



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์
โดย นายมนต์ชัย ไร่กระโทก

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติประยุกต์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

9 กรกฎาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรองแก้ว หวังนิเวศน์กุล)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวม จงเจริญ)

การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

นายมนต์ชัย ไร่วระโทก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถิติประยุกต์ ภาควิชาสถิติประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ร.พ.

MAST

๑๒๕๖

๑๖.๖

ชื่อ : นายมนต์ชัย ร้าวกระโทก

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

สาขาวิชา : สถิติประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว หวังนิเวศน์กุล

ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ได้แก่ตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto โดยใช้ค่า KS-Statistic จาก U-Plot และค่า $-\ln PL_n$ จาก PLR และประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation :MLE) โดยใช้ข้อมูลจริงที่เก็บรวบรวมในห้องปฏิบัติการโดยนักวิจัยทางด้านวิศวกรรมซอฟต์แวร์

ผลการวิจัยสรุปได้ว่าทั้งค่า KS-Statistic จาก U-Plot และค่า $-\ln PL_n$ จาก PLR ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่าต่ำสุดในเกือบทุกชุดข้อมูล

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 205 หน้า)

คำสำคัญ : ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์,ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์,U-Plot,PLR

၎င်း တပ်ဖွဲ့တို့က

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Monchai Rowkratok
Thesis Title : Comparison of the Accuracy of Software Reliability Models
Major Field : Applied Statistics
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Assistant Professor Dr. Winai Bodhisuwan
Assistant Professor Krongkaew Wangniveitkul
Academic Year : 2549

Abstract

The propose of this research is to compare the accuracy of five software reliability models: Jelinski-Moranda Model, Geometric Model, Littlewood-Verrall Model, Musa's basic Model and Musa-Okumoto Model. We calculate KS-Statistic from U-Plot and $-\ln PL_n$ from PLR for model comparison. Data set were collected by software engineer from various laboratories. Estimation of parameters can be found by Maximum Likelihood Estimation (MLE).

The conclusion of this research is that both the KS-Statistic from U-Plot and $-\ln PL_n$ from PLR for the Littlewood-Verrall Model are smallest for most of data sets which are studied.

(Total 205 pages)

Keywords : Software Reliability,Software Reliability Model,U-Plot,PLR

W. Bodhisuwan

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายมนต์ชัย ร้าวกระโทก ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย โพธิ์สุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรองแก้ว หวังนิเวศน์กุล ที่มอบวิชาความรู้ให้ข้าพเจ้าได้นำมาใช้ทั้งในงานวิจัยฉบับนี้ กราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ตำรวม จงเจริญ ที่ให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ขึ้น และกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษามาโดยตลอด จนถึงระดับปริญญาโทฉบับนี้

มนต์ชัย ร้าวกระโทก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 เกณฑ์ที่ใช้การเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าของตัวแบบ	5
1.6 คำจำกัดความ	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีความเชื่อถือได้ (Reliability Theory)	7
2.2 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability)	12
2.3 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Growth Model)	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวแบบที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้	30
2.6 วิธีการทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	43
3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์	43
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	44
3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบทุกชุดข้อมูล	44
3.4 การประมาณค่าความน่าจะเป็นและความน่าจะเป็นสะสม	44
3.5 การใช้สถิติในการเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์ความเชื่อถือได้	47
3.6 การนำเสนอข้อมูล	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	51
4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 1	53
4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 2	59
4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 3	65
4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 4	71
4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 5	77
4.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 6	83
4.7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 7	89
4.8 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 8	95
4.9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 9	101
4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 10	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	113
5.1 สรุปผลการวิจัย	113
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	113
5.3 ข้อเสนอแนะ	114
เอกสารอ้างอิง	115
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย	119
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์	175
ประวัติผู้วิจัย	205

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 แสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ และ $h(t)$	10
2-2 ลักษณะการเกิดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในรูปแบบของเวลาการเกิดข้อผิดพลาด	15
2-3 ลักษณะการเกิดข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในรูปแบบของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาด	16
3-1 ข้อมูลของช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง	43
4-1 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	53
4-2 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	56
4-3 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	59
4-4 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	62
4-5 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	65
4-6 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	68
4-7 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-8	แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	74
4-9	แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	77
4-10	แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	80
4-11	แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	83
4-12	แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	86
4-13	แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	89
4-14	แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	92
4-15	แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	95
4-16	แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-17 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	101
4-18 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	104
4-19 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	107
4-20 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	110
5-1 แสดงข้อมูลทั้ง 10 ชุดและตัวแบบที่มีความแม่นยำสูงสุด	113
ก-1 แสดงข้อมูลชุดที่ 1	121
ก-2 แสดงข้อมูลชุดที่ 2	124
ก-3 แสดงข้อมูลชุดที่ 3	126
ก-4 แสดงข้อมูลชุดที่ 4	135
ก-5 แสดงข้อมูลชุดที่ 5	139
ก-6 แสดงข้อมูลชุดที่ 6	147
ก-7 แสดงข้อมูลชุดที่ 7	153
ก-8 แสดงข้อมูลชุดที่ 8	158
ก-9 แสดงข้อมูลชุดที่ 9	169
ก-10 แสดงข้อมูลชุดที่ 10	172

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	อัตราการล้มเหลวเทียบกับเวลา	11
2-2	อัตราการเกิดข้อผิดพลาดตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์	12
2-3	โค้งความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์	13
2-4	โค้งความสัมพันธ์ของจำนวนข้อผิดพลาดสะสมกับเวลา	15
3-1	แผนผังขั้นตอนในการวิจัยสำหรับข้อมูลแต่ละชุด	46
3-2	แสดงการหา KS-Statistic	47
3-3	แสดงการหา KS-distance จากกราฟ U-Plot	48
3-4	การพยากรณ์ $f_1(t)$ โดยใช้ตัวแบบ A และ B	49
4-1	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 1	53
4-2	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	54
4-3	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	55
4-4	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	57
4-5	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1	58
4-6	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 2	59
4-7	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	60
4-8	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	61
4-9	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	63
4-10	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2	64
4-11	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 3	65
4-12	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	66
4-13	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	67
4-14	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	71
4-15	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-16	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 4	71
4-17	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	72
4-18	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	73
4-19	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	76
4-20	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4	76
4-21	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 5	77
4-22	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	78
4-23	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	79
4-24	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	81
4-25	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5	82
4-26	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 6	83
4-27	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	84
4-28	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	85
4-29	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	87
4-30	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6	88
4-31	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 7	89
4-32	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	90
4-33	แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	91
4-34	จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	93
4-35	ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7	94
4-36	ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 8	95
4-37	แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-38 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	97
4-39 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	99
4-40 ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8	100
4-41 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 9	101
4-42 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	102
4-43 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	103
4-44 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 9	105
4-45 ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่	106
4-46 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 10	107
4-47 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	108
4-48 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	109
4-49 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาด ที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	111
4-50 ความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10	112
ข-1 False Position Method สำหรับการหารากของสมการ $f(x) = 0$	177

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการควบคุม และดำเนินการกิจกรรมต่างๆ มากมาย โดยแต่ละงานที่มีความสลับซับซ้อนและยุ่งยาก ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงาน องค์กร และสถาบันต่างๆ จึงใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือช่วยในการทำงาน ภายใต้คำสั่งการจากผู้ปฏิบัติงาน ด้วยชุดคำสั่งที่ถูกต้อง ซึ่งรู้จักกันโดยทั่วไปว่า “ซอฟต์แวร์ (Software)” คอมพิวเตอร์ จึงเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาช่วยทำงานที่มีกลไกสลับซับซ้อน ภายใต้คำสั่งที่ถูกต้องตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือน และทำงานให้ตรงตามจุดประสงค์ที่ผู้ใช้งานต้องการนั่นเอง ซึ่งผู้ผลิตซอฟต์แวร์จำเป็นต้องพัฒนาและทำการทดสอบซอฟต์แวร์อยู่เสมอ เพื่อให้ซอฟต์แวร์ของคนที่สามารถทำงานได้โดยปราศจากข้อผิดพลาด ซึ่งอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายได้ เช่น หากซอฟต์แวร์ระบบควบคุมสัญญาณไฟจราจรเกิดข้อผิดพลาด เพราะเพียงให้สัญญาณไฟเขียวพร้อมกันก็ย่อมเกิดอุบัติเหตุ หรือระบบคัดยodbบัญชีควรคัดยodbได้ถูกต้อง ตรงเวลา จะเห็นได้ชัดว่าหากซอฟต์แวร์ระบบทำงานผิดพลาดอาจเกิดผลเสียหายทั้งทางด้านชีวิตและทรัพย์สิน แม้ว่าจะมีความพยายามอย่างยิ่งยวดที่จะให้ปราศจากข้อผิดพลาดต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม จุดบกพร่องก็ยังคงรอเวลาปรากฏขึ้นอยู่เสมอ จุดบกพร่องที่จะทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดของซอฟต์แวร์นั้นเรารู้จักและคุ้นเคยกันดีนั่นคือ “บั๊ก (Bug)”

