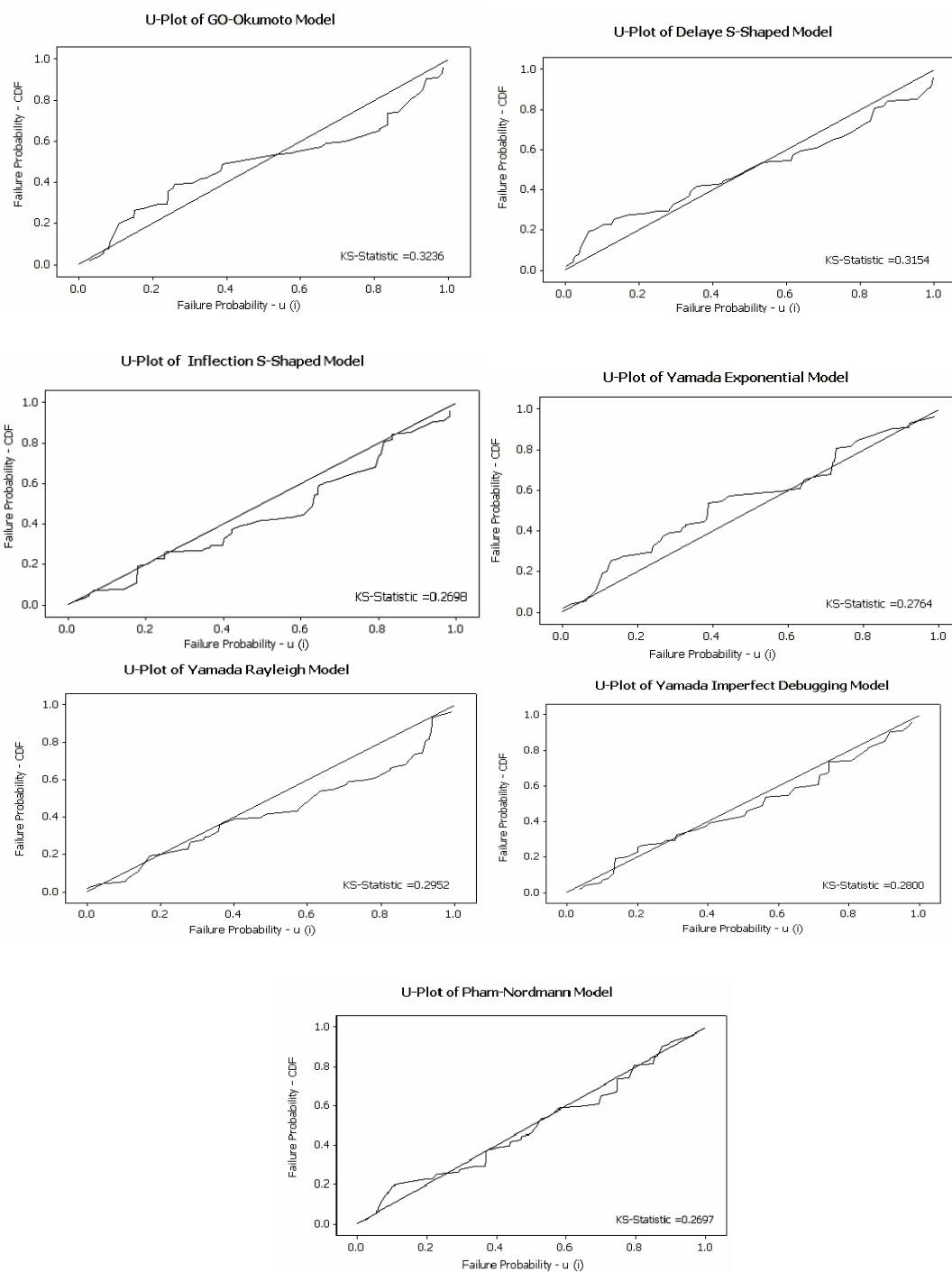
ตารางที่ 4-5 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	95.8312	0.0352	-	-
Delayed S-Shaped	98.37	0.0374	-	-
S-Shaped	87.43	0.0563		3.794
Y-Exp	102.46	-	0.078902	0.0186
Y-Ray	97.41	-	1.3275	0.000841
Y-Imperfect Debugging	96.46	0.0321472	-0.0023	
P-Nordmann	90.56	0.0324	0.00035	1.793

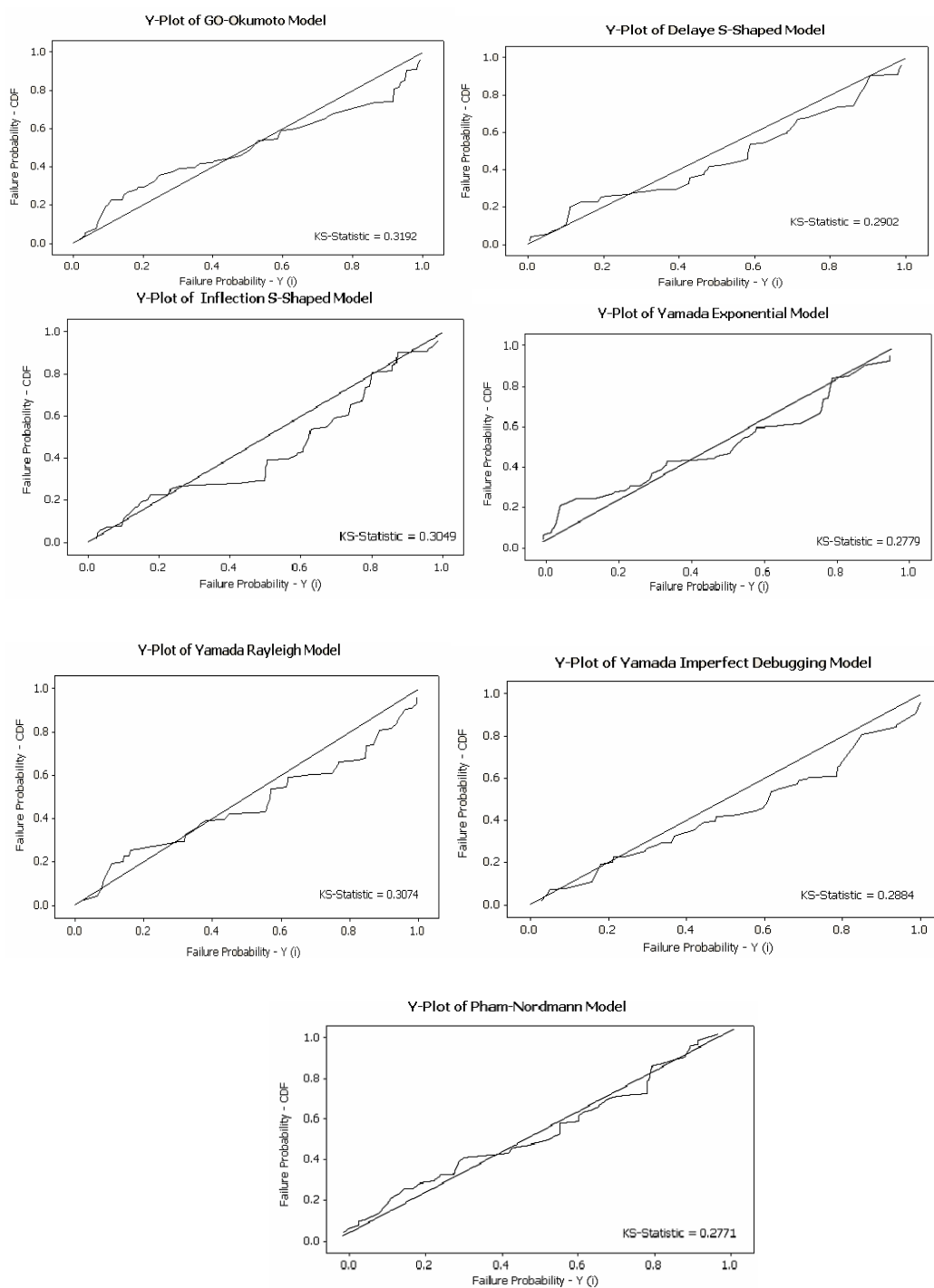
ตารางที่ 4-6 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.3236	0.3192
Delayed S-Shaped	0.3154	0.2902
S-Shaped	0.2698	0.3049
Y-Exp	0.2764	0.2779
Y-Ray	0.2952	0.3074
Y-Imperfect Debugging	0.2800	0.2884
P-Nordmann	0.2697*	0.2771*

จากภาพที่ 4-5 และภาพที่ 4-6 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-6 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุดทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2



ภาพที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตารางที่ 4-7 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแบบ	MSE
G-O	8.91339
Delayed S-Shaped	1.58632
S-Shaped	4.46677
Y-Exp	7.22929
Y-Ray	3.33851
Y-Imperfect Debugging	4.1033
P-Nordmann	1.53586*

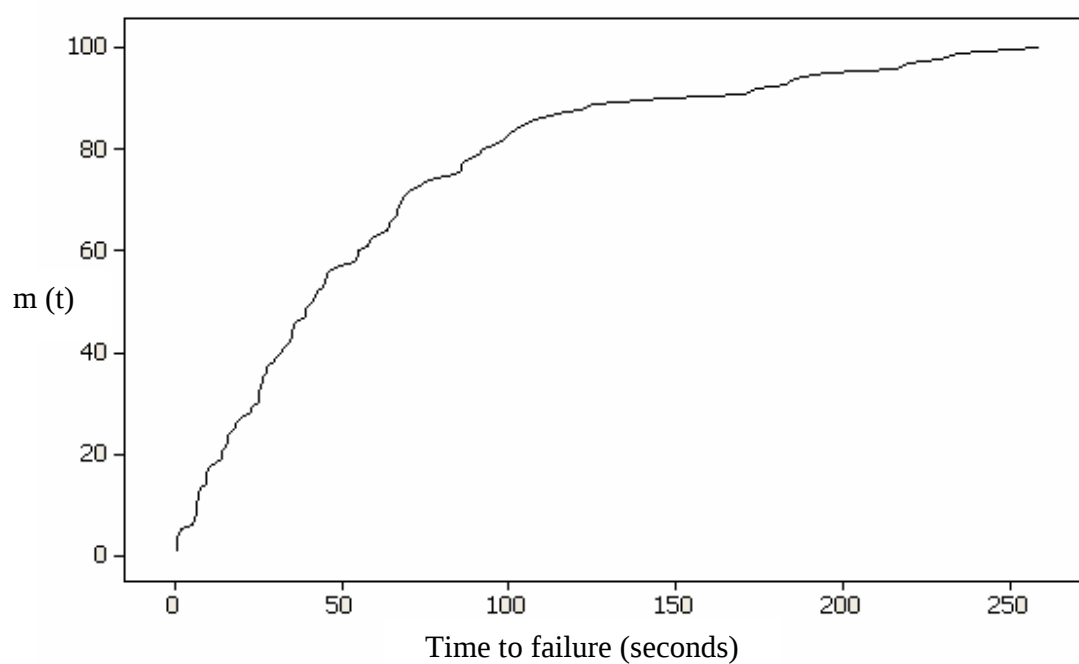
จากตารางที่ 4-7 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.53586 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-8 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.7395
Delayed S-Shaped	0.4420
S-Shaped	3.061
Y-Exp	0.3245
Y-Ray	3.8530
Y-Imperfect Debugging	1.0861
P-Nordmann	0.1542*

จากตารางที่ 4-8 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.1.3 เมื่อระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ที่ $m = 4$ และ $c = 60$ เก็บอยู่ในรูปของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสมข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100 จุด จากเวลาการทดสอบ 258.473 วินาที แสดงในภาพที่ 4-7



ภาพที่ 4-7 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 3

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-9 มีรายละเอียดดังนี้

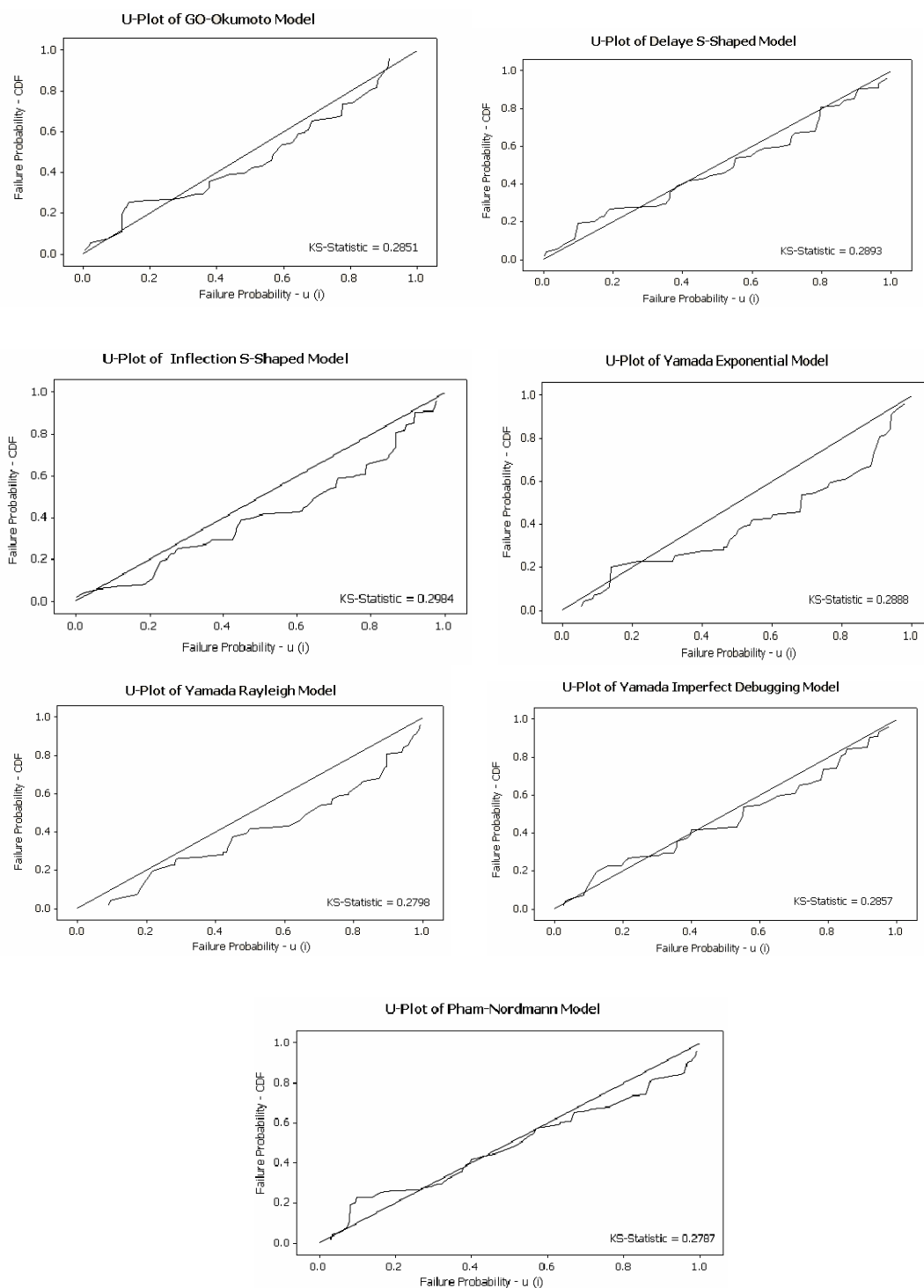
ตารางที่ 4-9 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	95.72	0.0792	-	-
Delayed S-Shaped	95.57	0.0593	-	-
S-Shaped	86.31	0.0758	-	5.9539
Y-Exp	107.80	-	0.0598	0.0305
Y-Ray	98.53	-	3.7821	0.000725
Y-Imperfect Debugging	98.97	0.0507	-0.00101	-
P-Nordmann	96.72	0.0532	0.00021	2.543

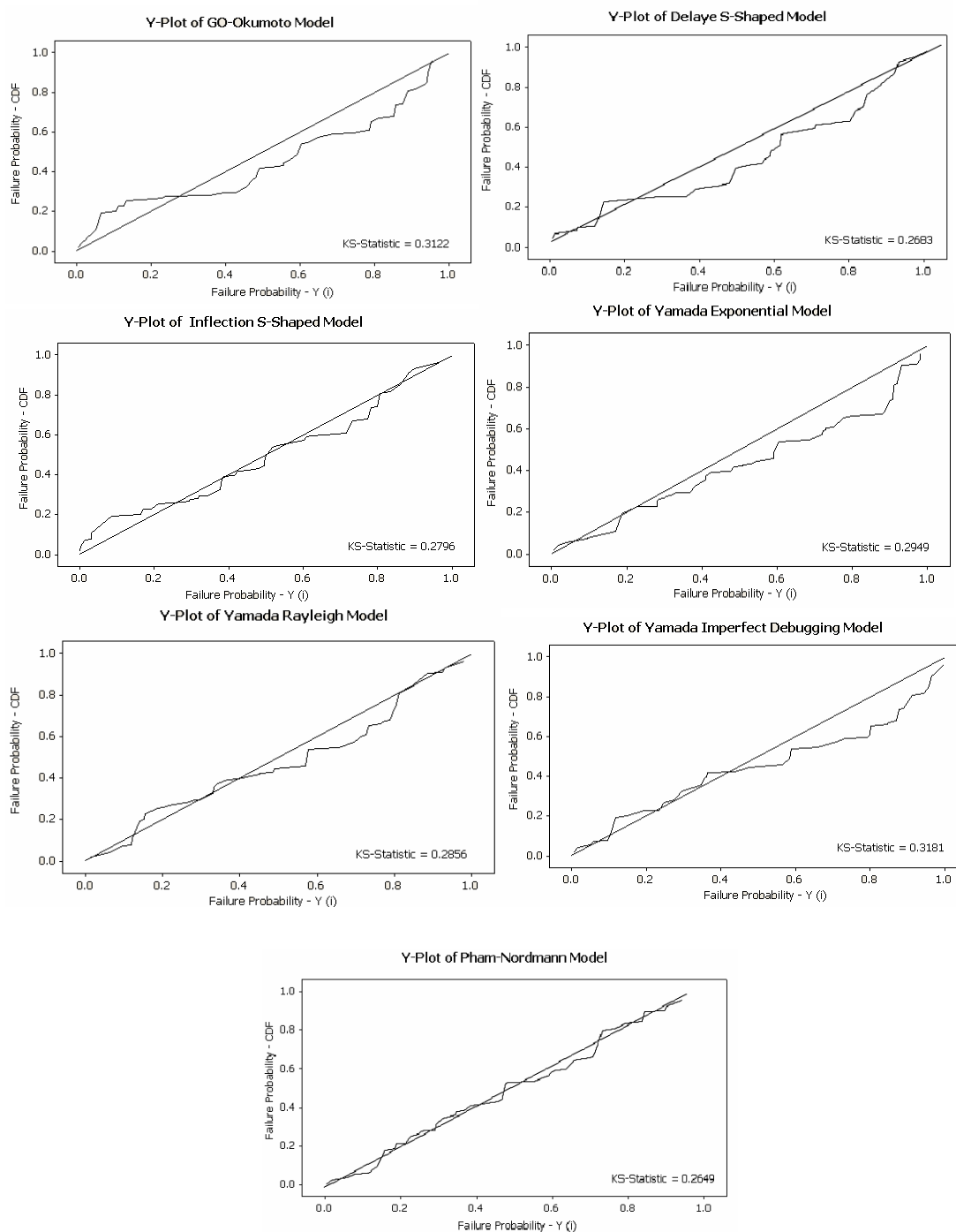
ตารางที่ 4-10 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2851	0.3122
Delayed S-Shaped	0.2893	0.2683
S-Shaped	0.2984	0.2796
Y-Exp	0.2888	0.2949
Y-Ray	0.2798	0.2856
Y-Imperfect Debugging	0.2857	0.3181
P-Nordmann	0.2984*	0.2649*