จุดบกพร่องหรือบั๊กที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ อาทิ โปรแกรมเมอร์เข้าใจโจทย์ผิด ค่าของตัวแปรเกินขอบข่ายของภาษาที่กำหนดไว้ พิมพ์คำสั่งผิด เป็นต้น

จากสาเหตุและปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดการศึกษาวิจัยเพื่อหาจุดบกพร่องในซอฟต์แวร์ให้พบมากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และทำการแก้ไข เพื่อที่จะได้ซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถที่จะทำงานได้โดยปราศจากความบกพร่องหรือข้อผิดพลาด นั่นคือเรามีความพยายามที่จะทำให้ซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เป็นปกติ ในกำหนดเวลาหนึ่ง ๆ ซึ่งเราต้องการให้ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์นี้เข้าใกล้ 1 นั่นเท่ากับว่าซอฟต์แวร์มีจุดบกพร่องหลงเหลืออยู่น้อยที่สุดและซอฟต์แวร์จะสามารถทำงานได้เป็นปกติในระยะเวลาที่นานขึ้น โดยที่ความน่าจะเป็นดังกล่าวเราเรียกว่า “ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability)”

เราสามารถหาความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ได้ โดยอาศัยการประมาณค่าได้จากตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์นั้น ๆ ซึ่งประยุกต์วิธีการทางสถิติและความน่าจะเป็นเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์เกิดข้อผิดพลาดในการทำงานของซอฟต์แวร์ ในอดีตได้นักวิจัยพยายามหาตัวแบบเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์ และนำเสนอตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ไว้มากมาย ซึ่งก็มีข้อแตกต่างกันไปตามข้อสมมติของแต่ละตัวแบบ และแต่ละตัวแบบก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป หรือกล่าวได้ว่า ไม่มีตัวแบบใดที่จะใช้ได้กับทุกซอฟต์แวร์ และในปัจจุบันยังคงมีนักพัฒนาซอฟต์แวร์จำนวนมากยังมีความสับสนในการเลือกใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ โดยที่ไม่ทราบว่า การพัฒนาซอฟต์แวร์ของตนควรจะใช้ตัวแบบใดดี ทั้งนี้อาจเพราะมีข้อจำกัดทางด้านการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ สถิติ และความน่าจะเป็น ดังนั้นจึงเป็นแรงจูงใจให้ผู้วิจัยศึกษาถึงวิธีการใช้เลือกตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานพัฒนาซอฟต์แวร์ โดยตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่จะนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำ ในงานวิจัยฉบับนี้มีทั้งสิ้น 5 ตัวแบบ คือ ตัวแบบ Geometric [1,2] ตัวแบบ Jelinski-Moranda [3] ตัวแบบ Littlewood-Verrall [4,5,6] ตัวแบบ Musa's Basic [7] ตัวแบบ Musa-Okumoto [16,18]

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อการเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์โดยการวิเคราะห์ของตัวแบบด้วยตัวสถิติ KS (Kolmogorov-Smirnov Distance Statistic) ซึ่งหาจาก U-Plot [9] และแนวโน้มของ PLR-Plot [10]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ 5 ตัวแบบ

1.2.1.1 ตัวแบบ Jelinski-Moranda

1.2.1.2 ตัวแบบ Geometric

1.2.1.3 ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic Form)

1.2.1.4 ตัวแบบ Musa's Basic

1.2.1.5 ตัวแบบ Musa-Okumoto

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของค่าประมาณความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ จาก 5 ตัวแบบ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่คำนวณจากระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดที่พบระหว่างการทดสอบ ตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความแม่นยำสำหรับการพยากรณ์ค่าประมาณความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์มากที่สุด

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลจริง 10 ชุดข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลของการพัฒนาซอฟต์แวร์ ในขั้นตอนการทดสอบซอฟต์แวร์ (Software Testing Phase) จากเว็บไซต์ <http://www.dacs.dtic.mil> ซึ่งเป็นเว็บไซต์ขององค์กร DACS (Department of Defense Information Analysis Center) เป็นองค์กรที่ทำวิจัยด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์ และข้อมูลได้บางส่วนเป็นฐานข้อมูลเดียวกันกับ Lyu [13] และ Musa [16]

1.4.2 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่นำมาศึกษามี 5 ตัวแบบคือ

1.4.1.1 ตัวแบบ Jelinski-Moranda

$$R(t) = \exp(-(N-i+1)\Phi t) \quad , 0 < t < \infty \quad (1-1)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์

Φ เป็นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

1.4.1.2 ตัวแบบ Geometric

$$R(t) = \exp(-Dk^{i-1}t) \quad , 0 < t < \infty \quad (1-2)$$

เมื่อ D เป็นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

k สัดส่วนคงที่

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

1.4.1.3 ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic from)

$$R(t) = \left(\frac{\beta_0 + \beta_1 i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t} \right)^\alpha \quad , 0 < t < \infty \quad (1-3)$$

เมื่อ β_0, β_1 เป็น scale parameter

α เป็น shape parameter

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

1.4.1.4 ตัวแบบ Musa's Basic

$$R(t) = \exp(-[\beta_0 \exp(-\beta_1 x_{i-1})][1 - \exp(-\beta_1 t)]) \quad , 0 < t < \infty \quad (1-4)$$

เมื่อ β_0 เป็นค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลาท้ายสุดที่ทดสอบ

และ β_1 เป็นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

1.4.1.5 ตัวแบบ Musa-Okumoto

$$R(t) = \left(\frac{\beta_1 x_{i-1} + 1}{\beta_1 x_i + 1} \right)^{\beta_0} \quad , 0 < t < \infty \quad (1-5)$$

เมื่อ β_0 เป็นค่าคาดหวังของจำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลาท้ายสุดที่ทดสอบ

β_1 เป็นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

1.4.2 การประมาณค่าความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์ โดยอาศัยฟังก์ชันการแจกแจงและฟังก์ชันความน่าจะเป็น โดยนำข้อมูลในครั้งแรกของแต่ละชุดข้อมูลมาตัวประมาณค่าของพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihoods Estimation : MLE) สมมติว่ามีจำนวนข้อมูลครั้งแรกเป็น $i-1$ ค่า จากนั้นแทนค่า t_i เข้าไปในฟังก์ชันความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงซึ่งมีตัวประมาณค่าแบบ MLE จากข้อมูลที่ 1 ถึง $i-1$ จะได้ค่าประมาณ $\hat{F}_i(t)$ และ $\hat{f}_i(t)$ จากนั้นเพิ่มข้อมูล t_i เข้าไปเพื่อรวมกับข้อมูลในครั้งแรกเพื่อหา MLE อีกครั้งสำหรับประมาณค่า $\hat{F}_{i+1}(t)$ และ $\hat{f}_{i+1}(t)$ และเพิ่มข้อมูลตัวถัดไปเรื่อย ๆ ทีละค่า ซึ่งเราจะได้ลำดับของค่าประมาณของฟังก์ชันความน่าจะเป็นและฟังก์ชันการแจกแจงของการเกิดข้อผิดพลาด $\hat{f}_i(t), \hat{f}_{i+1}(t), \hat{f}_{i+2}(t), \dots, \hat{f}_n(t)$ และ $\hat{F}_i(t), \hat{F}_{i+1}(t), \hat{F}_{i+2}(t), \dots, \hat{F}_n(t)$ ซึ่งจะนำไปใช้ในกระบวนการทางสถิติเพื่อการเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของแต่ละตัวแบบ

1.5 เกณฑ์ที่ใช้เพื่อการเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าของตัวแบบ

การเปรียบเทียบความแม่นยำของการประมาณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละตัวแบบ จะใช้ 2 วิธี

1.5.1 ตัวสถิติ Kolmogorov – Smirnov ซึ่งจะหาจากการสร้างกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นด้วยวิธี U-Plot โดยจะใช้ทดสอบสมมติฐานหลักว่า การแจกแจงของ U เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอบนช่วง $[0,1]$ และสมมติฐานรองว่า การแจกแจงของ U ไม่เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอบนช่วง $[0,1]$

1.5.2 แนวโน้มของ PLR-Plot (The Prequential Likelihood Ratio for Detecting Noise and Bias) โดยวิธีนี้จะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างสองตัวแบบ โดยจะทำการทดสอบทุกคู่ที่เป็นไปได้ทั้งหมด

1.6 คำจำกัดความ

1.6.1 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability) คือ ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้โดยปราศจากข้อผิดพลาดภายในเวลาและสภาพแวดล้อมที่กำหนด

1.6.2 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Model) คือฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ซึ่งใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์จะไม่เกิดข้อผิดพลาดในช่วงเวลาที่กำหนด

1.6.3 ข้อผิดพลาด (Failure) เกิดขึ้นเมื่อซอฟต์แวร์ทำงานไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ หรือหยุดทำงาน

1.6.4 จุดบกพร่อง (Fault) คือสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น ซึ่งจุดบกพร่องหนึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้มากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งเมื่อข้อผิดพลาดเกิดขึ้นนักพัฒนาซอฟต์แวร์จะค้นหาจุดบกพร่องทำการแก้ไข

1.6.5 ความแม่นยำ (Accuracy) คือ ความสามารถเข้าใกล้ค่าจริง (True Value) ของผลการวัด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เป็นแนวทางพัฒนาซอฟต์แวร์ โดยวิธีการนำตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อจะได้ซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพ

1.7.2 เป็นแนวทางในการศึกษาความสามารถในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ ของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์อื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีความเชื่อถือได้ (Reliability Theory)

ความเชื่อถือได้ (Reliability) นั้น ในตำราบางเล่มอาจใช้คำว่า ความเชื่อมั่นหรือความไว้วางใจ สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะใช้คำว่า “ความเชื่อถือได้” ซึ่งเป็นความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะสามารถทำงานได้อย่างปกติภายใต้ระยะเวลาและเงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตาม การที่ผลิตภัณฑ์มีความเชื่อถือได้สูงก็ยังไม่เพียงพอต่อความมั่นคงโดยรวมของระบบ ต้องอาศัยความร่วมมือในการบำรุงรักษาที่ดี ความบกพร่องในระบบโดยทั่วไปมีสาเหตุหลัก 3 ประการ ดังต่อไปนี้คือ 1) ส่วนประกอบย่อยของระบบที่บกพร่อง 2) ความบกพร่องของซอฟต์แวร์ และ 3) ความผิดพลาดของผู้ใช้งาน [8]

2.1.1 ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

ความเชื่อถือได้ คือความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะสามารถทำงานได้อย่างปกติ ภายใต้ระยะเวลาและเงื่อนไขที่กำหนด [11]

ถ้าให้ T เป็นตัวแปรสุ่มของเวลาที่ผลิตภัณฑ์เกิดข้อผิดพลาด

$f(t)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นหรือฟังก์ชันของการเกิดข้อผิดพลาด ณ เวลา t

$F(t)$ คือความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์เกิดข้อผิดพลาดระหว่างเวลา t หรือฟังก์ชันความน่าจะเป็นสะสมของเวลาที่ผลิตภัณฑ์เกิดข้อผิดพลาด ดังนั้น

$$\begin{aligned} F(t) &= P\{T < t\} \\ &= \int_0^t f(x)dx \end{aligned} \quad (2-1)$$

$R(t)$ เป็นความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะสามารถทำงานได้อย่างเป็นปกติหลังจากเวลา t หรือฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ดังนั้น

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{T \geq t\} \\ &= 1 - P\{T < t\} \\ &= 1 - F(t) \\ &= 1 - \int_0^t f(x)dx \end{aligned}$$

$$= \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (2-2)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันของการเกิดข้อผิดพลาดขณะเวลา t

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \\ = \frac{d}{dt} F(t) \quad (2-3)$$

$$= \frac{d}{dt} (1 - R(t)) \\ = -\frac{d}{dt} R(t) \quad (2-4)$$

2.1.2 อายุการใช้งานเฉลี่ย (Mean Time to Failure : MTTF)

เนื่องจากเมื่อทำการคำนวณหาความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์นั้นจะพบว่าค่าที่ได้จะไม่แน่นอนเนื่องจากธรรมชาติของความเชื่อถือได้ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น ในการอธิบายให้ผู้ใช้งานเข้าใจก็มักจะอ้างอิงถึงระยะเวลาเฉลี่ยหรือค่าเฉลี่ยเวลาของความล้มเหลว (MTTF) และ ระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างความล้มเหลว (MTBF) ซึ่งจะใช้ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์ที่เสียนั้นได้มีการซ่อมและนำมาใช้ใหม่ อายุการใช้งานเฉลี่ยหรือเวลาเฉลี่ยที่ผลิตภัณฑ์เกิดข้อผิดพลาดนั่นเอง นิยามโดยค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่ม T นั่นคือ

$$MTTF = E\{T\} \\ = \int_0^{\infty} t f(t) dx \\ = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2-5)$$

โดยปกติคำศัพท์ที่นิยมใช้เกี่ยวข้องกับความเชื่อถือได้ของระบบก็คือเวลาเฉลี่ยระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Mean Time Between Failure: MTBF) ของผลิตภัณฑ์ซึ่งใช้ในกรณีที่มีการซ่อมแซมและใช้งานต่อได้เมื่อซ่อมเสร็จ นอกจากนั้นยังมีเวลาเฉลี่ยของการเกิดข้อผิดพลาด (Mean Time to Failure: MTTF) ของผลิตภัณฑ์ในกรณีที่ไม่มีอาการซ่อม และ เวลาเฉลี่ยระหว่างการซ่อม (Mean Time to Repair: MTTR) สำหรับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มีการซ่อมและเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแต่ละครั้งจะเป็นเท่าใดนั้น ก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการซ่อมบำรุงที่กำหนด เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาเฉลี่ยต่าง ๆ ข้างต้น ดังในสมการ (2-6)

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2-6)$$

จากสมการที่ (2-6) แสดงให้เห็นว่า หากผลิตภัณฑ์ไม่มีการซ่อม เวลาเฉลี่ยระหว่างการซ่อม (MTTR) จะเท่ากับศูนย์ นั่นคือ เวลาเฉลี่ยระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (MTBF) เท่ากับเวลา

เฉลี่ยของการเกิดข้อผิดพลาด (MTTF) นั่นเอง ในกรณีเช่นนี้ เราจะใช้ค่า MTTF แทนค่าใน MTBF อย่างไรก็ตาม เวลาเฉลี่ยระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (MTBF) จะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการเกิดข้อผิดพลาดหรืออัตราการเสียของผลิตภัณฑ์ (Failure Rate) [13]

2.1.3 อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate)

อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate) คือความน่าจะเป็นที่จะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นในช่วงเวลา $[t_1, t_2]$ โดยที่ก่อนหน้าเวลา t_1 ไม่พบความผิดพลาดใด ๆ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{P\{t_1 \leq T \leq t_2 \mid T > t_1\}}{t_2 - t_1} &= \frac{P\{t_1 \leq T \leq t_2\}}{P\{T > t_1\}(t_2 - t_1)} \\ &= \frac{F(t_2) - F(t_1)}{R(t_1)(t_2 - t_1)} \end{aligned} \quad (2-7)$$

2.1.4 อัตราเสี่ยง (Hazard Rate)

อัตราเสี่ยง (Hazard Rate) หรือ $h(t)$ คืออัตราการเกิดข้อผิดพลาดขณะเวลาใดเวลาหนึ่ง ถ้าให้ $t_1 = t$ และ $t_2 = t_1 + \Delta t$ ดังนั้น

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{t_2 - t_1 \rightarrow 0} \frac{F(t_2) - F(t_1)}{R(t_1)(t_2 - t_1)} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)\Delta t} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} F(t) \\ &= \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} [1 - R(t)] \\ &= -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} R(t) \\ &= \frac{d}{dt} [-\ln R(t)] \end{aligned} \quad (2-9)$$

2.1.5 ความสัมพันธ์ของ $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ และ $h(t)$

จากสมการ 2-8

$$\frac{d}{dt} [-\ln R(t)] = h(t)$$

หรือ

$$d \ln R(t) = -h(t)dt$$

เมื่อทำการอินทิเกรต (Integrated) ทั้ง 2 ด้านของสมการข้างบนจะได้

$$\ln R(t) = -\int_0^t h(x)dx$$

ดังนั้น
$$R(t) = e^{-\int_0^t h(x) dx} \quad (2-10)$$

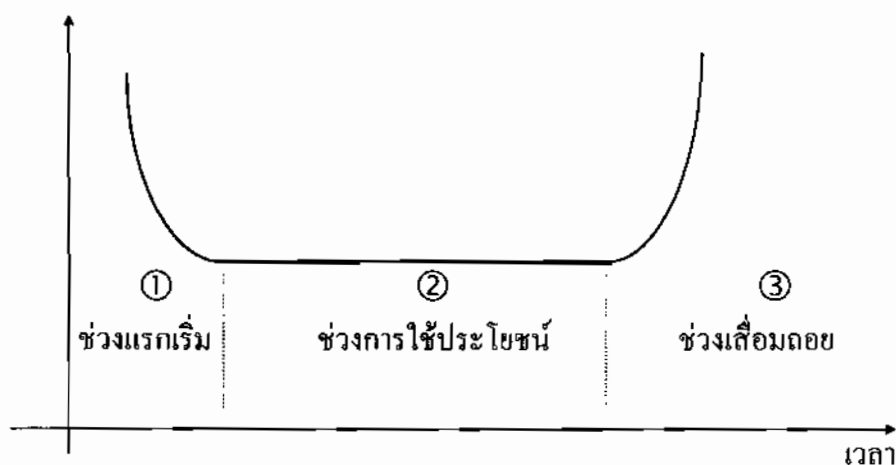
ตารางที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ และ $h(t)$

form \ to	$f(t)$	$F(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$f(t)$	$f(t)$	$\frac{d}{dt} F(t)$	$-\frac{d}{dt} R(t)$	$h(t)R(t)$
$F(t)$	$\int_0^t f(x) dx$	$F(t)$	$1 - R(t)$	$1 - e^{-\int_0^t h(x) dx}$
$R(t)$	$\int_t^\infty f(x) dx$	$1 - F(t)$	$R(t)$	$e^{-\int_0^t h(x) dx}$
$h(t)$	$\frac{f(t)}{R(t)}$	$\frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{d}{dt} F(t)$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt} R(t)$	$h(t)$