จากภาพที่ 4-8 และภาพที่ 4-9 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-10 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3



ภาพที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตารางที่ 4-11 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตัวแบบ	MSE
G-O	6.46881
Delayed S-Shaped	14.1681
S-Shaped	22.101
Y-Exp	19.0438
Y-Ray	11.0662
Y-Imperfect Debugging	16.9142
P-Nordmann	3.78526*

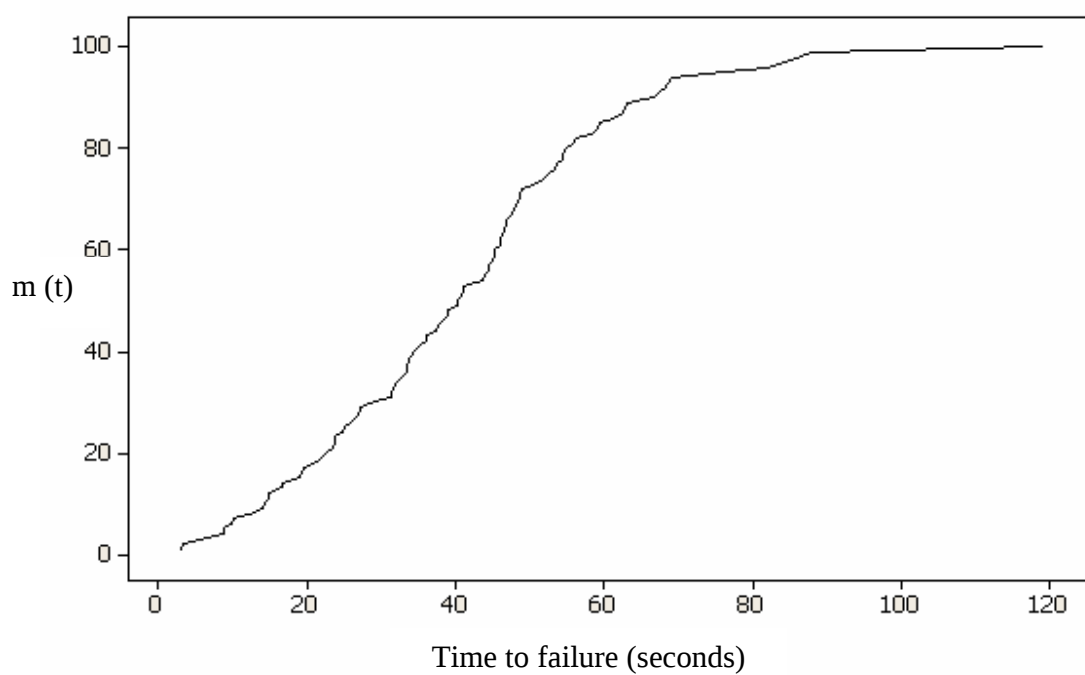
จากตารางที่ 4-11 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 3.78526 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-12 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.2474
Delayed S-Shaped	2.5681
S-Shaped	3.3800
Y-Exp	8.6900
Y-Ray	1.8252
Y-Imperfect Debugging	1.0144
P-Nordmann	0.1587*

จากตารางที่ 4-12 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.1.4 เมื่อระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ที่ $m = 2$ และ $c = 40$ เก็บอยู่ในรูปของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสมข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100 จุด จากเวลาการทดสอบ 118.985 วินาที แสดงในภาพที่ 4-10



ภาพที่ 4-10 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 4

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-13 มีรายละเอียดดังนี้

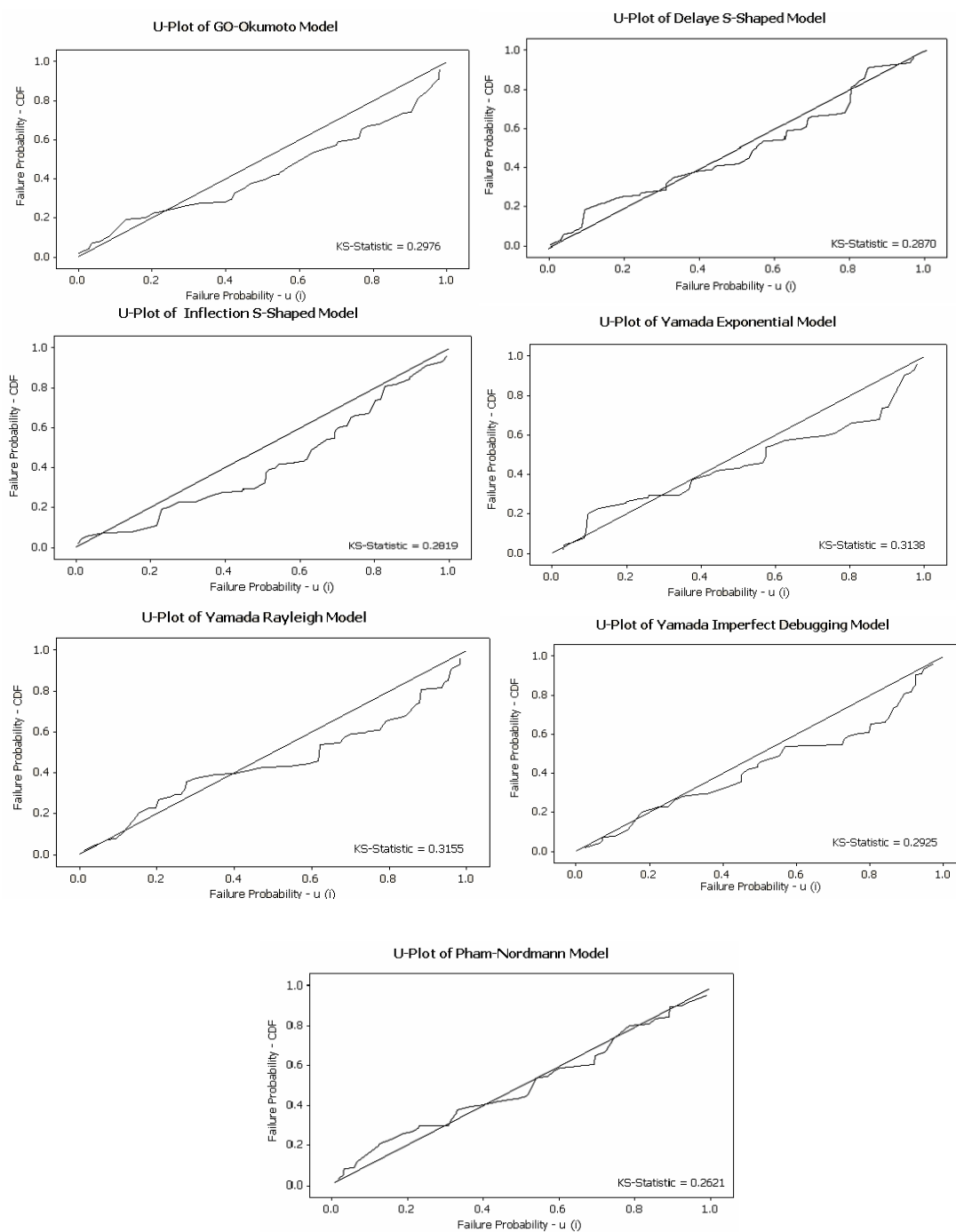
ตารางที่ 4-13 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	115.36	0.0275	-	-
Delayed S-Shaped	201.84	0.0927	-	-
S-Shaped	113.62	0.0318	-	7.281
Y-Exp	423.33	-	0.0463	0.0283
Y-Ray	220.80	-	5.3423	0.000583
Y-Imperfect Debugging	119.29	0.05714	-0.0040	-
P-Nordmann	117.84	0.0643	-	5.835

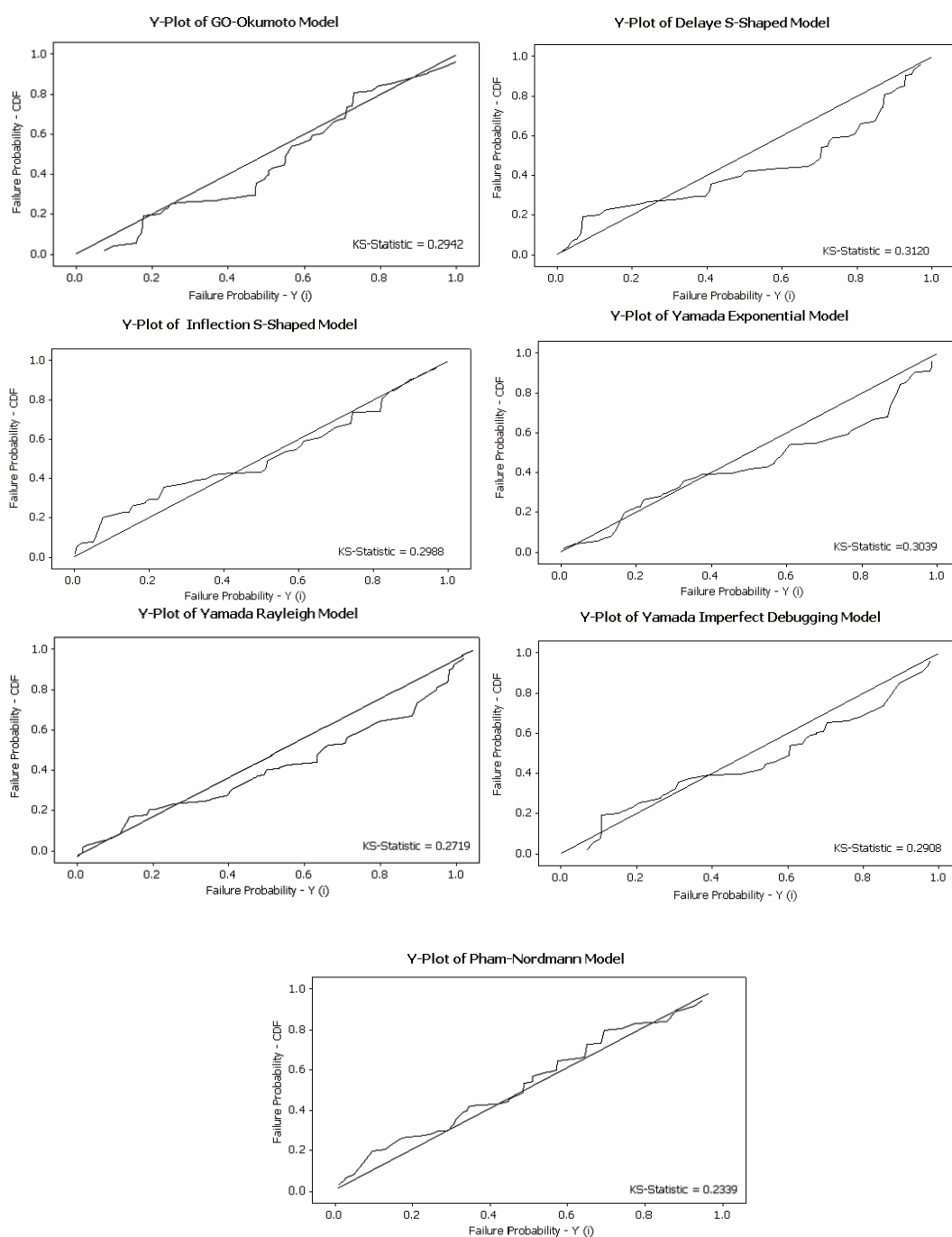
ตารางที่ 4-14 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2976	0.2942
Delayed S-Shaped	0.2870	0.3120
S-Shaped	0.2821	0.2988
Y-Exp	0.3138	0.3039
Y-Ray	0.3155	0.2719
Y-Imperfect Debugging	0.2925	0.2908
P-Nordmann	0.2621*	0.2339*

จากภาพที่ 4-11 และภาพที่ 4-12 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-1 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4



ภาพที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

ตารางที่ 4-15 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

ตัวแบบ	MSE
G-O	107.826
Delayed S-Shaped	53.3503
S-Shaped	48.755
Y-Exp	41.5171
Y-Ray	40.7339
Y-Imperfect Debugging	113.141
P-Nordmann	22.3957*

จากตารางที่ 4-15 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 22.3957 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

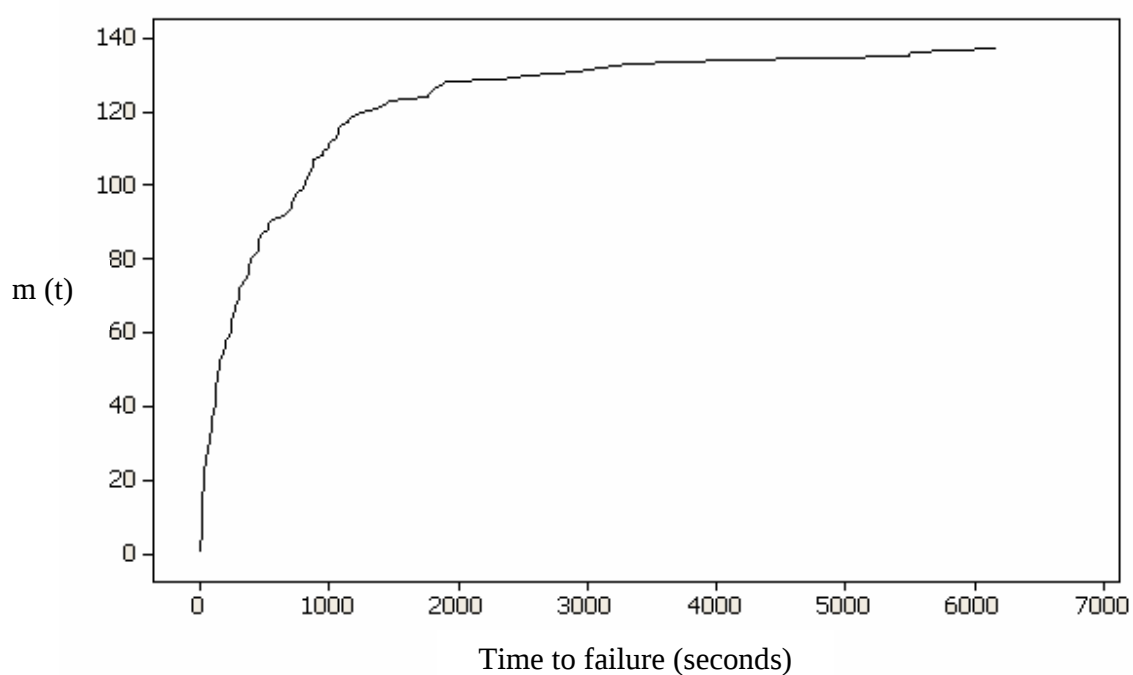
ตารางที่ 4-16 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.5109
Delayed S-Shaped	2.4220
S-Shaped	0.3805
Y-Exp	0.9160
Y-Ray	0.8537
Y-Imperfect Debugging	1.0214
P-Nordmann	0.2507*

จากตารางที่ 4-16 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจริง

4.2.1 เป็นชุดข้อมูลของระยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสมข้อผิดพลาด 137 จุด จากเวลาการทดสอบ 6,150 วินาที แสดงในภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4-13 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 5

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-17 มีรายละเอียดดังนี้

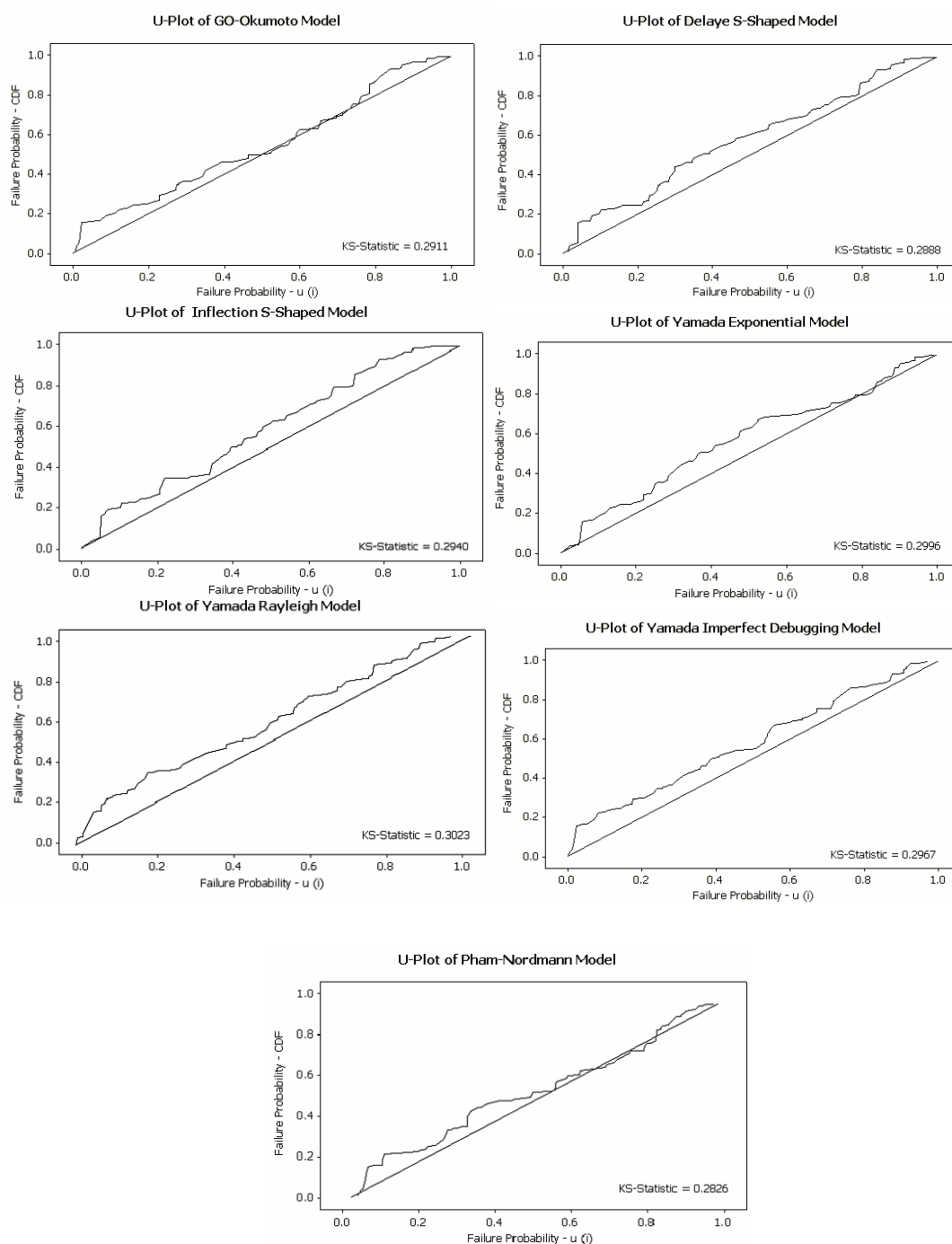
ตารางที่ 4-17 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	5,830	0.0497	-	-
Delayed S-Shaped	6,270	0.0193	-	-
S-Shaped	5,890	0.03595	-	8.721
Y-Exp	7,650	-	0.0732	0.0600
Y-Ray	6,170	-	8.4270	0.000472
Y-Imperfect Debugging	6,157	0.0874	-0.00311	-
P-Nordmann	6,158	0.0694	0.00087	7.3431