2.1.6 ความเชื่อถือได้ในผลิตภัณฑ์

พิจารณาธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ ต่าง ๆ วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ จะคล้ายกับกราฟรูปอ่างอาบน้ำ(Bathtub Curve) [11] ดังในภาพที่ 2-1 โดยสามารถอธิบายธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ทั่วไปใน 3 ช่วงเวลา ดังนี้

อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate)



ภาพที่ 2-1 แสดงอัตราการล้มเหลวเทียบกับเวลา

ก) ช่วงเวลาแรกเริ่ม (Early Life) ในช่วงเวลาที่ 1 หมายถึงว่าเมื่อผลิตภัณฑ์ได้ผลิตออกมาจากโรงงาน ณ จุดนี้ อัตราการล้มเหลวหรือผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องนั้นจะมีอยู่มาก ด้วยเหตุนี้ในบางครั้ง เราจึงเรียกช่วงเริ่มแรกนี้ว่า ช่วงเบิร์นอิน (Burn In) ข้อพิจารณาของทางผู้ผลิตก็จะต้องเข้มงวด และ ทำการตรวจสอบหาผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องมาแก้ไขก่อนที่จะทำการส่งมอบหรือขายให้ผู้ใช้ทั่วไป หากจะอธิบายในเชิงสถิติแล้วจะพบว่าการกระจายของการเกิดข้อผิดพลาดในช่วงเวลานี้จะให้การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

ข) ช่วงเวลาการใช้งาน (Useful Life) ในช่วงที่ 2 เราเรียกว่า ช่วงการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ได้ดี หมายถึงว่า หลังจากที่มีการตรวจสอบและแก้ไขผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องในช่วงแรกเริ่มแล้วจึงได้ผลิตภัณฑ์ที่บกพร่องน้อยหรืออาจจะไม่เกิดข้อผิดพลาดได้เลย ด้วยเหตุนี้เราจึงถือว่า อัตราการล้มเหลวของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคงที่ และการกระจายของการเกิดข้อผิดพลาดจึงมีลักษณะเกิดขึ้นโดยสุ่ม และสามารถอธิบายการกระจายดังกล่าวในรูปของความน่าจะเป็นได้ว่าเป็นการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution)

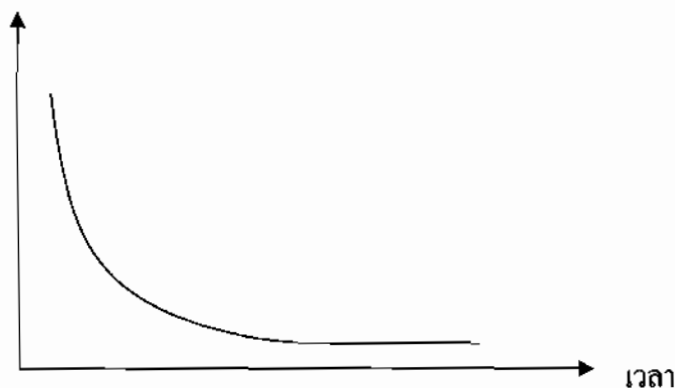
ค) ช่วงเสื่อมถอย (Wear - Out) ในช่วงเวลาที่ 3 เราจะพบว่าเป็นธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีอายุการใช้งานเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการเสื่อมถอยและ อัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะเพิ่มมากขึ้น การอธิบายลักษณะการกระจายของการเกิดข้อผิดพลาดในช่วงเวลานี้ในทางสถิติจะใช้การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution)

2.2 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability)

ในการผลิตซอฟต์แวร์นั้นจะมีขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมากคือการทดสอบซอฟต์แวร์ว่าสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่ ซึ่งเมื่อพบว่าซอฟต์แวร์เกิดข้อผิดพลาด ก็จะทำการแก้ไขจุดบกพร่องนั้นเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดที่มาจากจุดบกพร่องนั้นขึ้นมาอีก ซึ่งทำให้ได้ซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และทดสอบซอฟต์แวร์ต่อไป ซึ่งก็จะเกิดข้อผิดพลาดครั้งใหม่ และแก้ไขจุดบกพร่องซึ่งเป็นจุดบกพร่องตัวใหม่ ทำการทดสอบเช่นนี้จนแน่ใจว่าซอฟต์แวร์น่าจะปราศจากจุดบกพร่องซึ่งเราสามารถประมาณเวลาได้ โดยอาศัยตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์จะพบว่าในเมื่อระยะเวลาผ่านไปมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดข้อผิดพลาดก็ยิ่งลดลง ซึ่งตรงข้ามกับอัตราการเกิดข้อผิดพลาดของฮาร์ดแวร์ หรือ ผลิตภัณฑ์ทั่ว ๆ ไป ที่อัตราการเกิดข้อผิดพลาดจะยิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นไปตามภาพที่ 2-1

อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate)



ภาพที่ 2-2 อัตราการเกิดข้อผิดพลาดตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

จากภาพที่ 2-2 อัตราการเกิดข้อผิดพลาดของซอฟต์แวร์จะลดลง เป็นผลให้ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

2.2.1 นิยามของความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

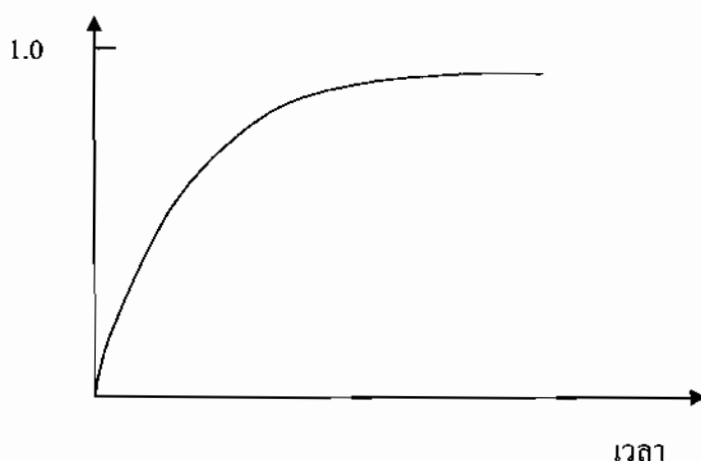
2.2.1.1 จุดบกพร่องหรือบั๊ก (Fault or Bug) คือ สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น ซึ่งจุดบกพร่องหนึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้มากกว่า 1 ครั้ง ซึ่งเมื่อข้อผิดพลาดเกิดขึ้นนักพัฒนาซอฟต์แวร์จะค้นหาจุดบกพร่องทำการแก้ไข

2.2.1.2 ข้อผิดพลาด (Failure) คือ เหตุการณ์ ที่ซอฟต์แวร์ไม่สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากจุดบกพร่อง

2.2.1.3 อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (Failure Rate) คือ อัตราส่วนของจำนวนข้อผิดพลาดต่อหนึ่งหน่วยเวลา แต่ถ้าคิดที่ช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งจะเรียกว่าอัตราเสี่ยง ใช้สัญลักษณ์ $z_i(t)$

2.2.1.4 ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability) คือ ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้โดยปราศจากข้อผิดพลาดภายใต้เวลาและสภาพแวดล้อมที่กำหนด [18] โดยฟังก์ชันความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์จะใช้สัญลักษณ์ $R_i(t)$ และเป็นฟังก์ชันความเชื่อถือได้จะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ดังภาพที่ 2-3

ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์



ภาพที่ 2-3 โฉงความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์

2.2.1.5 ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Time between Failure) คือ ระยะเวลาที่เริ่มนับจากระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ $i-1$ ถึงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

2.2.1.6 เวลาของการเกิดข้อผิดพลาดสะสม (Time to Failure) คือ ระยะเวลาที่เริ่มนับจากเวลาเริ่มต้นทดสอบซอฟต์แวร์จนถึงเวลาที่เกิดข้อผิดพลาด

2.2.1.7 ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดครั้งต่อไป (Mean Time To Next Failure) คือค่าคาดหวังของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดครั้งต่อไป

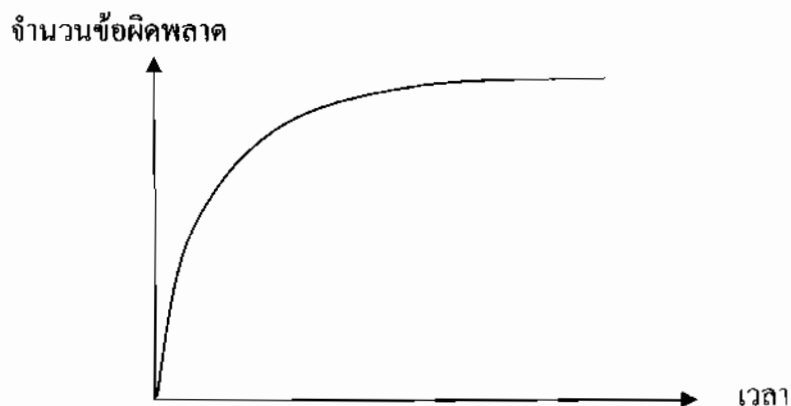
2.3 ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Growth Model)

ตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของการผลิตและการพัฒนาซอฟต์แวร์ ความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ถูกนำมาศึกษาครั้งแรกโดยการแนะนำของ Hudson [14] เขากล่าวว่าการพัฒนาซอฟต์แวร์เป็นกระบวนการเกิดและตาย (A Birth and Death Process) นั่นคือการพบจุดบกพร่องเป็นกระบวนการเกิด และการแก้ไขจุดบกพร่องเป็นกระบวนการตาย จากนั้นในปี ค.ศ. 1972 มีผลงานของ Jelinski และ Modanda [3] ซึ่งได้เสนองานวิจัยที่ใช้ตัวแบบความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์และถือว่าเป็นตัวแบบ ซึ่งเป็นที่รู้จักดีตัวแบบแรก และต่อมาในปี 1975 มีผลงานของ Musa [7] ปี 1979 มีผลงานของ Goel และ Okumoto [15] เป็นต้น และมีการพัฒนาตัวแบบต่าง ๆ มากมายจนถึงปัจจุบัน ซึ่งท่านเหล่านี้ได้เสนอตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์โดยใช้ชื่อตัวแบบเป็นชื่อของเขาเองซึ่งต่างก็เป็นที่รู้จักกันดี และเริ่มนำมาใช้ในวงการพัฒนาซอฟต์แวร์

ตัวแบบความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์ (Software Reliability Model) คือฟังก์ชันความเชื่อถือได้ซึ่งใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นที่ซอฟต์แวร์จะไม่เกิดข้อผิดพลาดในช่วงเวลาที่กำหนด [18] เราสามารถใช้ตัวแบบเหล่านี้เพื่อพยากรณ์เวลาที่จะพบข้อผิดพลาดครั้งต่อไปได้ และยังสามารถพยากรณ์จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้น หรือพยากรณ์จำนวนข้อผิดพลาด ณ เวลาหนึ่ง ๆ ที่เราสนใจ รวมถึงพยากรณ์ระยะเวลาที่จำเป็นต้องใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์หนึ่ง ๆ ด้วย

2.3.1 โค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์

เนื่องจากในระยะเริ่มแรกของการทดสอบซอฟต์แวร์นั้น มีจำนวนจุดบกพร่องอยู่จำนวนมาก ดังนั้นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดหรือโอกาสที่จะพบข้อผิดพลาดย่อมมีสูงในช่วงเวลานี้ และจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากจำนวนจุดบกพร่องได้รับการแก้ไขให้น้อยลง ซึ่งยากที่จะมีปัจจัยหรือเงื่อนไขไปพบจุดบกพร่องให้แสดงข้อผิดพลาดออกมา ดังนั้นโค้งการเจริญเติบโตของความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์ จะมีลักษณะดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 โค้งความสัมพันธ์ของจำนวนข้อผิดพลาดสะสมกับเวลา

2.3.2 ลักษณะข้อมูลที่น่าสนใจในการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

2.3.2.1 เวลาของการเกิดข้อผิดพลาด (Time Between Failure) จะบันทึกเวลาระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง ดังตารางที่ 2-2 ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะวิเคราะห์ความเชื่อถือได้โดยใช้ลักษณะข้อมูลชนิดนี้

ตารางที่ 2-2 ลักษณะการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในรูปแบบของเวลาของการเกิดข้อผิดพลาด

การเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i	ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิด ข้อผิดพลาด (t_i)	ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิด ข้อผิดพลาดสะสม (x_i)
1	t_1	$x_1 = t_1$
2	t_2	$x_2 = t_1 + t_2$
3	t_3	$x_3 = t_1 + t_2 + t_3$
M	M	M
I	t_i	$x_i = t_1 + t_2 + L + t_i$

ตัวแบบที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ชนิดนี้ ได้แก่ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Jalinski-Moranda ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic ตัวแบบ Musa-Okumoto เป็นต้น

2.3.2.2 จำนวนการเกิดข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา เป็นการบันทึกข้อมูลโดยกำหนดช่วงเวลาไว้เช่นช่วงเวลาละ 1 วัน หรือ 1 สัปดาห์ แล้วบันทึกจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ลักษณะการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ในรูปแบบของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาด

ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด ช่วงเวลาที่ i	จำนวนการเกิดข้อผิดพลาด (n_i)	จำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสม (N_i)
1	n_1	$N_1 = n_1$
2	n_2	$N_2 = n_1 + n_2$
3	n_3	$N_3 = n_1 + n_2 + n_3$
M	M	M
I	n_i	$N_i = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$

ตัวแบบที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ชนิดนี้ เช่นตัวแบบ Goel-Okumoto [15] ตัวแบบ Yanada [19,20] และตัวแบบ ohba [20] เป็นต้น

2.3.3 ประเภทของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

2.3.3.1 การแบ่งประเภทตามลักษณะของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมด

ก) จำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดมีจำนวนจำกัด กล่าวคือ ถ้าให้ $N(t)$ เป็นจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป t หน่วย จะได้ว่า $\lim_{t \rightarrow \infty} E[N(t)] < \infty$ นั่นคือ ค่าคาดหวังของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดมีจำนวนจำกัด (Finite)

ข) จำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดมีจำนวนไม่จำกัด กล่าวคือ ถ้าให้ $N(t)$ เป็นจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป t หน่วย จะได้ว่า $\lim_{t \rightarrow \infty} E[N(t)] = \infty$ นั่นคือ ค่าคาดหวังของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดทั้งหมดมีจำนวนไม่จำกัด (Infinite)

2.3.3.2 การแบ่งประเภทตามลักษณะตามโครงสร้างดังนี้

ก) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Time Domain) มี 2 แบบคือ อยู่ในรูปของวันที่ เดือน ปี เป็นต้น และเวลาที่ซอฟต์แวร์ใช้ในการทดสอบซอฟต์แวร์

ข) จำนวนของข้อผิดพลาด (Category) คือจำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมด ว่าเป็นแบบจำกัด (Finite)หรือไม่จำกัด (Infinite)

ค) ประเภทของการเกิดข้อผิดพลาด (Type) เป็นการแจกแจงของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดที่เวลา t มี 2 ประเภทที่น่าสนใจ คือการแจกแจงแบบทวินาม (Binomial Distribution) และปัวซอง (Poisson Distribution)

ง) ชั้นของการเกิดข้อผิดพลาด (Class) ถ้าจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดเป็นแบบจำกัดแล้วฟังก์ชันของเกิดข้อผิดพลาดจะอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา

จ) วงศ์ของข้อผิดพลาด (Family) ถ้าจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดเป็นแบบไม่จำกัดแล้วฟังก์ชันของเกิดข้อผิดพลาดจะอยู่ในรูปของค่าคาดหวังของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาด

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักพัฒนาซอฟต์แวร์หลายท่านที่ทำงานวิจัยการเพื่อค้นหาตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์และตัวแบบแรกๆที่รู้จักกันเป็นอย่างดีคือตัวแบบ นอกจากนี้ยังมี Musa [7] ,Okumoto [16] Littlewood [4] เป็นต้น

2.4.1 ตัวแบบ Jelinski-Moranda (JM Model)

Jelinski และ Moranda [3] ได้เสนอตัวแบบไว้ในงานวิจัยเมื่อ ค.ศ. 1972 ถือว่าเป็นตัวแบบแรกที่น่าสนใจ

2.4.1.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนจำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (T_i) มีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)
- จ) อัตราเสี่ยงเป็นสัดส่วนกับจำนวนจุดบกพร่องที่เหลือ โดยจะลดลงด้วยค่าคงที่ Φ เท่ากันทุก ๆ ข้อผิดพลาด

2.4.1.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Jelinski-Moranda

- ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = (N - i + 1)\Phi \exp(-(N - i + 1)\Phi t) \quad (2-11)$$

- ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \exp(-(N - i + 1)\Phi t) \quad (2-12)$$

ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \exp\{-(N-i+1)\Phi t\} \quad (2-13)$$

ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = (N-i+1)\Phi \quad (2-14)$$

จ) ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Mean Value Function)

$$\mu(x) = N[1 - \exp(-\Phi x)] \quad (2-15)$$

ฉ) ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Failure Intensity Function)

$$\lambda(x) = N\Phi \exp(-\Phi x) \quad (2-16)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์