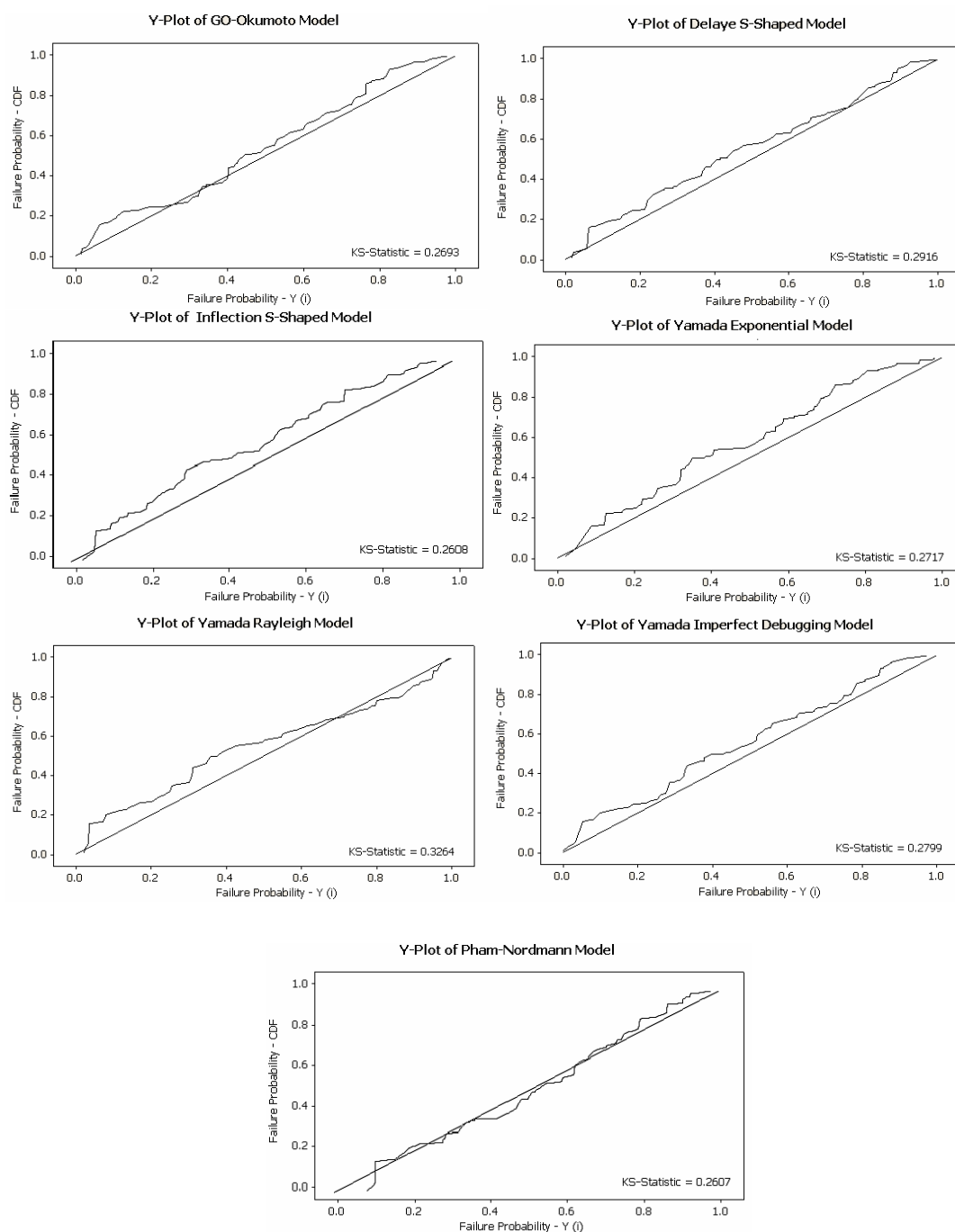
ตารางที่ 4-18 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2911	0.2693
Delayed S-Shaped	0.2888	0.2916
S-Shaped	0.2940	0.2608
Y-Exp	0.2996	0.2717
Y-Ray	0.3023	0.3264
Y-Imperfect Debugging	0.2967	0.2799
P-Nordmann	0.2826*	0.2607*

จากภาพที่ 4-14 และ 4-15 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-18 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5



ภาพที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตารางที่ 4-19 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตัวแบบ	MSE
G-O	2.26579
Delayed S-Shaped	5.366108
S-Shaped	1.41388
Y-Exp	2.26724
Y-Ray	1.50973
Y-Imperfect Debugging	5.683063
P-Nordmann	1.26657*

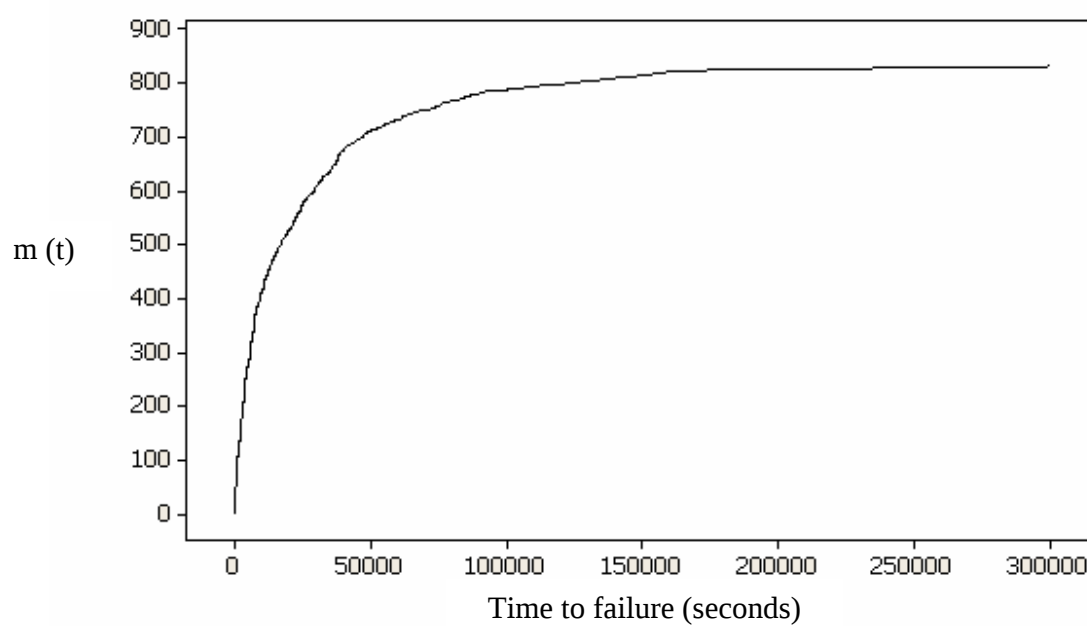
จากตารางที่ 4-19 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.26657 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-20 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	28.7457
Delayed S-Shaped	0.3110
S-Shaped	0.1996
Y-Exp	0.1490
Y-Ray	0.0374
Y-Imperfect Debugging	0.6514
P-Nordmann	0.0297*

จากตารางที่ 4-20 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2.2 เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปประยะห่างของการพบข้อผิดพลาดสะสม ข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 832 จุด จากเวลาการทดสอบ 299,419 วินาที แสดงในภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 6

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-21 มีรายละเอียดดังนี้

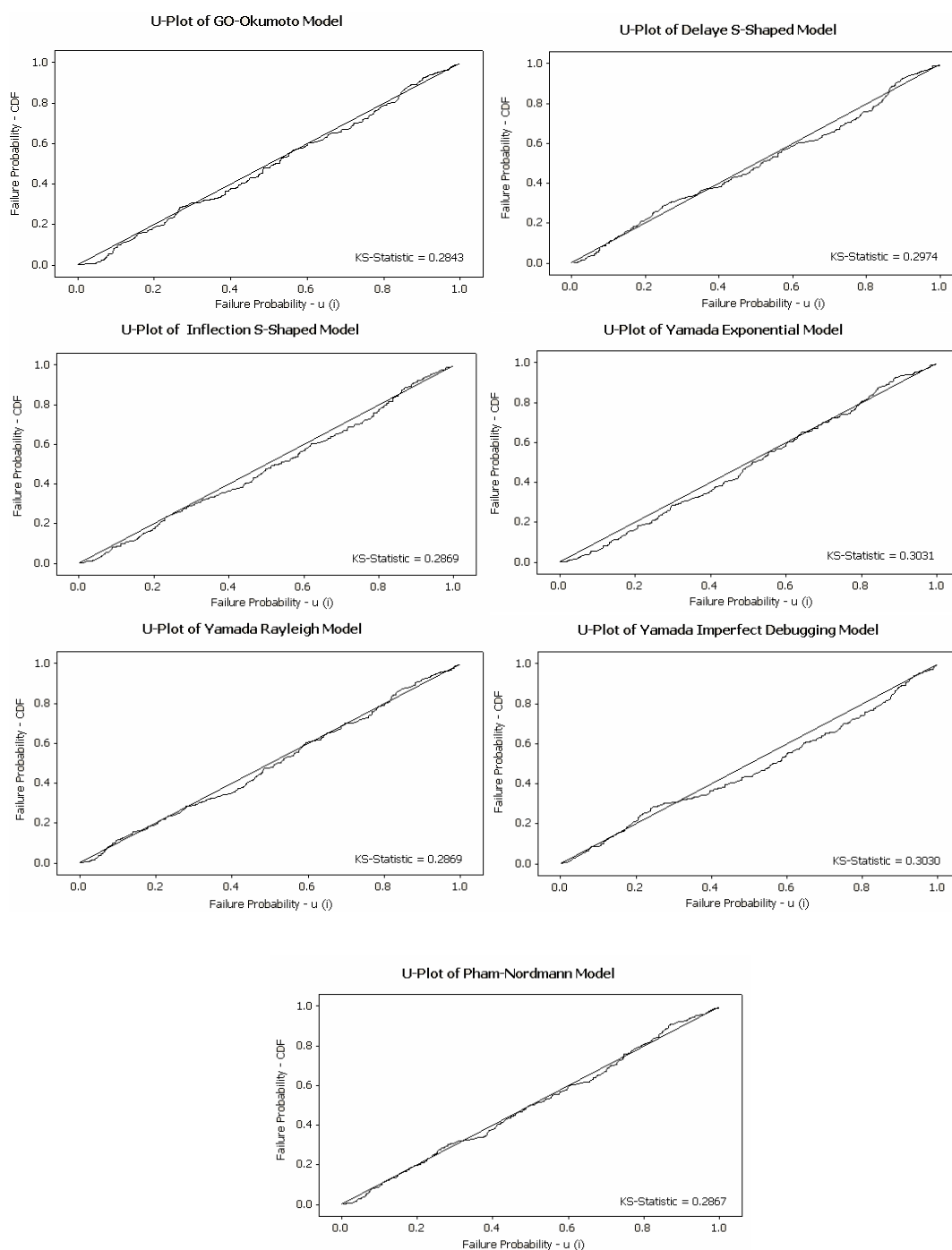
ตารางที่ 4-21 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	285,837	0.0187	-	-
Delayed S-Shaped	305,172	0.0741	-	-
S-Shaped	275,627	0.0487	-	13.453
Y-Exp	481,971	-	0.90307	0.0221
Y-Ray	301,386	-	12.7900	0.000675
Y-Imperfect Debugging	299,748	0.0942	-0.0058	
P-Nordmann	301,538	0.0435	0.00069	8.432

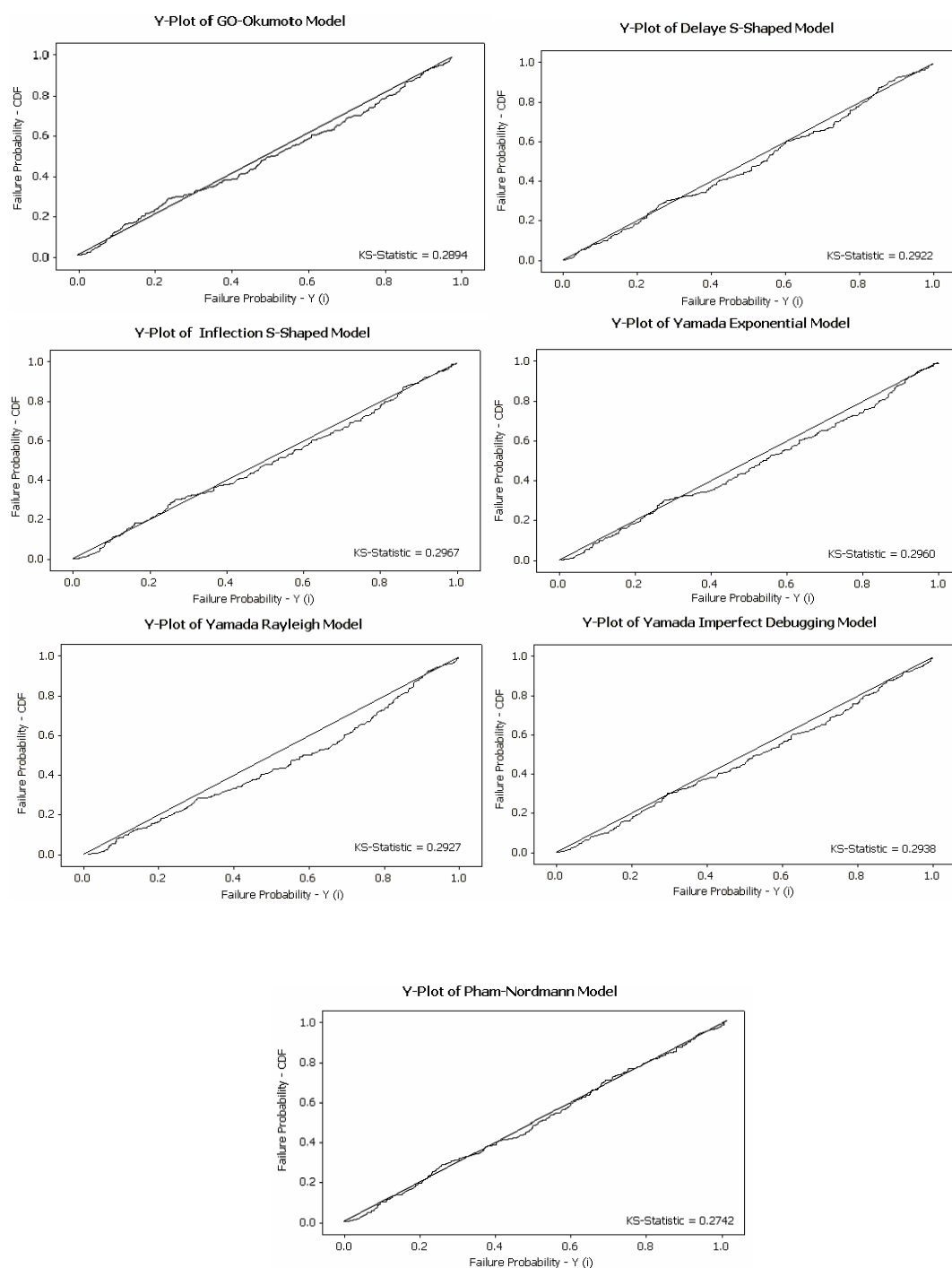
ตารางที่ 4-22 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2843	0.2894
Delayed S-Shaped	0.2974	0.2922
S-Shaped	0.2869	0.2967
Y-Exp	0.3031	0.2960
Y-Ray	0.2860	0.2927
Y-Imperfect Debugging	0.3030	0.2938
P-Nordmann	0.2867*	0.2742*

จากภาพที่ 4-17 และ 4-18 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-22 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6



ภาพที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตารางที่ 4-23 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตัวแบบ	MSE
G-O	7.65036
Delayed S-Shaped	4.55762
S-Shaped	9.56832
Y-Exp	4.01224
Y-Ray	3.31039
Y-Imperfect Debugging	4.2004
P-Nordmann	1.06697*

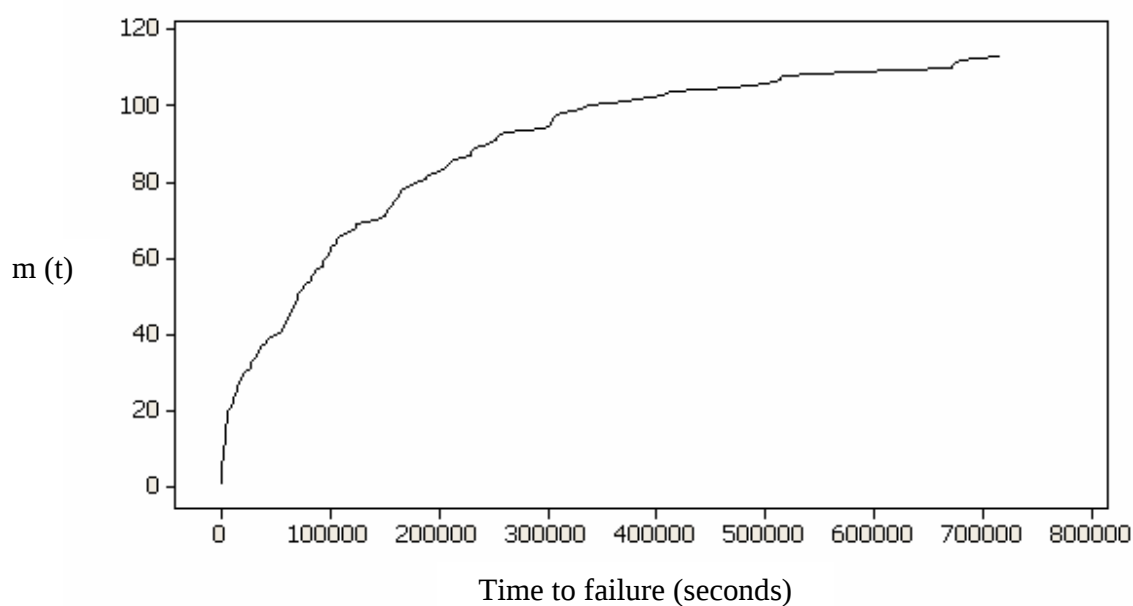
จากตารางที่ 4-23 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.06697 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-24 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	2.5900
Delayed S-Shaped	4.4000
S-Shaped	0.0660
Y-Exp	0.2910
Y-Ray	0.4450
Y-Imperfect Debugging	0.1600
P-Nordmann	0.0210*

จากตารางที่ 4-24 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2.3 เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปเมื่อระยะห่างของการพบข้อผิดพลาด ข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 113 จุด จากเวลาการทดสอบ 713,700 วินาที แสดงในภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 7