Φ เป็นอัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่

Jelinski และ Moranda ได้นำตัวแบบนี้มาวิเคราะห์หาค่าประมาณของจำนวนข้อผิดพลาดที่ยังเหลืออยู่ในซอฟต์แวร์ วิเคราะห์หาเวลาการเกิดข้อผิดพลาดครั้งต่อไป (Next Time to Failure) และประมาณอัตราการเกิดข้อผิดพลาด

2.4.1.3 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด

(Maximum Likelihood Estimation : MLE)

ก) MLE ของ Φ

$$\hat{\Phi} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (\hat{N} - i + 1) T_i} \quad (2-17)$$

ข) สมการที่ใช้หา MLE ของ N

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{N} - i + 1} = \frac{n \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n (\hat{N} - i + 1) T_i} \quad (2-18)$$

2.4.2 ตัวแบบ Littlewood (L Model)

Littlewood [21] ได้เสนอตัวแบบนี้ไว้เมื่อ ค.ศ. 1980

2.4.2.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนไม่จำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดมีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)
- จ) การแจกแจงเบื้องต้นของอัตราเสี่ยงมีการแจกแบบแกมมา พารามิเตอร์ α, β

2.4.2.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Littlewood

- ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability density Function)

$$f(t) = (N - i + 1)\alpha(\beta + x_{i-1})^{(N-i+1)\alpha} \quad (2-19)$$

- ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \left(\frac{\beta + x_{i-1}}{\beta + x_{i-1} + t} \right)^{(N-i+1)\alpha} \quad (2-20)$$

- ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \left(\frac{\beta + x_{i-1}}{\beta + x_{i-1} + t} \right)^{(N-i+1)\alpha} \quad (2-21)$$

- ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = \frac{(N - i + 1)\alpha}{\beta + x_{i-1} + t} \quad (2-22)$$

2.4.2.3 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum

Likelihood Estimation : MLE) จะใช้สมการที่หา MLE ของ α N และ β

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta} + X_i) + (\hat{N} - n) \ln(\hat{\beta} + X_1) - \hat{N} \ln \hat{\beta}} \quad (2-23)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{N}-i+1} = \hat{\alpha} \ln \left(1 + \frac{X_n}{\hat{\beta}} \right) \quad (2-24)$$

$$\frac{\hat{N}\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} = (\hat{\alpha}+1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta} + X_i} + \frac{(\hat{N}-n)\hat{\alpha}}{\hat{\beta} + X_n} \quad (2-25)$$

2.4.3 ตัวแบบ Littlewood-Verrall (LV Model)

Littlewood และ Verrall [4] ได้เสนอตัวแบบนี้ไว้เมื่อ ค.ศ. 1973

2.4.3.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนไม่จำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดมีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)
- จ) การแจกแจงเบื้องต้นของอัตราเสี่ยงมีการแจกแบบแกมมา พารามิเตอร์ α , $\Psi(i, \beta) = \beta_0 + \beta_1 i'$

2.4.3.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ LV

- ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = \frac{\alpha(\beta_0 + \beta_1 i')^\alpha}{(\beta_0 + \beta_1 i' + t)^{\alpha+1}} \quad (2-26)$$

- ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \left(\frac{\beta_0 + \beta_1 i'}{\beta_0 + \beta_1 i' + t} \right)^\alpha \quad (2-27)$$

- ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \left(\frac{\beta_0 + \beta_1 i'}{\beta_0 + \beta_1 i' + t} \right)^\alpha \quad (2-28)$$

- ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = \frac{\alpha}{t + \beta_0 + \beta_1 i'} \quad (2-29)$$

- จ) ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Failure Intensity Function)

$$\lambda_{\text{linear}}(x) = \frac{\alpha - 1}{\sqrt{\beta_0^2 + 2\beta_1 x(\alpha - 1)}} \quad (2-30)$$

และ

$$\lambda_{\text{quadratic}}(x) = \frac{v_1}{\sqrt{x^2 + v_2}} \left[\left(x + \sqrt{x^2 + v_2} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(x - \sqrt{x^2 + v_2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2-31)$$

$$\text{เมื่อ } v_1 = \left(\frac{\alpha - 1}{18\beta_1} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ และ } v_2 = \frac{4\beta_0^3}{9(\alpha - 1)^2\beta_1}$$

เมื่อ $i' = i$ สำหรับรูปแบบเชิงเส้น และ $i' = i^2$ สำหรับรูปแบบ Quadratic
(i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ใด ๆ)

2.4.3.3 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด

(Maximum Likelihood Estimation : MLE)

โดยมีสมการที่ใช้หา MLE ของ α , β_0 และ β_1

$$\frac{n}{\hat{\alpha}} + \sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i') = \sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i' + T_i) \quad (2-32)$$

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i'} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i' + T_i} \quad (2-33)$$

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{i'}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i'} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i'}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i' + T_i} \quad (2-34)$$

2.4.4 ตัวแบบ Keiller-Littlewood (KL Model)

ตัวแบบ KL เสนอโดย Keiller และ Littlewood [22] ในปี ค.ศ. 1983 มีความคล้ายกับตัวแบบ LV มาก

2.4.4.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนไม่จำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดมีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)
- จ) การแจกแจงเบื้องต้นของอัตราเสี่ยงมีการแจกแบบเกมมา

$$\text{พารามิเตอร์ } \beta, \Psi(i, \alpha) = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1 i}$$

2.4.4.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ KL

- ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = \frac{\Psi(i, \alpha)}{\beta} \left(\frac{\beta}{\beta + t} \right)^{\Psi(i, \alpha) + 1} \quad (2-35)$$

- ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \left(\frac{\beta}{\beta + t} \right)^{\Psi(i, \alpha)} \quad (2-36)$$

- ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \left(\frac{\beta}{\beta + t} \right)^{\Psi(i, \alpha)} \quad (2-37)$$

- ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = \frac{\beta}{\Psi(i, \alpha) - 1} \quad (2-38)$$

2.4.4.3 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด

(Maximum Likelihood Estimation : MLE) ซึ่ง Likelihood Function และ Log Likelihood สำหรับหา MLE ของ β , α_0 และ α_1 คือ

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{\Psi(i, \alpha) \beta^{\Psi(i, \alpha)}}{(\beta + t_i)^{\Psi(i, \alpha) + i}} \quad (2-39)$$

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^n \ln \Psi(i, \alpha) + \ln \beta \sum_{i=1}^n \Psi(i, \alpha) \\ &\quad - \sum_{i=1}^n [\Psi(i, \alpha) + i] \ln(\beta + t_i) \end{aligned} \quad (2-40)$$

2.4.5 ตัวแบบ Geometric ของ Jelinski และ Moranda [1] [2] (Geometric-JM Model)

เป็นตัวแบบที่พัฒนามาจากตัวแบบ JM เสนอโดย Moranda

2.4.5.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนไม่จำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดมีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)
- จ) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยงเป็นการแจกแบบเรขาคณิต $z_i(t) = Dk^{i-1}$

2.4.5.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Geometric

- ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = Dk^{i-1} \exp(-Dk^{i-1}t) \quad (2-41)$$

- ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \exp(-Dk^{i-1}t) \quad (2-42)$$

- ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \exp(-Dk^{i-1}t) \quad (2-43)$$

ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = Dk^{t-1} \quad (2-44)$$

จ) ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Mean Value Function)

$$\mu(x) = \frac{1}{\beta} \ln([D\beta \exp(\beta)]x + 1) \quad (2-45)$$

ฉ) ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ
(Failure Intensity Function)

$$\lambda(x) = \frac{D \exp(\beta)}{[D\beta \exp(\beta)]x + 1} \quad (2-46)$$

เมื่อ $\beta = -\ln k$

2.4.5.3 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด

(Maximum Likelihood Estimation : MLE)

ก) MLE ของ D

$$\hat{D} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^{i-1} t_i} \quad (2-47)$$

ข) สมการที่ใช้หา MLE ของ k

$$\frac{\sum_{i=1}^n i \hat{k}^i t_i}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^i t_i} = \frac{n+1}{2} \quad (2-48)$$

โดยที่

D คือ อัตราการเกิดข้อผิดพลาดเริ่มต้น

k คือ ค่าคงที่ และ $0 < k < 1$

และ i คือการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i

2.4.6 ตัวแบบ Schick -Wolverton (SW Model)

ตัวแบบของ Schick-Wolverton [23] มีข้อสมมติคล้ายกับตัวแบบ JM นำเสนอโดย Schick และ Wolverton ในปี ค.ศ. 1978

2.4.6.1 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Schick-Wolverton

ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = (N - i + 1)\Phi t \exp\left[-(N - i + 1)\Phi \frac{t^2}{2}\right] \quad (2-49)$$

ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \exp\left[-(N - i + 1)\Phi \frac{t^2}{2}\right] \quad (2-45)$$

ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \exp\left[-(N - i + 1)\Phi \frac{t^2}{2}\right] \quad (2-51)$$

ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = (N - i + 1)\Phi t \quad (2-52)$$