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-25 มีรายละเอียดดังนี้

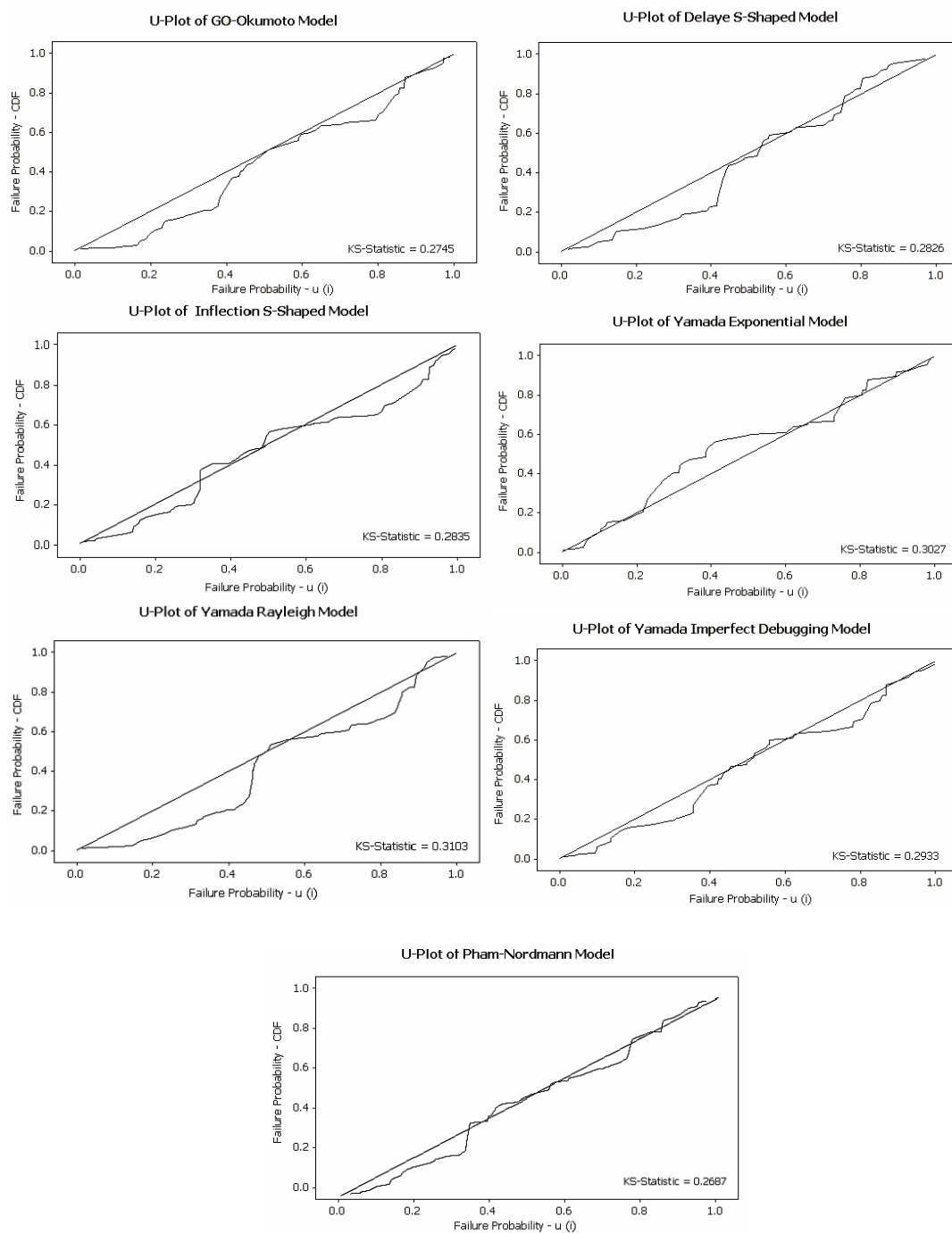
ตารางที่ 4-25 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	694,700	0.0641	-	-
Delayed S-Shaped	725,300	0.0830	-	-
S-Shaped	709,452	0.0857	-	17.254
Y-Exp	895,370	-	0.08599	0.0308
Y-Ray	714,500	14.5287	-	0.000924
Y-Imperfect Debugging	713,900	0.0980	-0.005208	-
P-Nordmann	714,596	0.0831	0.00057	6.431

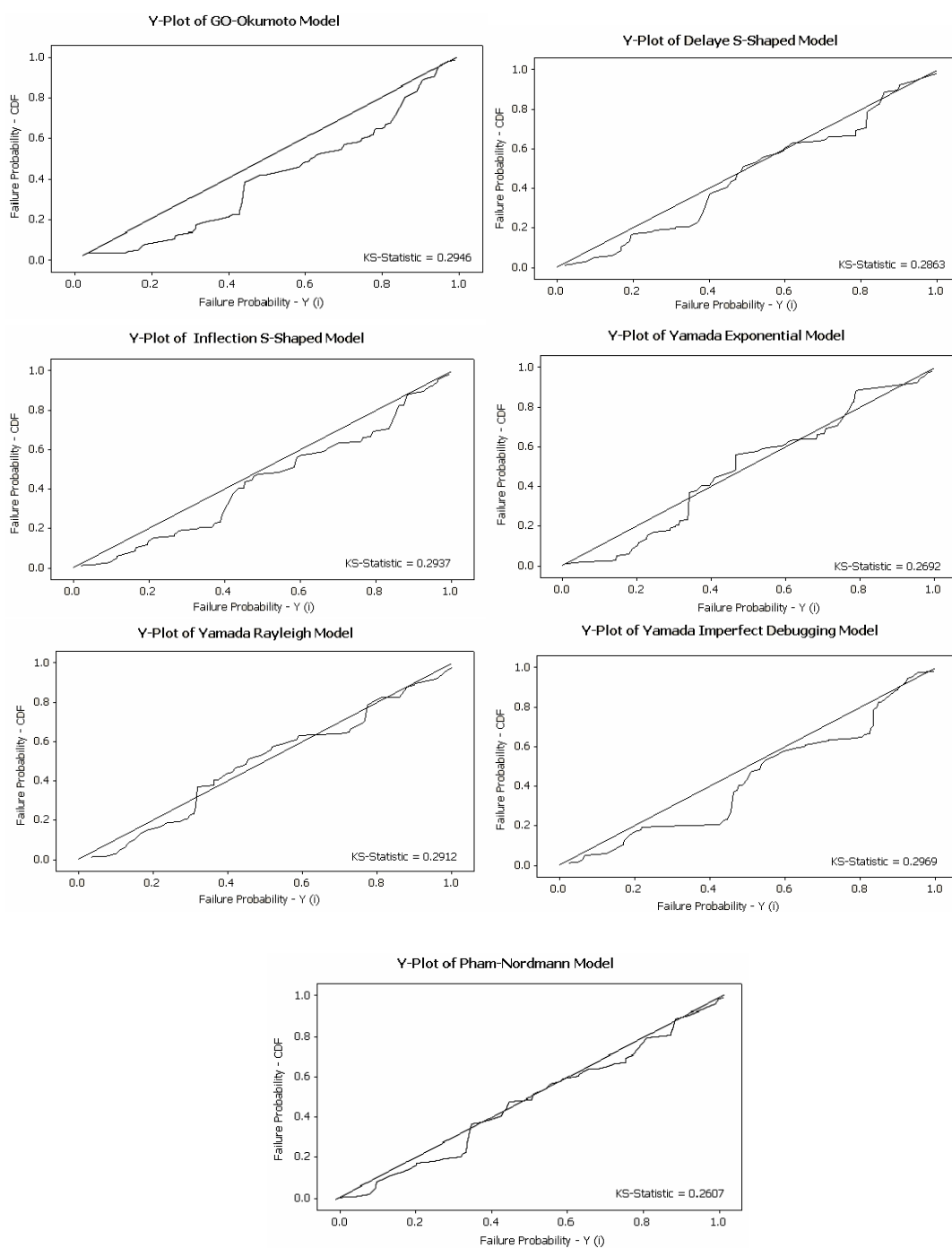
ตารางที่ 4-26 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2745	0.2946
Delayed S-Shaped	0.2826	0.2863
S-Shaped	0.2835	0.2937
Y-Exp	0.3027	0.2692
Y-Ray	0.3103	0.2912
Y-Imperfect Debugging	0.2933	0.2969
P-Nordmann	0.2687*	0.2607*

จากภาพที่ 4-20 และภาพที่ 4-21 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-26 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7



ภาพที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตารางที่ 4-27 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตัวแบบ	MSE
G-O	7.65036
Delayed S-Shaped	4.55762
S-Shaped	9.56832
Y-Exp	4.01224
Y-Ray	3.31039
Y-Imperfect Debugging	4.2004
P-Nordmann	1.06697*

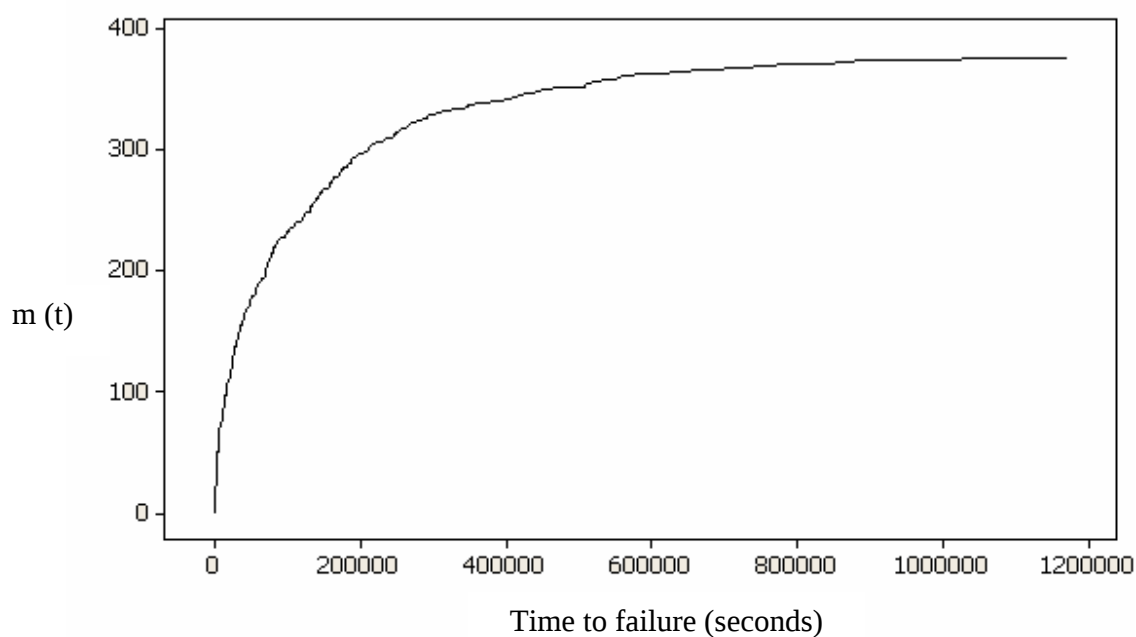
จากตารางที่ 4-27 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.06697 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-28 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.56947
Delayed S-Shaped	1.2350
S-Shaped	2.3140
Y-Exp	2.8590
Y-Ray	14.0935
Y-Imperfect Debugging	0.9650
P-Nordmann	0.1113*

จากตารางที่ 4-28 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2.4 เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปประยะห่างของการพบข้อผิดพลาด ข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 376 จุด จากเวลาการทดสอบ 1,167,840 วินาที แสดงในภาพที่ 4-22



ภาพที่ 4-22 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 8

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-29 มีรายละเอียดดังนี้

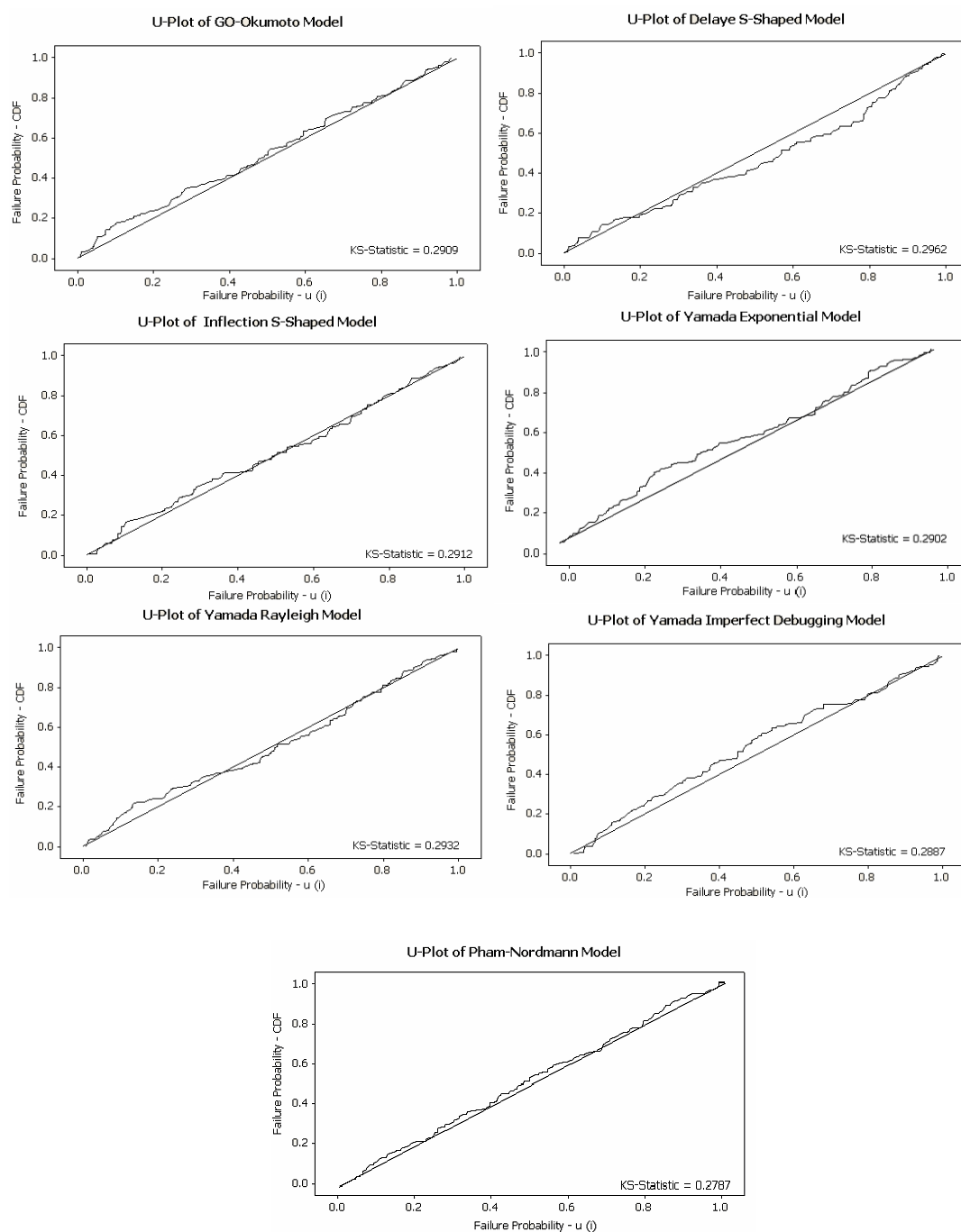
ตารางที่ 4-29 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	1,149,520	0.0532	-	-
Delayed S-Shaped	1,184,072	0.0517	-	-
S-Shaped	1,134,750	0.0641	-	18.957
Y-Exp	1,245,730	-	0.0821	0.0243
Y-Ray	1,173,520	-	18.3194	0.000895
Y-Imperfect Debugging	1,169,901	0.0937	-0.005409	-
P-Nordmann	1,194,085	0.0875	0.00062	9.351

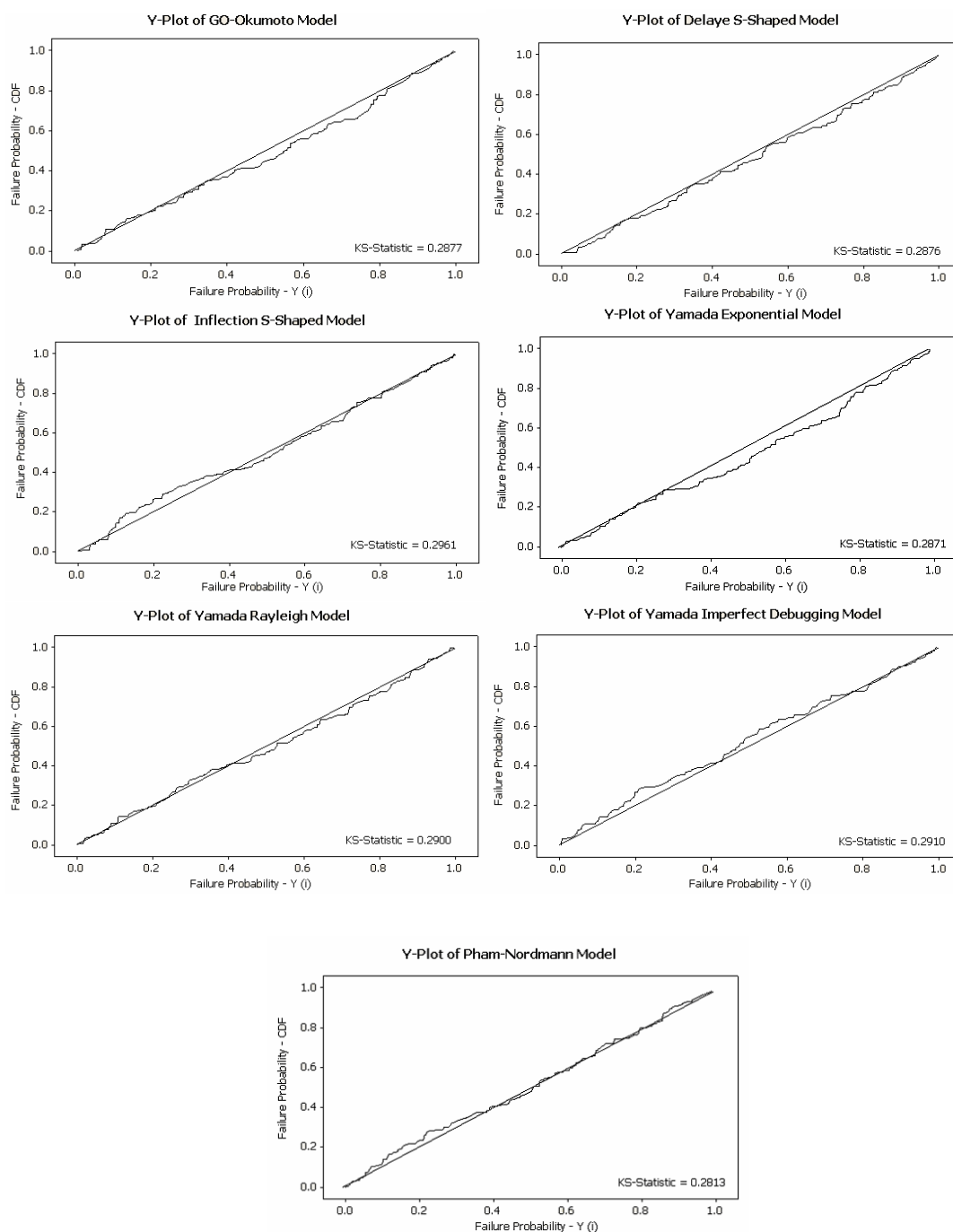
ตารางที่ 4-30 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2909	0.2877
Delayed S-Shaped	0.2962	0.2876
S-Shaped	0.2912	0.2961
Y-Exp	0.2902	0.2871
Y-Ray	0.2932	0.2900
Y-Imperfect Debugging	0.2887	0.2910
P-Nordmann	0.2787*	0.2813*

จากภาพที่ 4-23 และภาพที่ 4-24 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-30 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-23 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8



ภาพที่ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตารางที่ 4-31 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตัวแบบ	MSE
G-O	5.48036
Delayed S-Shaped	3.397116
S-Shaped	6.878584
Y-Exp	9.44789
Y-Ray	11.43206
Y-Imperfect Debugging	7.50231
P-Nordmann	1.8664*