โดยที่

N คือ จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมด

t_i คือ เวลาระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ $i-1$ ถึงครั้งที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, N$

i คือ ลำดับครั้งที่ของการเกิดข้อผิดพลาด

Φ คือ ค่าคงที่

2.4.7 ตัวแบบปัวซอง (Poisson Time-Related Model)

2.4.7.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

ก) ที่เวลาเริ่มต้นยังไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น นั่นคือ $N(0)=0$

ข) การเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i เป็นอิสระจากการเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ $i-1$

ค) ให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการเกิดข้อผิดพลาดมากกว่า 1 ครั้งในช่วงเวลาสั้น ๆ, dt มีค่าน้อย

ง) อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (The Rate of Occurrence of Failure : ROCOF) มีค่าเท่ากับ

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\Pr\{1 \text{ event in } (t, t+dt)\}}{dt} \quad (2-53)$$

อัตราการเกิดข้อผิดพลาดสามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการปัวซองสำหรับลักษณะข้อมูลที่ไม่มีความเป็นเอกพันธ์ (Non-homogenous Poisson Process : NHPP)

$$\Pr[N(t) = n] = \frac{[\mu(t)]^n e^{-\mu(t)}}{n!} \quad (2-54)$$

เมื่อ $\mu(t)$ เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดที่เวลา t และหาได้โดย

$$\mu(t) = \int_0^t \lambda(s) ds \quad (2-55)$$

ดังนั้นฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Mean Value Function) คือ

$$\mu(t) = a(1 - e^{-bt}) \quad (2-56)$$

และฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Failure Intensity Function) คือ

$$\lambda(t) = abe^{-bt} \quad (2-57)$$

เมื่อ

a เป็นจำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมด

b เป็นค่าคงที่

2.4.8 ตัวแบบ Goel-Okumoto (GO model)

เสนอโดย Goel และ Okumoto [15] ในปี 1979 โดยมีข้อสมมติเพิ่มเติมจากตัวแบบ JM ว่า ถ้าให้ N เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงตามกระบวนการ NHPP ดังนั้นจะมีฟังก์ชันอัตราการเกิดข้อผิดพลาด (ROCOF) และ ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ ดังนี้

ก) อัตราการเกิดข้อผิดพลาด (ROCOF)

$$\lambda(t) = \beta \Phi \exp(-\Phi t) \quad (2-58)$$

ข) ฟังก์ชันค่าเฉลี่ย

$$\mu(t) = \beta(1 - \exp(-\Phi t)) \quad (2-59)$$

ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้

$$R(t | x_{i-1}) = \exp\{-\beta \exp(-\Phi x_{i-1})(1 - \exp(-\Phi t))\} \quad (2-60)$$

ง) Likelihood Function

$$L = \exp[-\beta(1 - \exp(-\Phi x_n))] \prod_{i=1}^n \beta \Phi \exp(-\Phi x_i) \quad (2-61)$$

จ) ln ของ Likelihood Function

$$\ln L = n \ln \beta + n \ln \Phi - \Phi \sum_{i=1}^n x_i - \beta(1 - \exp(-\Phi x_n)) \quad (2-62)$$

ฉ) MLE สำหรับ β คือ

$$\hat{\beta} = \frac{n}{1 - \exp(-\Phi X_n)} \quad (2-63)$$

2.4.9 ตัวแบบ Musa'Basic Time (Musa'Basic model)

ตัวแบบ Musa'Basic Time เสนอโดย Musa [7] ใน ค.ศ. 1979

2.4.9.1 ข้อกำหนดเบื้องต้นต่าง ๆ

- ก) จำนวนข้อผิดพลาดทั้งหมดเป็นจำนวนจำกัด
- ข) เมื่อพบข้อผิดพลาดจะทำการแก้ไขจุดบกพร่องและถือว่าการแก้ไขนี้ไม่ทำให้เกิดจุดบกพร่องตัวใหม่
- ค) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง เป็นอิสระต่อกัน
- ง) ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (T_i) มีการแจกแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponentially Distributed)

2.4.9.2 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Musa'Basic

ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_1 x_i) \exp(-[\beta_0 \exp(-\beta_1 x_{i-1})][1 - \exp(-\beta_1 t)]) \quad (2-64)$$

ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \exp(-[\beta_0 \exp(-\beta_1 x_{i-1})][1 - \exp(-\beta_1 t)]) \quad (2-65)$$

ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \exp(-[\beta_0 \exp(-\beta_1 x_{i-1})][1 - \exp(-\beta_1 t)]) \quad (2-66)$$

ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_1 x_i) \exp(-\beta_1 t) \quad (2-67)$$

จ) ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Mean Value Function)

$$\mu(x) = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 x)] \quad (2-68)$$

ฉ) ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ

(Failure Intensity Function)

$$\lambda(x) = \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_1 x) \quad (2-69)$$

2.4.9.2 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการจะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) สมการที่ใช้หา MLE ของ β_0 และ β_1 คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{1 - \exp(-\hat{\beta}_1 X_n)} \quad (2-70)$$

และ

$$\frac{n}{\hat{\beta}_1} - \frac{n X_n}{\exp(\hat{\beta}_1 X_n) - 1} - \sum_{i=1}^n X_i = 0 \quad (2-71)$$

2.4.10 ตัวแบบ Musa-Okumoto (MO model)

ตัวแบบ Musa-Okumoto เสนอโดย Musa และ Okumoto [16] ใน ค.ศ. 1984 โดยมีข้อสมมติว่าให้ N เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจง Logarithmic Poisson ซึ่งเป็นไปตามกระบวนการ NHPP

2.4.10.1 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวแบบ Musa-Okumoto

ก) ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (Probability Density Function)

$$f(t) = \frac{\beta_0 \beta_1}{\beta_1 x_i + 1} \left(\frac{\beta_1 x_{i-1} + 1}{\beta_1 x_i + 1} \right)^{\beta_0} \quad (2-72)$$

ข) ฟังก์ชันการแจกแจง (Distribution Function)

$$F(t) = 1 - \left(\frac{\beta_1 x_{i-1} + 1}{\beta_1 x_i + 1} \right)^{\beta_0} \quad (2-73)$$

ค) ฟังก์ชันความเชื่อถือได้ (Reliability Function)

$$R(t) = \left(\frac{\beta_1 x_{i-1} + 1}{\beta_1 x_i + 1} \right)^{\beta_0} \quad (2-74)$$

ง) ฟังก์ชันของอัตราเสี่ยง (Hazard Rate Function)

$$z(t) = \frac{\beta_0 \beta_1}{\beta_1 x_i + 1} \quad (2-75)$$

จ) ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Mean Value Function)
คือ

$$\mu(x) = \beta_0 \ln(\beta_1 x + 1) \quad (2-76)$$

ฉ) ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลาใด ๆ (Failure Intensity Function) คือ

$$\lambda(x) = \frac{\beta_0 \beta_1}{\beta_1 x + 1} \quad (2-77)$$

2.4.10.2 ตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) สมการที่ใช้หา MLE ของ β_0 และ β_1 คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{\ln(1 + \beta_1 X_n)} \quad (2-78)$$

และ

$$\frac{1}{\hat{\beta}_1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \hat{\beta}_1 X_i} \right) = \frac{n X_n}{(1 + \hat{\beta}_1 X_n) \ln(1 + \hat{\beta}_1 X_n)} \quad (2-79)$$

2.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับตัวแบบที่ให้ในงานวิจัยฉบับนี้

2.5.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ Jelinski-Moranda

ตัวแบบ JM มีฟังก์ชันความน่าจะเป็นของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดคือ

$$f(t) = (N - i + 1)\Phi \exp(-(N - i + 1)\Phi t) \quad (2-80)$$

เมื่อ

N และ Φ คือพารามิเตอร์ของตัวแบบ

T คือระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Time between Failure)

ดังนั้น Likelihood Function คือ

$$L = \prod_{i=1}^n f_i(t) \quad (2-81)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} L &= \prod_{i=1}^n (N - i + 1)\Phi \exp(-(N - i + 1)\Phi t_i) \\ L &= \Phi^n \prod_{i=1}^n (N - i + 1) \exp(-\Phi \sum_{i=1}^n (N - i + 1)t_i) \end{aligned} \quad (2-82)$$

และ $\ln L$ คือ

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln(N - i + 1) + n \ln \Phi - \Phi \sum_{i=1}^n (N - i + 1)t_i \quad (2-83)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ Φ ได้คือ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \Phi} = \frac{n}{\Phi} - \sum_{i=1}^n (N - i + 1)t_i \quad (2-84)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \Phi} = 0$ เพื่อหาค่า Φ ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$\frac{n}{\Phi} - \sum_{i=1}^n (N - i + 1)t_i = 0$$

จะได้ว่า

$$\Phi = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (N - i + 1)t_i} \quad (2-85)$$

ดังนั้น MLE สำหรับประมาณค่า Φ คือ

$$\hat{\Phi} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (\hat{N} - i + 1)T_i} \quad (2-86)$$