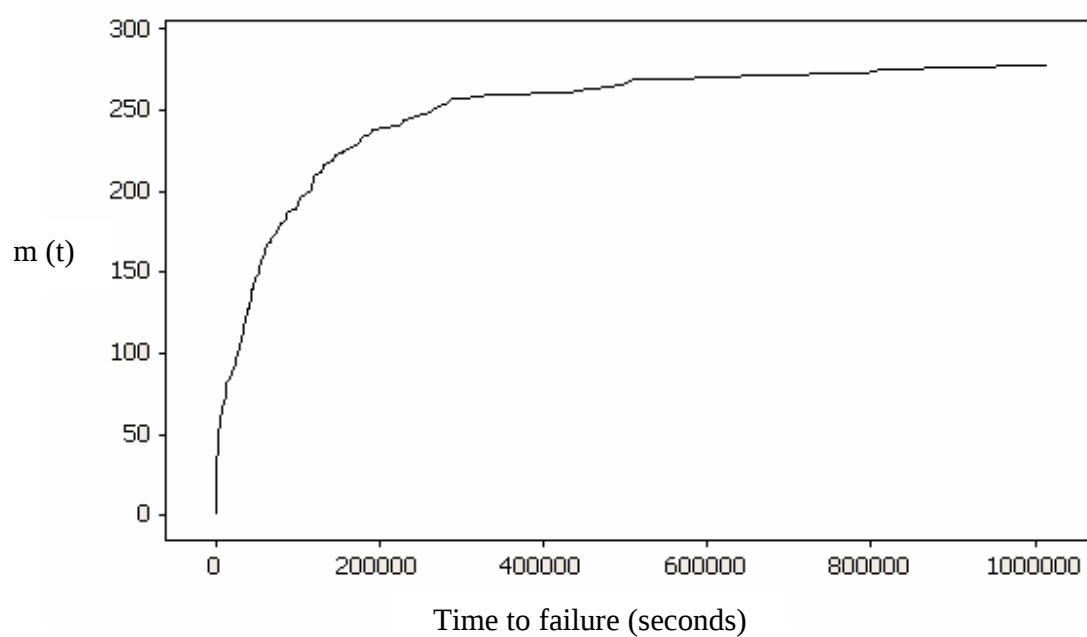
จากตารางที่ 4-31 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.8664 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-32 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	1.0750
Delayed S-Shaped	1.1190
S-Shaped	10.3031
Y-Exp	11.5310
Y-Ray	3.5540
Y-Imperfect Debugging	2.3230
P-Nordmann	0.0900*

จากตารางที่ 4-32 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2.5 เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูประยะห่างของการพบข้อผิดพลาด ที่ตรวจพบ 278 จุด จากเวลาการทดสอบ 1,016,040 วินาที แสดงในภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-25 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 9

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-33 มีรายละเอียดดังนี้

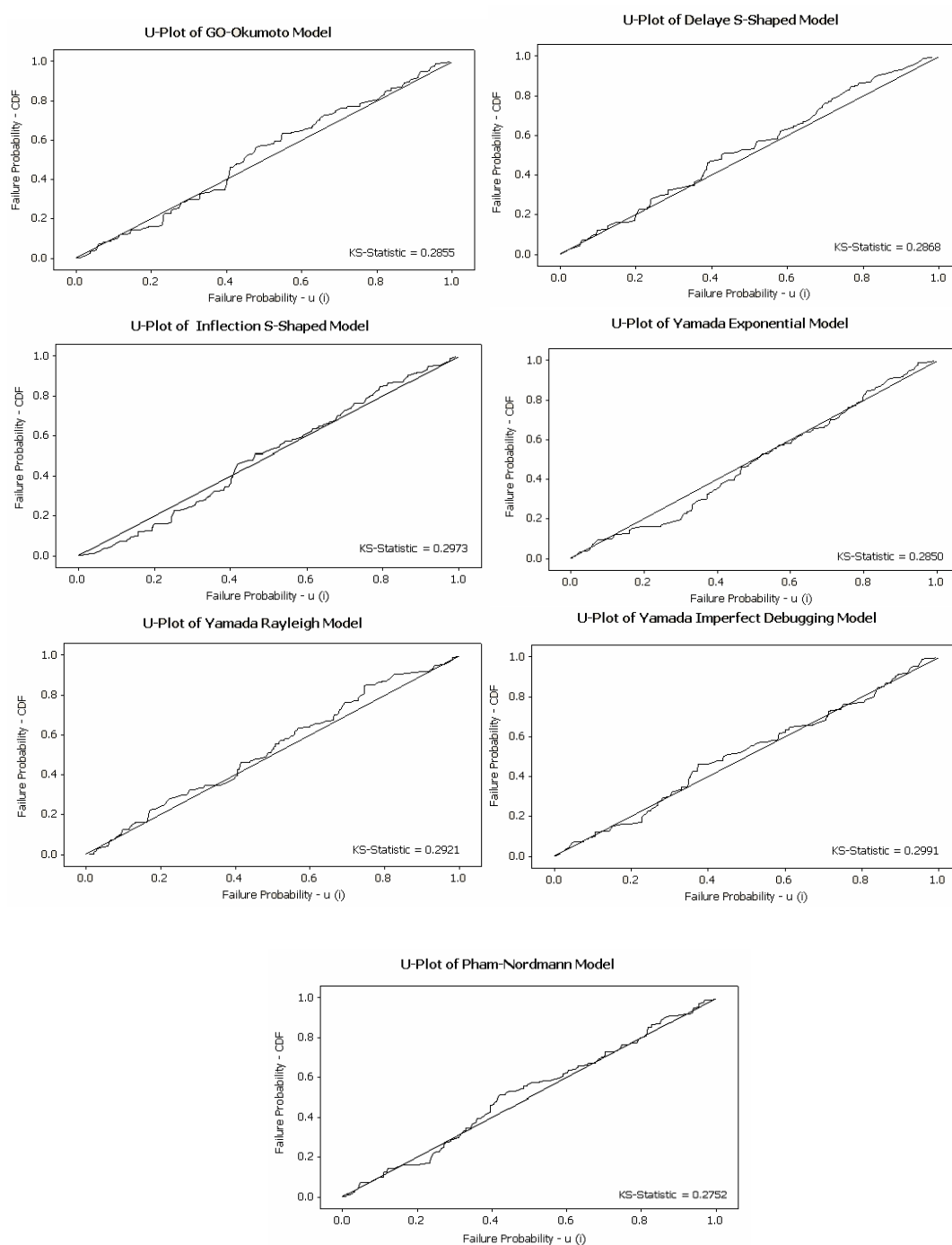
ตารางที่ 4-33 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	974,310	0.0872	-	-
Delayed S-Shaped	994,049	0.0948	-	-
S-Shaped	972,500	0.0783	-	21.452
Y-Exp	1,107,930	-	0.0957	0.0542
Y-Ray	1,027,540	-	22.9540	0.000952
Y-Imperfect Debugging	1,037,058	0.0958	0.005983	-
P-Nordmann	1,019,573	0.0958	0.00083	9.485

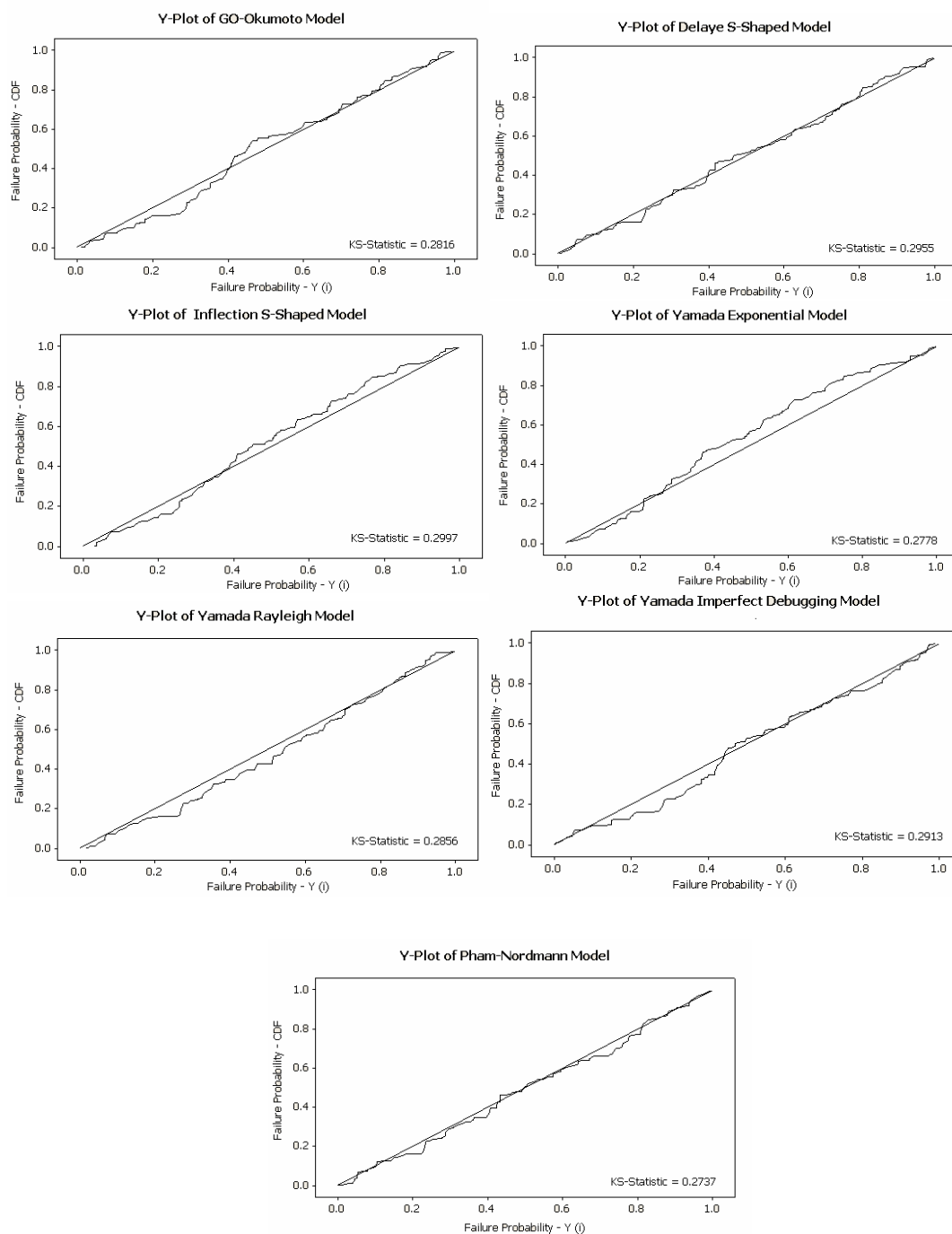
ตารางที่ 4-34 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2855	0.2816
Delayed S-Shaped	0.2868	0.2955
S-Shaped	0.2973	0.2997
Y-Exp	0.2850	0.2778
Y-Ray	0.2921	0.2856
Y-Imperfect Debugging	0.2991	0.2913
P-Nordmann	0.2973*	0.2737*

จากภาพที่ 4-26 และภาพที่ 4-27 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-34 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-26 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9



ภาพที่ 4-27 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตารางที่ 4-35 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตัวแบบ	MSE
G-O	3.79115
Delayed S-Shaped	3.36581
S-Shaped	7.442726
Y-Exp	4.95348
Y-Ray	2.18604
Y-Imperfect Debugging	5.769457
P-Nordmann	1.53587*

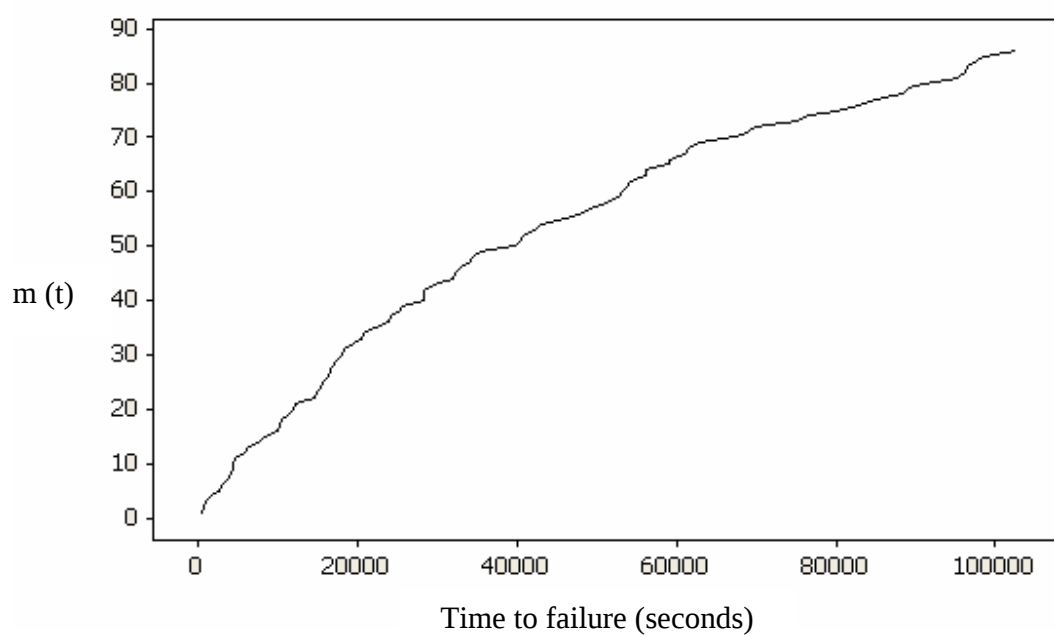
จากตารางที่ 4-35 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.53587 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-36 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	1.3115
Delayed S-Shaped	1.7643
S-Shaped	0.557
Y-Exp	0.9820
Y-Ray	0.7180
Y-Imperfect Debugging	0.6247
P-Nordmann	0.0192*

จากตารางที่ 4-36 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

4.2.6 เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปประยะห่างของการพบข้อผิดพลาดข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 86 จุด จากเวลาการทดสอบ 102,576 วินาที แสดงในภาพที่ 4-28



ภาพที่ 4-28 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 10

หาค่าประมาณของพารามิเตอร์โดยวิธี Maximum Likelihood Estimate ในแต่ละตัวแบบ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 4-37 มีรายละเอียดดังนี้

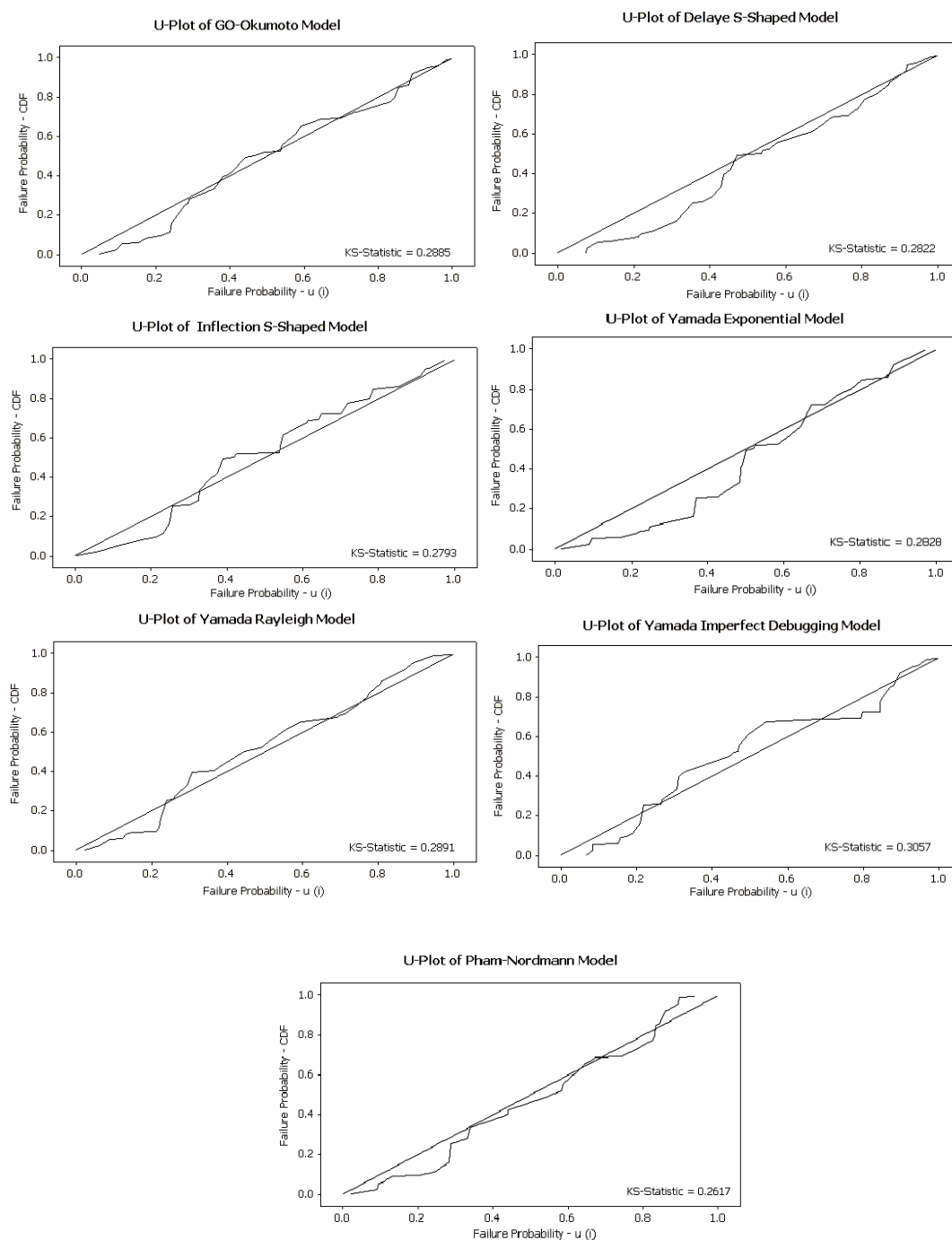
ตารางที่ 4-37 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10 เมื่อ $\gamma = 100$ และ $r = 0.90$

ตัวแบบ	a	b	α	β
G-O	102,143.87	0.0549	-	-
Delayed S-Shaped	102,794.51	0.0471	-	-
S-Shaped	103,006.45	0.0411	-	9.823
Y-Exp	103,587.62	-	0.0642	0.0480
Y-Ray	102,784.32	-	6.9880	0.000826
Y-Imperfect Debugging	1,031,100.45	0.0671	-0.0036	-
P-Nordmann	100,870.17	0.0694	0.00087	7.431

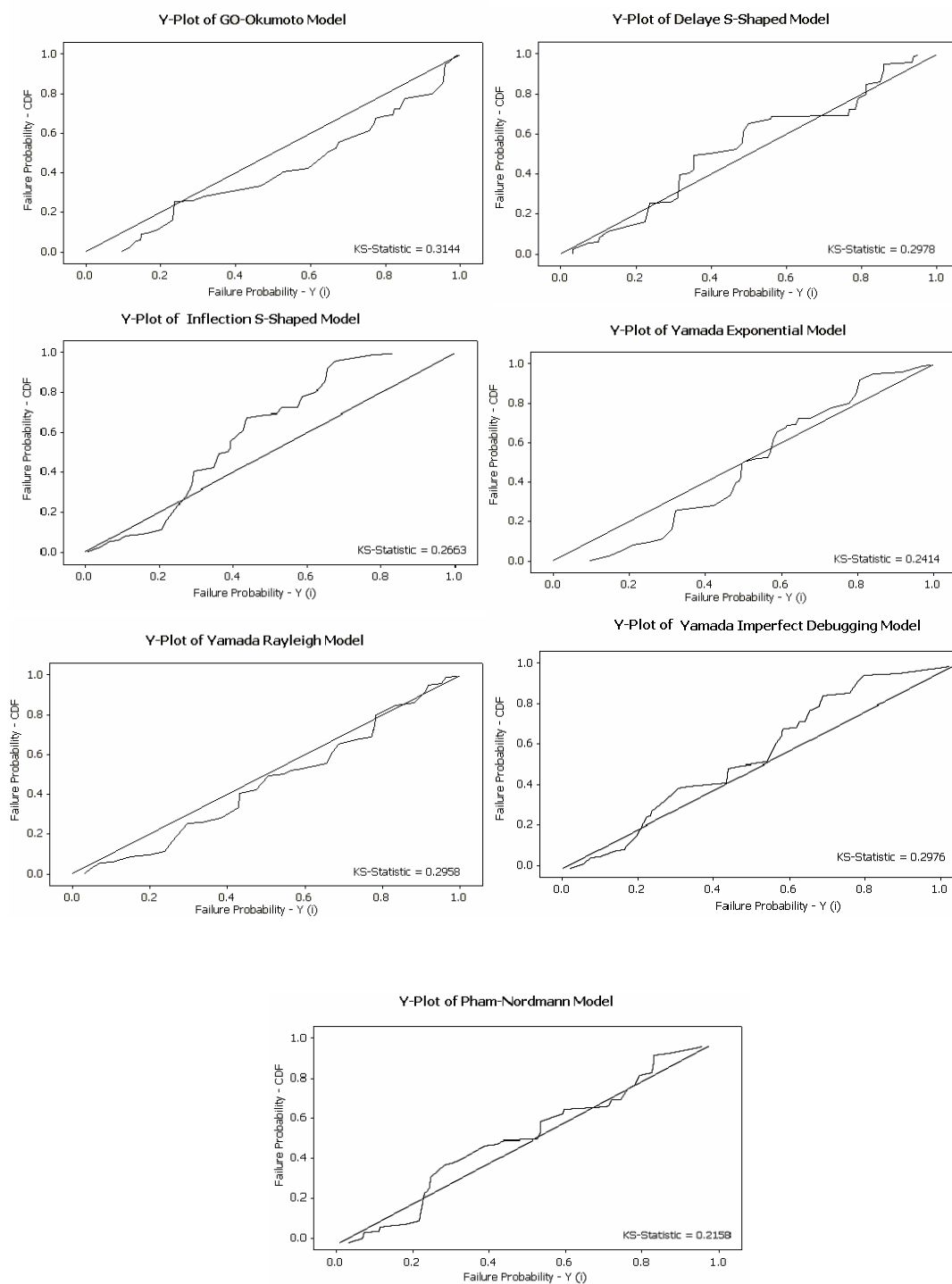
ตารางที่ 4-38 แสดงค่าสถิติ KS G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตัวแบบ	สถิติ KS	
	U-Plot	Y-Plot
G-O	0.2885	0.3144
Delayed S-Shaped	0.2822	0.2978
S-Shaped	0.2793	0.2663
Y-Exp	0.2828	0.2414
Y-Ray	0.2891	0.2958
Y-Imperfect Debugging	0.3057	0.2976
P-Nordmann	0.2617*	0.2158*

จากภาพที่ 4-29 และภาพที่ 4-30 จะเห็นว่า U-Plot และ Y-Plot ของตัวแบบ P-Nordmann มีความใกล้เคียงตรง 45 องศามากที่สุด และจากตารางที่ 4-38 พบว่าตัวแบบ P-Nordmann มีค่า สถิติ KS ต่ำที่สุด ทำให้ยอมรับสมมติฐานที่ว่า การแจกแจงของ U และ Y เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอในช่วง 0 ถึง 1 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.3 ดังนั้นหากใช้ U-Plot และ Y-Plot ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับชุดข้อมูลนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-29 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10



ภาพที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบ Y-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตารางที่ 4-39 แสดงค่า MSE G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตัวแบบ	MSE
G-O	8.5978
Delayed S-Shaped	5.3684
S-Shaped	8.3655
Y-Exp	6.6256
Y-Ray	4.6485
Y-Imperfect Debugging	5.4557
P-Nordmann	1.0205*

จากตารางที่ 4-39 จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann ให้ค่า MSE = 1.0205 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะของการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลชุดนี้ได้ดีที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4-40 แสดงค่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ G-O, Delayed S-Shaped, S-Shaped, Y-Exp, Y-Ray, Y-Imperfect Debugging และ P-Nordmann สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตัวแบบ	PLR_n
G-O	0.3049
Delayed S-Shaped	1.0337
S-Shaped	0.7317
Y-Exp	0.7563
Y-Ray	0.8630
Y-Imperfect Debugging	1.1897
P-Nordmann	0.3975*

จากตารางที่ 4-40 พบว่า PLR_n ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ P-Nordmann มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ PLR_n แล้ว ตัวแบบ P-Nordmann เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ กรณีระยะห่างของการพบ
ข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์

5.1 ผลการวิจัย

จากข้อมูลทั้ง 10 ชุดสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 5-1 แสดงข้อมูลทั้ง 10 ชุดข้อมูล และตัวแบบที่เหมาะสม

ข้อมูลชุดที่	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูล	ตัวแบบที่เหมาะสม
1	เป็นรูปตัวเอส ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	P-Nordmann
2	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
3	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
4	เป็นรูปแบบตัวเอสอย่างชัดเจน	P-Nordmann
5	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
6	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
7	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
8	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
9	เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	P-Nordmann
10	เป็นรูปตัวเอส ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	P-Nordmann

จากตารางที่ 5-1 จะพบว่าข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ทั้ง 10 ชุดข้อมูล สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตคือ ข้อมูลที่มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และข้อมูลที่มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นรูปตัวเอส ซึ่งตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายลักษณะการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลได้ดีที่สุดในทุกชุดข้อมูล ข้อมูลที่มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และข้อมูลที่มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นแบบตัวเอส

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในกรณีที่พบระยะห่างระหว่างการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์ข้อมูลที่มีลักษณะการเจริญเติบโตเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และข้อมูลที่มีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นแบบตัวเอส จะพบว่าตัวแบบ P-Nordmann เป็นตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลดังกล่าวแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Pham, H. and Nordmann L.[15]

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เมื่อข้อมูลมีลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และเป็นแบบตัวเอส ตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลที่สุดคือ ตัวแบบ P-Nordmann ขั้นตอนต่อไปคือการนำตัวแบบนี้ไปประมาณค่าหาความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์และระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปล่อยซอฟต์แวร์ออกสู่ตลาด ซึ่งในการหาค่าความน่าเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์นี้เป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่นำมาวิเคราะห์ประกอบการตัดสินใจของผู้บริหาร ซึ่งนโยบายการปล่อยออกสู่ตลาด (Software Release Policy) ดังนี้

- 5.3.1.1 นโยบายของบริษัทคู่แข่ง
- 5.3.1.2 ระดับความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Reliability Level)
- 5.3.1.3 ระดับส่วนแบ่งการตลาดที่คาดหวัง (Expected of market share)
- 5.3.1.4 โครงการพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Project Development)

5.3.2 เนื่องจากตัวแบบ P-Nordmann สามารถอธิบายการเกิดข้อผิดพลาดของข้อมูลได้ดี แต่เนื่องจากไม่ทราบข้อมูลความสามารถในการทดสอบโปรแกรมที่สมบูรณ์ จึงอาจทำให้ค่าประมาณที่ได้ยังเหมาะสมกับข้อมูลเท่าที่ควร ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนความสามารถในการตรวจสอบโปรแกรม (Testing Effort) ว่ามีผลต่อตัวแบบความเชื่อถือได้อย่างไร

5.3.3 เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแบบส่วนมากจะอยู่ในรูปของจำนวนข้อผิดพลาดและเวลาการเกิดข้อผิดพลาด ในการศึกษาวิเคราะห์ครั้งต่อไปควรทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบความน่าเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์อื่นๆ ที่คำนวณจากจำนวนของการเกิดข้อผิดพลาด เพื่อผู้ใช้งานจะได้เลือกใช้ตัวแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. Barlow, R.E., Proschan, F. Mathematical Theory of Reliability. John Wiley & Sons, New York, 1965.
2. Bodhisuwan Winai. A Statistical Analysis of Software Reliability Growth Model with Imperfect Debugging and Introduction of Error. Ph.D. Thesis, Faculty of Applied Science, Royal Melbourne Institute of Technology University, 2001.
3. Farr, W.H. A Survey of Software Reliability Modeling and Estimation, NSWC TR-171, Naval Surface Warfare Center, 1983.
4. Goel A.L. and Okumoto K. An Imperfect Debugging Model for Reliability and Other Quantitative Measures of Software System. Technical Report 78-1, Department of Industrial Engineering and Operations Research, Syracuse University, New York, 1978.
5. Goel, A. L. and Okumoto, K. Time-Dependent Error-Detection Rate Model for Software and Other Performance Measures. IEEE Trans. Reliability, R-28, 3 (1985).
6. Jelinski, Z. and Moranda, P.B. Software Reliability Research in Statistical Computer Performance Evaluation, W. Freiberger, ed., Academic Press, New York, N.Y., 1972: 465-484.
7. Littlewood, B. "Stochastic reliability growth : a model for fault removal in computer Programs and hardware design." IEEE Trans. Reliab., 1981, R-30(4) :313-320.
8. Lyu, Michael R. Handbook of Software Reliability Engineering. McGraw-Hill, New York, 1995.
9. Musa, J.D. "A Theory of Software Reliability and Its Applications". IEEE Trans. Software Eng. 1975, SE-1,3: 312-327.
10. Musa, J.D., Iannino, A. and Okumoto, K. Software Reliability Measurement, Prediction, Application. McGraw-Hill : New York, 1987.
11. Musa, J.D. and Okumoto, K. "A logarithmic Poisson Execution Time Model for Software Reliability Measurement." Proc. 7th Int'l Conf. Software Eng., IEEE CS Press, Los Alamitos, Calif., 1984: 230-238.

12. Nelson, E. Estimating Software Reliability from Test Data. Microelectronics and Reliability, 17,1978.
13. Ohba, M. Software Reliability Analysis Models. IBM J. Research and Development 1984, 28, 4: 428-443.
14. Pham, H. Software Reliability and Testing. IEEE Computer Society Press Los Alamitor California,1995.
15. Pham, H. And Nordmann L. A generalized NHPP Software Reliability Model. In Proc. 3 rd International Conference on Reliability and Quality in Design, ISSAT Press, Anaheim, 1997.
16. Pham, H. and Zhang X. An NHPP Software Reliability Model and its Comparison. Int., J. Reliability , Quality and Safety Engineering,1997, 4, 3:269-282.
17. Shick, G.J. and Wolverton, R.W. “An Analysis of Competing Software Reliability Model.” IEEE Trans. Software Eng. 1978, SE-4, 2: 104-120.
18. Shooman, M.L. Probabilistic Models for Software Reliability Prediction. Statistical Computer Performance Evaluation, W.Freiberger, ed., Academic Press, New York,1972.
19. Tamura , Y. and Yamada, S. “Comparisons of Software Reliability Assessment Methods for Open Source Software and Reliability Assessment Tool.” Journal of Computer Sciences, 2006, 6,2: 489 - 495.
20. Yamada, S., Ohba, M. and Osaki, S. “S-Shaped Reliability Growth Modeling for Software Error Detection.” IEEE Trans. Reliability, 1983, R-32,5: 475-478.
21. Yamada, S., Ohtera, H. and Narihis, H. “Software Reliability Growth Models with Testing Effort.” IEEE trans. Reliability, 1986, R-35,1: 19-23.
22. Zhang, X. and Pham, H. “Comparisons of Nonhomogeneous Poisson Process Software Reliability Models and Its Applications.” Interantional Journal of System Sciences, 2000, 31,9: 1115-1123.
23. S.H. Kan. “Modeling and Software development quality.” IBM System Journal, 1991,30,3 : 351-362.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลชุดที่ 1

เป็นชุดข้อมูลที่จำลองมาจากการแจกแจงของไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ $m = 15$ $c=120$ เก็บอยู่ในรูปของจำนวนเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100จุด จากเวลาการทดสอบ 681.287 วินาที รายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลชุดที่ 1

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	3.102	18	27.353	35	63.397
2	4.07	19	32.571	36	64.14
3	6.235	20	32.989	37	64.909
4	8.204	21	40.111	38	65.175
5	10.344	22	40.207	39	66.183
6	11.855	23	40.233	40	70.162
7	12.059	24	41.443	41	70.582
8	16.253	25	45.763	42	80.521
9	18.772	26	48.167	43	83.247
10	18.788	27	49.644	44	83.297
11	18.813	28	55.144	45	83.427
12	19.567	29	55.896	46	84.885
13	19.686	30	58.472	47	88.226
14	20.209	31	59.873	48	100.445
15	26.39	32	60.159	49	102.348
16	26.722	33	60.472	50	105.813
17	26.745	34	61.415	51	106.334

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	106.35	69	146.442	86	204.007
53	109.984	70	158.906	87	219.143
54	115.364	71	164.171	88	221.23
55	119.342	72	168.967	89	235.011
56	119.746	73	171.729	90	243.679
57	119.881	74	173.924	91	254.533
58	121.97	75	174.273	92	256.126
59	123.039	76	176.516	93	266.216
60	123.19	77	184.33	94	267.898
61	123.885	78	185.622	95	273.693
62	125.223	79	187.926	96	283.563
63	126.459	80	190.859	97	318.393
64	128.833	81	193.918	98	328.789
65	132.042	82	194.351	99	352.377
66	140.491	83	195.023	100	681.287
67	146.303	84	195.875		
68	146.329	85	196.951		

ข้อมูลชุดที่ 2

เป็นชุดข้อมูลที่จำลองมาจากการแจกแจงของไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ $m = 10$ $c=80$ เก็บอยู่ในรูปของจำนวนเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100จุด จากเวลาการทดสอบ 424.998 วินาที รายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลชุดที่ 2

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	0.037	18	11.644	35	23.425
2	0.587	19	12.134	36	24.746
3	2.933	20	12.505	37	25.696
4	3.114	21	13.898	38	26.976
5	3.223	22	14.022	39	30.414
6	3.598	23	14.113	40	31.071
7	4.485	24	14.571	41	36.697
8	5.054	25	16.061	42	37.092
9	5.248	26	16.938	43	38.16
10	6.124	27	16.949	44	38.705
11	6.344	28	17.103	45	41.33
12	6.408	29	17.461	46	41.634
13	6.581	30	19.263	47	44.179
14	6.969	31	19.645	48	44.276
15	7.336	32	20.311	49	45.158
16	8.507	33	20.804	50	45.92
17	11.156	34	21.231	51	46.312

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	51.592	69	84.609	86	163.478
53	52.65	70	87.594	87	175.686
54	53.545	71	89.936	88	179.047
55	55.965	72	90.708	89	181.367
56	63.143	73	101.099	90	181.434
57	63.82	74	108.364	91	201.407
58	63.963	75	117.738	92	219.793
59	65.768	76	119.961	93	224.585
60	68.224	77	122.229	94	229.291
61	69.588	78	134.132	95	231.705
62	71.383	79	135.259	96	263.818
63	73.068	80	135.867	97	281.958
64	74.466	81	136.63	98	372.595
65	75.601	82	139.554	99	375.729
66	77.315	83	143.358	100	424.998
67	78.702	84	154.864		
68	79.874	85	161.004		

ข้อมูลชุดที่ 3

เป็นชุดข้อมูลที่จำลองมาจากการแจกแจงของไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ $m = 4$ $c=60$ เก็บอยู่ในรูปของจำนวนเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100จุด จากเวลาการทดสอบ 258.473 วินาที รายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลชุดที่ 3

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	0.313	18	11.972	35	26.192
2	0.584	19	14.045	36	27.105
3	0.692	20	14.142	37	27.446
4	0.929	21	14.589	38	29.995
5	1.541	22	15.731	39	30.127
6	5.419	23	15.949	40	32.272
7	5.532	24	16.312	41	32.903
8	6.389	25	17.93	42	34.377
9	6.427	26	18.178	43	34.789
10	6.661	27	19.634	44	34.791
11	6.72	28	22.843	45	35.801
12	6.93	29	22.875	46	35.954
13	7.54	30	25.054	47	38.807
14	9.181	31	25.146	48	39.29
15	9.218	32	25.231	49	39.454
16	9.292	33	25.354	50	41.111
17	10.048	34	26.109	51	41.84

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	42.443	69	66.974	86	107.833
53	44.032	70	68.257	87	114.393
54	44.773	71	68.929	88	121.442
55	45.473	72	70.619	89	125.07
56	46.131	73	73.66	90	146.625
57	49.289	74	75.756	91	170.803
58	53.35	75	83.69	92	174.172
59	54.824	76	85.383	93	182.753
60	55.021	77	85.489	94	185.431
61	57.859	78	86.948	95	194.443
62	58.406	79	91.024	96	216.448
63	59.261	80	92	97	219.474
64	63.405	81	95.764	98	229.046
65	64.341	82	98.209	99	234.475
66	64.911	83	99.567	100	258.473
67	66.428	84	102.177		
68	66.655	85	105.634		

ข้อมูลชุดที่ 4

เป็นชุดข้อมูลที่จำลองมาจากการแจกแจงของไวบูลล์ที่มีพารามิเตอร์ $m = 2$ $c=40$ เก็บอยู่ในรูปของจำนวนเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 100จุด จากเวลาการทดสอบ 118.985 วินาที รายละเอียดของข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลชุดที่ 4

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	2.831	18	21.292	35	32.819
2	3.236	19	21.701	36	33.396
3	6.502	20	22.65	37	33.445
4	8.698	21	23.425	38	33.598
5	8.753	22	23.562	39	33.843
6	9.668	23	23.76	40	34.539
7	10.001	24	24.801	41	34.942
8	12.939	25	25.006	42	35.878
9	13.955	26	25.688	43	35.901
10	14.182	27	26.516	44	37.381
11	14.651	28	27.107	45	37.647
12	14.844	29	27.112	46	38.016
13	16.524	30	29.084	47	38.858
14	16.596	31	31.319	48	39.002
15	18.882	32	31.383	49	40.11
16	19.256	33	31.791	50	40.218
17	19.531	34	31.945	51	40.711

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	41.026	69	47.961	86	61.133
53	41.086	70	48.51	87	62.372
54	43.486	71	48.638	88	62.648
55	43.788	72	48.769	89	63.054
56	44.351	73	50.388	90	66.613
57	44.373	74	51.642	91	67.106
58	44.943	75	52.581	92	68.257
59	45.087	76	53.273	93	68.633
60	45.198	77	53.648	94	69.099
61	45.905	78	54.272	95	76.148
62	45.972	79	54.37	96	81.996
63	46.146	80	54.759	97	84.133
64	46.509	81	55.76	98	85.789
65	46.708	82	56.283	99	88.045
66	46.841	83	58.286	100	118.985
67	47.41	84	59.017		
68	47.698	85	59.379		

ข้อมูลชุดที่ 5

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 137 จุด จากเวลาการทดสอบ 6,150 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลชุดที่ 5

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	0	18	22	35	81
2	0	19	24	36	88
3	0	20	26	37	91
4	2	21	30	38	97
5	3	22	30	39	100
6	4	23	31	40	108
7	6	24	33	41	108
8	8	25	36	42	112
9	9	26	44	43	113
10	10	27	50	44	114
11	10	28	55	45	115
12	10	29	58	46	120
13	12	30	65	47	122
14	15	31	68	48	129
15	15	32	75	49	134
16	16	33	77	50	138
17	21	34	79	51	143

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	148	69	290	86	457
53	160	70	296	87	482
54	176	71	300	88	529
55	180	72	300	89	529
56	193	73	325	90	543
57	193	74	330	91	600
58	197	75	357	92	648
59	227	76	365	93	670
60	232	77	369	94	700
61	233	78	371	95	707
62	236	79	379	96	724
63	242	80	386	97	729
64	245	81	422	98	748
65	255	82	445	99	790
66	261	83	446	100	810
67	263	84	447	101	816
68	281	85	452	102	828

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
103	843	120	1247	137	6150
104	860	121	1351		
105	865	122	1435		
106	868	123	1461		
107	875	124	1755		
108	943	125	1783		
109	948	126	1800		
110	983	127	1864		
111	990	128	1897		
112	1011	129	2323		
113	1045	130	2526		
114	1064	131	2930		
115	1071	132	3110		
116	1082	133	3321		
117	1146	134	4116		
118	1160	135	5485		
119	1222	136	5509		

ข้อมูลชุดที่ 6

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 832 จุด จากเวลาการทดสอบ 299,419 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลชุดที่ 6

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	0	18	0	35	120
2	0	19	0	36	178
3	0	20	0	37	180
4	0	21	0	38	180
5	0	22	12	39	210
6	0	23	29	40	258
7	0	24	29	41	280
8	0	25	60	42	281
9	0	26	60	43	281
10	0	27	60	44	300
11	0	28	60	45	300
12	0	29	60	46	300
13	0	30	62	47	300
14	0	31	102	48	300
15	0	32	120	49	300
16	0	33	120	50	300
17	0	34	120	51	315

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	336	69	600	86	656
53	344	70	600	87	660
54	347	71	600	88	685
55	360	72	600	89	720
56	360	73	600	90	720
57	360	74	600	91	754
58	360	75	600	92	760
59	360	76	600	93	780
60	395	77	600	94	780
61	398	78	600	95	783
62	416	79	600	96	840
63	420	80	600	97	840
64	456	81	600	98	900
65	464	82	600	99	900
66	480	83	600	100	901
67	540	84	616	101	918
68	585	85	636	102	932

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
103	960	120	1260	137	1740
104	960	121	1260	138	1752
105	982	122	1294	139	1785
106	1026	123	1311	140	1800
107	1080	124	1320	141	1800
108	1080	125	1320	142	1800
109	1088	126	1333	143	1800
110	1090	127	1380	144	1800
111	1140	128	1440	145	1800
112	1149	129	1440	146	1800
113	1155	130	1472	147	1800
114	1168	131	1500	148	1800
115	1186	132	1500	149	1825
116	1200	133	1500	150	1880
117	1211	134	1560	151	1891
118	1215	135	1646	152	1942
119	1244	136	1714	153	1980

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
154	1990	171	2296	188	2688
155	2040	172	2331	189	2700
156	2070	173	2400	190	2734
157	2100	174	2400	191	2740
158	2100	175	2408	192	2758
159	2100	176	2411	193	2820
160	2160	177	2440	194	2828
161	2160	178	2460	195	2868
162	2201	179	2520	196	2880
163	2220	180	2520	197	2880
164	2255	181	2525	198	2940
165	2266	182	2535	199	2940
166	2280	183	2551	200	2968
167	2280	184	2580	201	2971
168	2280	185	2580	202	2993
169	2280	186	2640	203	2994
170	2294	187	2642	204	3000

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
205	3032	222	3488	239	3600
206	3038	223	3524	240	3600
207	3128	224	3528	241	3600
208	3180	225	3580	242	3600
209	3185	226	3600	243	3648
210	3196	227	3600	244	3660
211	3210	228	3600	245	3708
212	3220	229	3600	246	3720
213	3260	230	3600	247	3808
214	3273	231	3600	248	3815
215	3288	232	3600	249	3840
216	3300	233	3600	250	3840
217	3360	234	3600	251	3860
218	3424	235	3600	252	3955
219	3480	236	3600	253	3959
220	3480	237	3600	254	4020
221	3480	238	3600	255	4020

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
256	4080	273	4560	290	5340
257	4188	274	4649	291	5373
258	4191	275	4678	292	5400
259	4200	276	4680	293	5400
260	4200	277	4755	294	5400
261	4200	278	4800	295	5400
262	4217	279	4800	296	5400
263	4260	280	4800	297	5400
264	4269	281	4800	298	5400
265	4320	282	4920	299	5400
266	4405	283	4954	300	5400
267	4495	284	4987	301	5400
268	4500	285	5074	302	5400
269	4500	286	5078	303	5400
270	4500	287	5216	304	5400
271	4523	288	5316	305	5408
272	4546	289	5337	306	5460

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
307	5554	324	6240	341	6939
308	5577	325	6240	342	6951
309	5633	326	6300	343	6960
310	5640	327	6300	344	6975
311	5700	328	6322	345	6979
312	5712	329	6368	346	7020
313	5726	330	6391	347	7061
314	5795	331	6420	348	7106
315	5805	332	6459	349	7200
316	5880	333	6514	350	7200
317	5880	334	6600	351	7200
318	5897	335	6660	352	7200
319	5936	336	6720	353	7200
320	6000	337	6720	354	7200
321	6058	338	6841	355	7200
322	6060	339	6853	356	7200
323	6120	340	6900	357	7200

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
358	7200	375	7740	392	8880
359	7200	376	7800	393	8880
360	7200	377	7847	394	8880
361	7200	378	7860	395	8940
362	7200	379	7868	396	8967
363	7328	380	7935	397	8984
364	7339	381	7980	398	9000
365	7352	382	8013	399	9000
366	7365	383	8059	400	9000
367	7380	384	8160	401	9000
368	7417	385	8160	402	9000
369	7440	386	8220	403	9020
370	7475	387	8280	404	9160
371	7500	388	8400	405	9179
372	7500	389	8555	406	9180
373	7662	390	8640	407	9297
374	7680	391	8848	408	9564

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
409	9601	426	10800	443	11820
410	9664	427	10800	444	11820
411	9690	428	10818	445	11823
412	9840	429	10854	446	11890
413	9962	430	10860	447	12000
414	10068	431	10860	448	12000
415	10200	432	10860	449	12000
416	10200	433	10884	450	12120
417	10612	434	10956	451	12120
418	10634	435	11164	452	12300
419	10680	436	11220	453	12300
420	10680	437	11280	454	12600
421	10694	438	11400	455	12612
422	10716	439	11466	456	12664
423	10800	440	11520	457	12767
424	10800	441	11580	458	12900
425	10800	442	11740	459	13088

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
460	13125	477	14400	494	16020
461	13140	478	14400	495	16057
462	13151	479	14640	496	16500
463	13380	480	14700	497	16620
464	13462	481	15000	498	16648
465	13500	482	15000	499	16800
466	13500	483	15000	500	16906
467	13500	484	15180	501	16941
468	13568	485	15240	502	16980
469	13800	486	15300	503	17040
470	13860	487	15417	504	17040
471	13860	488	15581	505	17100
472	13980	489	15600	506	17100
473	14100	490	15710	507	17100
474	14286	491	15720	508	17265
475	14400	492	15780	509	17286
476	14400	493	15946	510	17792

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
511	17840	528	19842	545	21827
512	18122	529	19942	546	21900
513	18169	530	20460	547	21900
514	18420	531	20553	548	22020
515	18660	532	20582	549	22500
516	18840	533	20640	550	22500
517	18852	534	20640	551	22500
518	18900	535	20762	552	22500
519	18976	536	21120	553	22524
520	19200	537	21180	554	22620
521	19200	538	21232	555	22800
522	19260	539	21480	556	22800
523	19380	540	21600	557	22800
524	19560	541	21600	558	23455
525	19614	542	21600	559	23474
526	19763	543	21738	560	23700
527	19800	544	21817	561	23772

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
562	23956	579	25312	596	28380
563	23962	580	25614	597	28462
564	24000	581	25800	598	28800
565	24098	582	25841	599	28800
566	24180	583	25985	600	29056
567	24240	584	26160	601	29085
568	24458	585	26328	602	29100
569	24491	586	26400	603	29160
570	24540	587	26486	604	29200
571	24554	588	26640	605	29220
572	24618	589	26700	606	29379
573	24675	590	26940	607	29532
574	25020	591	27060	608	29700
575	25200	592	27180	609	29834
576	25200	593	27720	610	30078
577	25200	594	27900	611	30332
578	25236	595	27905	612	30600

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
613	30600	630	33720	647	36034
614	30600	631	33804	648	36459
615	31020	632	34080	649	36840
616	31140	633	34140	650	36909
617	31234	634	34200	651	37199
618	31300	635	34651	652	37200
619	31523	636	35040	653	37200
620	31620	637	35225	654	37200
621	32060	638	35280	655	37320
622	32400	639	35400	656	37381
623	32400	640	35494	657	37440
624	32400	641	35520	658	37800
625	32412	642	35593	659	37800
626	32475	643	35700	660	37800
627	32580	644	35936	661	37860
628	32640	645	36000	662	37860
629	32792	646	36013	663	37884

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
664	37948	681	40773	698	46380
665	38001	682	40797	699	46620
666	38040	683	40800	700	46800
667	38216	684	41342	701	46917
668	38400	685	41760	702	46920
669	38457	686	42180	703	46924
670	38460	687	42840	704	47275
671	38512	688	42945	705	47523
672	38860	689	43200	706	47940
673	39000	690	43827	707	48264
674	39110	691	44220	708	48466
675	39300	692	44288	709	48480
676	39720	693	44340	710	48609
677	39840	694	44424	711	49089
678	40200	695	45000	712	49869
679	40320	696	45614	713	50115
680	40500	697	45808	714	52048

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
715	52200	732	58740	749	67858
716	52200	733	59400	750	68400
717	52957	734	61200	751	70568
718	53432	735	61320	752	71700
719	53890	736	61320	753	72277
720	54045	737	61558	754	72360
721	54496	738	61798	755	73594
722	54559	739	61860	756	74019
723	55170	740	62700	757	74580
724	55313	741	63001	758	74880
725	55664	742	63660	759	75460
726	56641	743	63960	760	75600
727	57600	744	65066	761	75600
728	57888	745	66120	762	75819
729	58462	746	66600	763	76860
730	58560	747	66600	764	77042
731	58740	748	67008	765	77280

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
766	77400	783	90600	800	124080
767	80700	784	91800	801	125221
768	80815	785	92406	802	126578
769	81180	786	93813	803	127895
770	82105	787	97804	804	128894
771	83343	788	100260	805	129023
772	84540	789	100380	806	133931
773	84600	790	100800	807	134497
774	84600	791	106140	808	136440
775	85118	792	106760	809	138752
776	86400	793	110700	810	141499
777	86446	794	110700	811	144389
778	86468	795	111502	812	146400
779	88200	796	112927	813	147320
780	88200	797	115920	814	148020
781	89175	798	119272	815	150932
782	90360	799	119700	816	152156

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
817	152344				
818	154700				
819	155991				
820	157275				
821	160500				
822	163680				
823	165720				
824	172440				
825	175080				
826	175080				
827	179232				
828	192600				
829	277380				
830	295080				
831	298832				
832	299419				

ข้อมูลชุดที่ 7

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 113จุด จากเวลาการทดสอบ 713,700 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลชุดที่ 7

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	90	18	5400	35	33390
2	180	19	5400	36	35550
3	270	20	5670	37	36000
4	900	21	9360	38	41940
5	900	22	10350	39	43200
6	990	23	10710	40	50670
7	1260	24	12150	41	55170
8	1620	25	13680	42	57600
9	2430	26	14400	43	59130
10	2700	27	16560	44	61470
11	3150	28	17910	45	62730
12	3510	29	20340	46	64260
13	3600	30	21420	47	66870
14	3780	31	26460	48	67500
15	4500	32	27720	49	69390
16	4590	33	28440	50	69930
17	5130	34	31950	51	71460

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	75420	69	124380	86	213480
53	77130	70	141480	87	228330
54	82530	71	150480	88	229860
55	82620	72	151740	89	232020
56	85680	73	154350	90	245700
57	88560	74	157500	91	251820
58	92430	75	158940	92	253710
59	93420	76	162180	93	260010
60	95580	77	164610	94	298080
61	97920	78	167310	95	302940
62	99900	79	176130	96	303480
63	100620	80	178200	97	306900
64	105570	81	188820	98	313470
65	105660	82	189180	99	331830
66	110160	83	199710	100	338310
67	117900	84	205650	101	373500
68	123210	85	210060	102	380610

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

ข้อมูลชุดที่ 8

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 376 จุด จากเวลาการทดสอบ 1,167,840 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลชุดที่ 8

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	120	18	780	35	1500
2	180	19	780	36	1560
3	240	20	900	37	1560
4	240	21	960	38	1620
5	240	22	960	39	1680
6	360	23	1080	40	1800
7	420	24	1140	41	1800
8	420	25	1200	42	2100
9	480	26	1200	43	2100
10	480	27	1200	44	2400
11	540	28	1200	45	2640
12	540	29	1260	46	2700
13	600	30	1260	47	2880
14	600	31	1320	48	3000
15	600	32	1380	49	3480
16	600	33	1380	50	3600
17	600	34	1440	51	3780

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	3900	69	6300	86	11220
53	3960	70	6300	87	11700
54	4200	71	6660	88	11820
55	4320	72	7560	89	12180
56	4560	73	7560	90	12300
57	4800	74	8460	91	12720
58	4860	75	8760	92	13020
59	4920	76	9000	93	13440
60	4980	77	9000	94	13860
61	5100	78	9120	95	13920
62	5220	79	9360	96	13980
63	5400	80	9360	97	14040
64	5400	81	10020	98	14400
65	5400	82	10200	99	14640
66	5520	83	10200	100	14760
67	5520	84	10740	101	15360
68	5640	85	10860	102	15600

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
103	15660	120	22380	137	26940
104	15900	121	22620	138	28020
105	16260	122	23160	139	28200
106	16500	123	23220	140	29160
107	16740	124	23340	141	29400
108	18000	125	23520	142	29820
109	18120	126	23760	143	30180
110	18420	127	23940	144	30420
111	18600	128	24000	145	30660
112	19800	129	24060	146	30900
113	20160	130	24180	147	31380
114	20700	131	25440	148	32100
115	21000	132	25800	149	32640
116	21360	133	25980	150	33420
117	21480	134	26640	151	33480
118	21900	135	26700	152	33900
119	22140	136	26700	153	34200

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
154	34560	171	46740	188	59040
155	35220	172	46920	189	59400
156	35760	173	47940	190	61380
157	35880	174	48300	191	62340
158	36540	175	48600	192	63420
159	37260	176	48780	193	64860
160	38700	177	50040	194	66960
161	39060	178	50460	195	68040
162	39180	179	51780	196	68340
163	39240	180	52920	197	68700
164	40380	181	55260	198	69120
165	40920	182	55500	199	69960
166	41520	183	55740	200	70080
167	41520	184	56820	201	70320
168	43320	185	57000	202	70320
169	43860	186	57120	203	70620
170	44160	187	58020	204	71040

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
205	71340	222	84480	239	109140
206	72900	223	84540	240	113640
207	73140	224	84780	241	116400
208	73260	225	86460	242	119520
209	75000	226	87540	243	120480
210	75600	227	94380	244	120780
211	77160	228	94980	245	123120
212	77340	229	95280	246	123540
213	78120	230	97740	247	123900
214	78300	231	99600	248	128700
215	79440	232	99660	249	130560
216	79560	233	101280	250	130620
217	79680	234	101940	251	130860
218	79800	235	104880	252	131460
219	80100	236	105540	253	131460
220	81660	237	108120	254	132700
221	82680	238	108360	255	133920

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
256	136320	273	159600	290	186240
257	137160	274	160320	291	186240
258	139920	275	162180	292	186600
259	140040	276	163020	293	190260
260	140940	277	163080	294	193140
261	141540	278	168000	295	195000
262	142020	279	170040	296	196380
263	142920	280	170700	297	199740
264	144480	281	171360	298	207660
265	146040	282	172440	299	208020
266	147420	283	173580	300	209700
267	148920	284	175620	301	210060
268	155880	285	175860	302	210600
269	156540	286	180900	303	213660
270	157200	287	181740	304	219300
271	157740	288	185220	305	219660
272	158640	289	185640	306	225600

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
307	229740	324	279180	341	400080
308	233640	325	288360	342	406920
309	234540	326	291720	343	408840
310	242760	327	292080	344	409620
311	245160	328	297360	345	423360
312	245700	329	298020	346	423900
313	249420	330	309660	347	432480
314	249480	331	310020	348	446460
315	249960	332	315960	349	447660
316	253140	333	335460	350	448980
317	257334	334	340860	351	479760
318	262200	335	346652	352	506880
319	263820	336	348000	353	507840
320	266340	337	352260	354	511380
321	268260	338	360420	355	512880
322	271440	339	364020	356	523500
323	273480	340	396240	357	539820

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
358	548460	375	1109520		
359	554940	376	1167840		
360	556380				
361	559140				
362	596820				
363	612600				
364	637860				
365	668700				
366	678720				
367	722940				
368	730560				
369	750480				
370	790260				
371	841020				
372	863400				
373	891600				
374	940500				

ข้อมูลชุดที่ 9

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 278 จุด จากเวลาการทดสอบ 1,016,040 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-9 แสดงข้อมูลชุดที่ 9

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	1	18	780	35	1800
2	60	19	840	36	1920
3	120	20	840	37	1980
4	120	21	840	38	2100
5	180	22	900	39	2100
6	240	23	960	40	2220
7	420	24	1020	41	2280
8	420	25	1080	42	2280
9	420	26	1080	43	2340
10	480	27	1080	44	2460
11	540	28	1140	45	2760
12	540	29	1200	46	2820
13	540	30	1320	47	2880
14	600	31	1500	48	3000
15	600	32	1620	49	3420
16	660	33	1680	50	3720
17	720	34	1740	51	3780

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	3960	69	10320	86	17400
53	4320	70	10340	87	18780
54	4620	71	10860	88	19200
55	4740	72	11460	89	20760
56	5100	73	12120	90	22260
57	5100	74	12180	91	22800
58	5100	75	12660	92	23160
59	5400	76	13080	93	23520
60	5760	77	13080	94	23700
61	6180	78	13080	95	24180
62	6780	79	13080	96	24360
63	6900	80	13080	97	25020
64	7980	81	13380	98	25440
65	8400	82	13620	99	26640
66	8880	83	16080	100	26820
67	8940	84	16680	101	27000
68	9300	85	16800	102	28800

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
103	28800	120	36060	137	43380
104	28920	121	36480	138	44400
105	28980	122	37260	139	44400
106	29940	123	37260	140	45360
107	30540	124	38520	141	45360
108	31260	125	38700	142	45660
109	31320	126	38940	143	45960
110	32100	127	39300	144	47100
111	32100	128	40020	145	47400
112	33000	129	41460	146	48660
113	33480	130	41760	147	48720
114	33840	131	41880	148	49920
115	33900	132	42840	149	51960
116	34140	133	42840	150	52140
117	34500	134	43020	151	52500
118	34620	135	43260	152	52740
119	35760	136	43380	153	52920

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
154	53520	171	66960	188	87960
155	54960	172	70800	189	98820
156	55260	173	71280	190	99360
157	55500	174	73560	191	99540
158	56160	175	73560	192	100020
159	57720	176	75000	193	100560
160	58620	177	75720	194	101280
161	58980	178	75960	195	102480
162	60000	179	79560	196	103080
163	60840	180	80040	197	107400
164	60840	181	81060	198	110220
165	61260	182	83460	199	110520
166	62040	183	85140	200	115860
167	62160	184	85800	201	116760
168	63960	185	86400	202	117360
169	66420	186	86700	203	117720
170	66960	187	86880	204	118020

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
205	118140	222	145920	239	207840
206	118620	223	146640	240	219328
207	118980	224	155820	241	224520
208	119100	225	156300	242	226440
209	119340	226	163260	243	228360
210	122580	227	167940	244	228900
211	123360	228	172140	245	241500
212	128040	229	172140	246	242820
213	129660	230	174180	247	245760
214	130920	231	175476	248	255840
215	130980	232	177360	249	262980
216	131580	233	178740	250	264900
217	134340	234	181500	251	266760
218	137940	235	187260	252	269100
219	142140	236	188280	253	270472
220	144240	237	190020	254	280260
221	144660	238	191040	255	284407

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
256	286500	273	790440		
257	287160	274	805176		
258	305040	275	810840		
259	319260	276	842220		
260	337920	277	890340		
261	430800	278	1016040		
262	442860				
263	454200				
264	462600				
265	479968				
266	494640				
267	501060				
268	507300				
269	510780				
270	543060				
271	625140				
272	659392				

ข้อมูลชุดที่ 10

เป็นชุดข้อมูลเก็บอยู่ในรูปของเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 86 จุด จากเวลาการทดสอบ 102,576 วินาที รายละเอียดข้อมูลมีดังนี้

ตารางที่ ก-10 แสดงข้อมูลชุดที่ 10

วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
1	479	18	10501	35	22244
2	763	19	11097	36	23845
3	1040	20	11854	37	24143
4	1594	21	12291	38	25017
5	2628	22	14521	39	25635
6	2877	23	14958	40	28239
7	3570	24	15298	41	28244
8	4167	25	15703	42	28393
9	4284	26	16238	43	29427
10	4454	27	16515	44	31868
11	4571	28	16878	45	32328
12	5845	29	17400	46	32893
13	6314	30	18013	47	34012
14	7488	31	18290	48	34449
15	8181	32	19590	49	35376
16	10089	33	20411	50	39838
17	10224	34	20624	51	40552

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม	วินาที	ช่วงเวลาการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม
52	40733	69	63034	86	102576
53	42218	70	67356		
54	42975	71	68774		
55	46129	72	69797		
56	48244	73	75287		
57	49128	74	76807		
58	51165	75	80088		
59	52646	76	82804		
60	53205	77	84979		
61	53695	78	88484		
62	54288	79	89209		
63	56057	80	91172		
64	56142	81	95151		
65	58978	82	96241		
66	59191	83	96486		
67	61057	84	97680		
68	61547	85	98674		

ภาคผนวก ข
โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบ Goel -Okumoto Model

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (b : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'C: DATA.DAT');
    Func := nk/(sumn+(nk*sk*Exp(-b*sk))/(1-exp(-b*sk))).
    end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;
Writeln(' ', Iter : 8, ' ', X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
        200 : Writeln;
                Writeln('The Root is' , X1:13);
        300 : Writeln;
    End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวแบบ Delayed S-shaped

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (b : real) : real ;
Begin
Assign (Infile, 'C : DATA.DAT');
    Func := (2*nk*(1-(1-(b*sk))Exp(-b*sk)))/(nk*b*SQR(sk)*Exp(-b*sk)).
end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;
Writeln(' ', Iter : 8, ' ', X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
        200 : Writeln;
                Writeln('The Root is' , X1:13);
        300 : Writeln;
    End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวแบบ Inflection S-shaped

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (b, beta : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'C : DATA.DAT');
    Func1 :=nk/(((nk*sk*Exp(-b*sk))*(1+beta))/((1-Exp(-b*sk))*(1+(beta*Exp(-b*sk))))
        +beta+(2*((beta*s*Exp(-b*s))/(1+beta*exp(-b*s))))).
    Func 2 := nk/(((nk*sk*Exp(-b*sk))*(1+beta))/((1+Exp(-b*sk))*(1+(beta*Exp(-b*sk))))
        +sumn-(2*((beta*s*Exp(-b*s))/(1+beta*Exp(-b*s))))).
    end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;
Writeln(' ', Iter : 8, ' ', X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
        200 : Writeln;
            Writeln('The Root is' , X1:13);
        300 : Writeln;
    End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบ Yamada Exponential

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (alpha, beta : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'C : DATA.DAT');
    Func1 :=Exp((1/2)* ln(alpha*(1-Exp(-beta*n)))-ln(beta)+(beta/nk)*(sumn)).
    Func2 :=(ln(alpha*(1-Exp(-beta*n)))*(sumn)-(nk*sumn*ln(alpha*(1-Exp(-beta*n)))))
        /(nk*SQR(n)*ln(alpha*(1-Exp(-beta*n)))).
end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;
Writeln('    ', Iter : 8, '    ',X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
        200 : Writeln;
            Writeln('The Root is' , X1:13);
        300 : Writeln;
    End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบ Yamada Rayleigh

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (alpha,beta : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'C : DATA.DAT');
    Func1:=Exp((1/nk)*ln(alpha*(1-Exp(-beta*SQR(n)/2))*n)- ln(beta)+SQR(n)).
    Func2 :=(2*ln(alpha*(1-Exp(-beta*SQR(n)/2))*n)*SQR(n)-nk*SQR(n)
        *ln(alpha*(1-Exp(-beta*SQR(n)/2))*n))/(nk*SQR(n)-SQR(SQR(n))).
end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;
Writeln('    ', Iter : 8, '    ',X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
        200 : Writeln;
            Writeln('The Root is' , X1:13);
        300 : Writeln;
    End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวแบบ Yamada Imperfect Dugging

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (a,b,alpha : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'C : DATA.DAT');
    Func1:= ((b+alpha)/b)*(nk/(Exp(alpha*sk)-Exp(-b*sk))).
    Func2 := (a*b*(Exp(alpha*n)-Exp(-b*n)-Exp*(-b*n)))/(b+alpha).
    Func3:= ((-a*(-b*((Exp(alpha*n)-Exp(-b*n)-Exp*(-b*n))-
        (b*((n*Exp(alpha*n)) -(n*Exp(alpha*n))))-
        (((n*Exp(alpha*n))-n*Exp(alpha*n))*alpha)))/SQR((b+alpha)))
        *((a*b*(Exp(alpha*n)-Exp(-b*n)-Exp*(-b*n)))/(b+alpha))*(SQR(b)
        +(2*b*alpha)+SQR(alpha))/(a/(b*((Exp(alpha*n)-Exp(-b*n)
        -Exp*(-b*n))-SQR(b))*(((n*Exp(alpha*n))-n*Exp(alpha*n)))-2)
        *b*((n*Exp(alpha*n))-n*Exp(alpha*n)))
        *(alpha-((n*Exp(alpha*n))-n*Exp(alpha*n))))*SQR(alpha)).
end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
        Begin
            F0 := Func (X0);
            F1 := Func(X1);
            DF := (F0-F1) / (X0-X1);
            DX := X1;
            X1 := X1+DX;

Writeln(' ', Iter : 8, ' ', X1:13);
            TOL := ABS(DX=100./X1);
            IF
                TOL < ES THEN Goto 200
        End;
Writeln;
```

```
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');  
Goto 300;  
    200 : Writeln;  
        Writeln('The Root is' , X1:13);  
    300 : Writeln;  
End.
```

โปรแกรมการประมาณค่าพารามิเตอร์ตัวแบบ Pham-Nordmann

```
(*.... Program For Computing Root of Nonlinear ..*)
(*.... Equation Using The Secant Method      ....*)
(*.... Define The Following Give Value :      ....*)
(*.... X0 = First Value Of Initial Guess Of X    *)
(*.... X1 = Second Value Of Initial Guess Of X   *)
(*.... ES = Stopping Criterion Tolerance      (%) ..*)
Lable 200,300
Var X0,X1,DF,DX,ES,F0,F1,TOL : real;
    ITER : integer;
(*-----*)
Function Func (b,alpha,beta : real) : real ;
Begin
    Assign (Infile, 'DATA.DAT');
    Func1:=(sk/((((n)/((1-(alpha/beta))-(alpha*n)))/(beta-(b*n)))*(SQR((1+$beta-
        ($b*$n)))))-((((n)/((b*n)/((1-(alpha/beta))
        -(alpha*n)))/(beta-(b*n)))*(SQR((1+beta-(b*n)))))-((((n-(b*n))/
        (1-(alpha/beta))-(alpha*n))*(1+(beta*b*n)))
        -((((n-(b*n))/(1-(alpha/beta))-(alpha*n))*(1+beta-(b*n))))*((b*n)/(1-(alpha/beta))-(
        alpha*n))*(1+beta-(b*n))-(((Exp(-b*n))/(1-(alpha/beta))-(alpha*n))*(1+beta-(b*n))).
    Func2 :=(sk/(((n)/(alpha*n))*SQR((1+($beta*exp(-$b*$n)))))+((((n)/
        (1-(alpha/beta))-(alpha*n))/(beta))*SQR((1+(beta*Exp(-b*n))))
        +((((n*Exp(-b*n))/(1-(alpha / beta))-(alpha*n))*(1+(beta*
        Exp(-beta*n))))-((((n*Exp(-b*n))/(1-(alpha/beta))
        -(alpha*n))*(1+(beta*Exp(-b*n))))*((((1-Exp(-b*n))/(1-(alpha*beta)))-
        (alpha*n))*(1+(beta*Exp(-b*n))))-((((1-Exp(-b*n))/
        (1-(alpha*beta)))+(alpha*n))*(1+(beta*Exp(-b*n))))).
    Func3 :=(sk/((((n)/(1-(alpha/beta))-(alpha*n))*(SQR+($beta*Exp(-b*n)))))-
        (((n)/((1-Exp(-b*n))/(1-(alpha*beta))))
        -((alpha*n)/(beta*Exp(-b*n))))*(SQR((1+(beta*Exp(-b*n))))-
        (((n*Exp(-b*n))/(1-(alpha*beta))
        -(alpha*n))*(1+(beta*Exp(-b*n))))-((((n*Exp(b*n))/(1-(alpha/beta))
        -(alpha*n))*(1+(beta*Exp(b*n))))*((((1-Exp(-b*n))/(1-(alpha/beta))
        -(alpha*n))*(1+(beta*Exp(-beta*n))))-((((1-Exp(-b*n))/(1-(alpha/beta)))-
        (alpha*n))*(1+(beta*Exp(-b*n))))).
end;
(*-----*)
Begin
    X0 := 3.;
    X1 := 2.;
    ES := 0.001;
Writeln;
Writeln('ITERATION No. X');
Writeln;
    For Iter :1 To 5000 Do
```

```

Begin
  F0 := Func (X0);
  F1 := Func(X1);
  DF := (F0-F1) / (X0-X1);
  DX := X1;
  X1 := X1+DX;
Writeln('  ', Iter : 8, '      ',X1:13);
  TOL := ABS(DX=100./X1);
  IF
    TOL < ES THEN Goto 200
End;
Writeln;
Writeln('Root Can Not Be Reached For The', 'Given Condition');
Goto 300;
  200 : Writeln;
        Writeln('The Root is' , X1:13);
  300 : Writeln;
End.

```

โปรแกรมวิธีการ U-PLOT และวิธีการ Y-PLOT

```

<?
print "<html><head>";
print "<title>Software Reliability</title></head>";
print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";
$number_data=shift;
$cut = shift;
return $number_data;
}
open (Gou, ">result\$file Go_U.DAT");
open (Goy, ">result\$file Go_Y.DAT");
@go=<Go>;
close (Go);
open (SAVE, ">result\$file Delayed_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file Delayed_Y.DAT");
@delayed=<Delayed>;
close (Delayed);
open (SAVE, ">result\$file Inflection_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file Inflection_Y.DAT");
@inflection=<Inflection>;
close (Inflection);
open (SAVE, ">result\$file YE_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file YE_Y.DAT");
@ye=<YE>;
close (YE);
open (SAVE, ">result\$file YR_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file YR_Y.DAT");
@yr=<YR>;
close (YR);
open (SAVE, ">result\$file YID_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file YID_Y.DAT");
@yid=<YID>;
close (YID);
open (SAVE, ">result\$file Pham_U.DAT");
open (SAVE, ">result\$file Pham_Y.DAT");
@pham=<Pham>;
close (Pham);
$len=@go;
open (FILE, "data/$file .DAT");
@SR=<FILE>;
close(FILE);
$number_data=@SR;
for($i=1;$i<=len;$i++)
{
$cdf[$i]=%%(pow($mt,$nk)/$fn)*exp(-$mt);
$go[$i]=$sort_go($i/2);
$ds[$i]= $sort_ds($i/2);

```

```

$is[$i]= $sort_is($i/2);
$ye[$i]= $sort_ye($i/2);
$yr[$i]= $sort_yr($i/2);
$yid[$i]= $sort_yid($i/2);
$pn[$i]= $sort_pn($i/2);
for($j=1;$j<=1000;$j++)
{
$go[$j]=$sort_go(($i-1)/2);
$ds[$j]= $sort_ds(($i-1)/2);
$is[$j]= $sort_is(($i-1)/2);
$ye[$j]= $sort_ye(($i-1)/2);
$yr[$j]= $sort_yr(($i-1)/2);
$yid[$j]= $sort_yid(($i-1)/2);
$pn[$j]= $sort_pn(($i-1)/2);
}
$ko_go[$i]=abs($cdf[$i]-$go[$i]);
$ko_ds[$i]=abs($cdf[$i]-$ds[$i]);
$ko_is[$i]=abs($cdf[$i]-$is[$i]);
$ko_ye[$i]=abs($cdf[$i]-$ye[$i]);
$ko_yr[$i]=abs($cdf[$i]-$yr[$i]);
$ko_yid[$i]=abs($cdf[$i]-$yid[$i]);
$ko_pn[$i]=abs($cdf[$i]-$pn[$i]);
$y_go[$i]=-log10(1-$ko_go[$i])/$sk;
$y_ds[$i]=-log10(1-$ko_ds[$i])/$sk;
$y_is[$i]=-log10(1-$ko_is[$i])/$sk;
$y_ye[$i]=-log10(1-$ko_ye[$i])/$sk;
$y_yr[$i]=-log10(1-$ko_yr[$i])/$sk;
$y_yid[$i]=-log10(1-$ko_yid[$i])/$sk;
$y_pn[$i]=-log10(1-$ko_pn[$i])/$sk;
}
sort($ko_go[$i]);
sort($ko_ds[$i]);
sort($ko_is[$i]);
sort($ko_ye[$i]);
sort($ko_yr[$i]);
sort($ko_yid[$i]);
sort($ko_pn[$i]);
}
print 'U-Go: '. $ko_go[$i]. '<br>';
print ' U-Delayed S-shaped:'. $ko_ds[$i]. '<br>';
print ' U-Inflection S-shaped:'. $ko_is[$i]. '<br>';
print ' U-Yamada Exponential:'. $ko_ye[$i]. '<br>';
print ' U-Yamada Rayleigh:'. $ko_yr[$i]. '<br>';
print ' U-Yamada Imperfec:'. $ko_yid[$i]. '<br>';
print ' U-Pham-Norndman:$ko_pn[$i]. '<br>';
print 'Y-Go: '. $y_go[$i]. '<br>';
print ' Y-Delayed S-shaped:'. $y_ds[$i]. '<br>';

```

```
print ' Y-Inflection S-shaped:'. $y_is[$i].<br>;  
print ' Y-Yamada Exponential:'. $y_je[$i].<br>;  
print ' Y-Yamada Rayleigh:'. $y_yr[$i].<br>;  
print ' Y-Yamada Imperfec:'. $y_yid[$i].<br>;  
print ' Y-Pham-Norndman:$y_pn[$i].<br>;  
?>
```

โปรแกรมวิธีการ PLR

```

<?
print "<html><head>";
print "<title>Software Reliability</title></head>";
print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";
$number_data=shift;
$cut = shift;
return $number_data;
}
open (Gou, ">result\file Go_PLR.DAT");
open (Goy, ">result\file Go_PLR.DAT");
@go=<Go>;
close (Go);
open (SAVE, ">result\file Delayed_PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file Delayed_PLR.DAT");
@delayed=<Delayed>;
close (Delayed);
open (SAVE, ">result\file Inflection_ PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file Inflection_ PLR.DAT");
@inflection=<Inflection>;
close (Inflection);
open (SAVE, ">result\file YE_ PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file YE_ PLR.DAT");
@ye=<YE>;
close (YE);
open (SAVE, ">result\file YR_ PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file YR_ PLR.DAT");
@yr=<YR>;
close (YR);
open (SAVE, ">result\file YID_ PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file YID_ PLR.DAT");
@yid=<YID>;
close (YID);
open (SAVE, ">result\file Pham_ PLR.DAT");
open (SAVE, ">result\file Pham_ PLR.DAT");
@pham=<Pham>;
close (Pham);
$len=@go;
open (FILE, "data/file .DAT");
@SR=<FILE>;
close(FILE);
$number_data=@SR;
for($i=1;$i<=len;$i++)
{
$Go_PLR_DS=$go[$i]/$ds[$i];
$DS_PLR_IS=$ds[$i]/$is[$i];
$DS_PLR_YE=$ds[$i]/$ye[$i];

```

```

$DS_PLR_YR=$ds[$i]/$yr[$i];
$DS_PLR_YID=$ds[$i]/$yid[$i];
$DS_PLR_PN=$ds[$i]/$pn[$i];
$IS_PLR_YE=$is[$i]/$ye[$i];
$IS_PLR_Go=$is[$i]/$go[$i];
$IS_PLR_YR=$is[$i]/$yr[$i];
$IS_PLR_YID=$is[$i]/$yid[$i];
$IS_PLR_PN=$is[$i]/$pn[$i];
$YE_PLR_YR=$ye[$i]/$yr[$i];
$YE_PLR_Go=$ye[$i]/$go[$i];
$YE_PLR_YID=$ye[$i]/$yid[$i];
$YE_PLR_PN=$ye[$i]/$pn[$i];
$YR_PLR_YID=$yr[$i]/$yid[$i];
$YR_PLR_Go=$yr[$i]/$go[$i];
$YR_PLR_PN=$yr[$i]/$pn[$i];
$YID_PLR_PN=$yid[$i]/$pn[$i];
$YID_PLR_Go=$yid[$i]/$go[$i];
$PN_PLR_Go=$pn[$i]/$go[$i];
}
print 'PLR1: '. $Go_PLR_DS.'<br>';
print 'PLR2: '. $DS_PLR_IS.'<br>';
print 'PLR3: '. $DS_PLR_YE.'<br>';
print 'PLR4: '. $DS_PLR_YR.'<br>';
print 'PLR5: '. $DS_PLR_YID.'<br>';
print 'PLR6: '. $DS_PLR_PN.'<br>';
print 'PLR7: '. $IS_PLR_YE.'<br>';
print 'PLR8: '. $IS_PLR_Go.'<br>';
print 'PLR9: '. $IS_PLR_YR.'<br>';
print 'PLR10: '. $IS_PLR_YID.'<br>';
print 'PLR11: '. $IS_PLR_PN.'<br>';
print 'PLR12: '. $YE_PLR_YR.'<br>';
print 'PLR13: '. $YE_PLR_Go.'<br>';
print 'PLR14: '. $YE_PLR_YID.'<br>';
print 'PLR15: '. $YE_PLR_PN.'<br>';
print 'PLR16: '. $YR_PLR_YID.'<br>';
print 'PLR17: '. $YR_PLR_Go.'<br>';
print 'PLR18: '. $YR_PLR_PN.'<br>';
print 'PLR19: '. $YID_PLR_PN.'<br>';
print 'PLR20: '. $YID_PLR_Go.'<br>';
print 'PLR21: '. $PN_PLR_Go.'<br>';
?>

```

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นางสาวศิริทิพย์ ตุงคะเสรีรักษ์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การเปรียบเทียบตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ กรณีระยะห่าง
 ของการพบข้อผิดพลาดมีการแจกแจงไวบูลล์
 สาขา : สถิติประยุกต์

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 25 มีนาคม 2525

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาการจัดการอุตสาหกรรม
 คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 ในปี 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสถิติประยุกต์
 คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547