แทนค่า Φ ในสมการ 2-85 ลงในสมการ 2-83 จะได้ว่า

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln(N-i+1) + n \ln \frac{n}{\sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i} - \frac{n}{\sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i} \sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i$$

นั่นคือ

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln(N-i+1) + n \ln n - n \ln \left(\sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i \right) - n \quad (2-87)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ N ได้คือ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial N} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N-i+1} - \frac{n \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i} \quad (2-88)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial N} = 0$ เพื่อหาค่า N ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{N-i+1} = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n (N-i+1)t_i} \quad (2-89)$$

ดังนั้นสมการที่จะใช้สำหรับหาตัวประมาณค่าสำหรับ N คือ

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{N}-i+1} = \frac{n \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n (\hat{N}-i+1)T_i} \quad (2-90)$$

จากสมการที่ 2-80 เราสามารถใช้แก้สมการโดยใช้ Numerical Techniques ด้วยวิธี False Position เพื่อหา MLE สำหรับ N ได้และนำไปแทนในสมการที่ 2-75 เพื่อหา MLE สำหรับ Φ

2.5.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ Geometric

ตัวแบบ JM มีฟังก์ชันความน่าจะเป็นของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดคือ

$$f(t) = Dk^{t-1} \exp(-Dk^{t-1}t) \quad (2-91)$$

เมื่อ

D และ k คือพารามิเตอร์ของตัวแบบ

T คือระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด (Time between Failure)

ดังนั้น Likelihood Function คือ

$$L = \prod_{i=1}^n f_i(t)$$

ดังนั้น

$$L = \prod_{i=1}^n D k^{i-1} \exp(-D k^{i-1} t_i)$$

นั่นคือ

$$L = D^n \left(\prod_{i=1}^n k^{i-1} \right) \exp \left(-D \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i \right) \quad (2-92)$$

ดังนั้น $\ln L$ คือ

$$\ln L = n \ln D + (\ln k) \sum_{i=1}^n (i-1) - D \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i \quad (2-93)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ D ได้คือ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial D} = \frac{n}{D} - \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i \quad (2-94)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial D} = 0$ เพื่อหาค่า D ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$\frac{n}{D} - \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i = 0 \quad (2-95)$$

นั่นคือ

$$\frac{n}{D} = \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i$$

ดังนั้น

$$D = \frac{n}{\sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i} \quad (2-96)$$

ดังนั้น MLE สำหรับประมาณค่า D คือ

$$\hat{D} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^{i-1} T_i} \quad (2-97)$$

แทนค่า D ในสมการ 2-96 ลงในสมการ 2-93 จะได้ว่า

$$\ln L = n \ln \left(\frac{n}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^{i-1} T_i} \right) + (\ln k) \sum_{i=1}^n (i-1)$$

$$-\left(\frac{n}{\sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i}\right) \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i$$

จะได้ว่า $\ln L = n \ln n - n \ln \sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i + (\ln k) \sum_{i=1}^n (i-1) - n$ (2-98)

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ k ได้คือ

$$\frac{\partial \ln L}{\partial k} = -\frac{n \sum_{i=1}^n (i-1) k^{i-2} t_i}{\sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (i-1)}{k} \quad (2-99)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial k} = 0$ เพื่อให้ k ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$-\frac{n \sum_{i=1}^n (i-1) k^{i-2} t_i}{\sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i} + \frac{\sum_{i=1}^n (i-1)}{k} = 0 \quad (2-100)$$

ดังนั้น

$$\frac{n \sum_{i=1}^n (i-1) k^{i-2} t_i}{\sum_{i=1}^n k^{i-1} t_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (i-1)}{k}$$

หรือ

$$\frac{n \sum_{i=1}^n (i-1) k^i t_i}{\sum_{i=1}^n k^i t_i} = \sum_{i=1}^n (i-1)$$

หรือ

$$\frac{n \sum_{i=1}^n i k^i t_i - n \sum_{i=1}^n k^i t_i}{\sum_{i=1}^n k^i t_i} = \sum_{i=1}^n i - n$$

หรือ

$$\frac{n \sum_{i=1}^n ik't_i}{\sum_{i=1}^n k't_i} - n = \sum_{i=1}^n i - n$$

ดังนั้น

$$\frac{n \sum_{i=1}^n ik't_i}{\sum_{i=1}^n k't_i} = \frac{n(n+1)}{2}$$

นั่นคือ

$$\frac{\sum_{i=1}^n ik't_i}{\sum_{i=1}^n k't_i} = \frac{n+1}{2} \quad (2-101)$$

เพราะฉะนั้นสมการสำหรับใช้ในการหา MLE ของ k คือ

$$\frac{\sum_{i=1}^n ik'T_i}{\sum_{i=1}^n k'T_i} = \frac{n+1}{2} \quad (2-102)$$

จากสมการที่ 2-102 เราสามารถใช้แก้สมการโดยใช้ Numerical Techniques ด้วยวิธี False Position เพื่อหา MLE สำหรับ k

2.5.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic Form)

ตัวแบบ JM มีฟังก์ชันความน่าจะเป็นของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดคือ

$$f(t) = \frac{\alpha(\beta_0 + \beta_1 i^2)^\alpha}{(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t)^{\alpha+1}} \quad (2-103)$$

ซึ่ง Likelihood Function คือ

$$L = \prod_{i=1}^k \frac{\alpha(\beta_0 + \beta_1 i^2)^\alpha}{(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i)^{\alpha+1}}$$

หรือ

$$L = \alpha^n \prod_{i=1}^k \frac{(\beta_0 + \beta_1 i^2)^\alpha}{(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i)^{\alpha+1}} \quad (2-104)$$

และ $\ln L$ คือ

$$\ln L = n \ln \alpha + \alpha \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2) - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i) \quad (2-105)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ α ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = \frac{n}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2) - \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i) \quad (2-106)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = 0$ เพื่อหา α ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด จะได้ว่า

$$0 = \frac{n}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2) - \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i)$$

ดังนั้น

$$\alpha = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i) - \sum_{i=1}^n \ln(\beta_0 + \beta_1 i^2)} \quad (2-107)$$

เพราะฉะนั้น MLE ของ α คือ

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i) - \sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2)} \quad (2-108)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_0 ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2} - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-109)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0}$ เพื่อหา β_0 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2} - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-110)$$

เพราะฉะนั้น

$$\alpha \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2} = (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-111)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_1 ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2} - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-112)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1}$ เพื่อหา β_1 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2} - (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-113)$$

เพราะฉะนั้น

$$\alpha \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2} = (\alpha + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t_i} \quad (2-114)$$

เพราะฉะนั้นสมการสำหรับการใช้ในการหา MLE ของ k คือ

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i} \quad (2-115)$$

และ

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i} \quad (2-116)$$

จากสมการที่ 2-115 และสมการ 2-116 เราสามารถใช้แก้สมการโดยใช้ Numerical Techniques ด้วยวิธี False Position Method เพื่อหา MLE สำหรับ β_0, β_1

2.5.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ Musa'Basic

สำหรับตัวแบบ Musa'Basic ฟังก์ชัน Likelihood จะอยู่ในรูปแบบของ

$$L = e^{-\mu(x_n)} \prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \quad (2-117)$$

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Mean Value Function) คือ

$$\mu(t) = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 t)] \quad (2-118)$$

ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Failure Intensity Function) คือ

$$\lambda(t) = \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_1 t) \quad (2-119)$$

ดังนั้น

$$L = \exp(-\beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 x_n)]) \prod_{i=1}^n \beta_0 \beta_1 \exp(-\beta_1 x_i)$$

หรือ

$$L = \exp(-\beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 x_n)]) \beta_0^n \beta_1^n \exp(-\beta_1 \sum_{i=1}^n x_i) \quad (2-120)$$

ฟังก์ชัน $\ln$ ของ Likelihood Function คือ

$$\ln L = -\beta_0[1 - \exp(-\beta_1 x_n)] + n \ln \beta_0 + n \ln \beta_1 - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-121)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_0

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = -[1 - \exp(-\beta_1 x_n)] + \frac{n}{\beta_0} \quad (2-122)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = 0$ เพื่อหา β_0 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = -[1 - \exp(-\beta_1 x_n)] + \frac{n}{\beta_0} \quad (2-123)$$

ดังนั้น

$$\frac{n}{\beta_0} = 1 - \exp(-\beta_1 x_n)$$

เพราะฉะนั้น

$$\beta_0 = \frac{n}{1 - \exp(-\beta_1 x_n)} \quad (2-124)$$

ดังนั้น MLE สำหรับประมาณค่า β_0 คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{1 - \exp(-\hat{\beta}_1 x_n)} \quad (2-125)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_1

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = -\beta_0 x_n \exp(-\beta_1 x_n) + \frac{n}{\beta_1} - \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-126)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = 0$ เพื่อหา β_1 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = -\beta_0 x_n \exp(-\beta_1 x_n) + \frac{n}{\beta_1} - \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-127)$$

หรือ

$$\frac{n}{\beta_1} = \beta_0 x_n \exp(-\beta_1 x_n) + \sum_{i=1}^n x_i$$

แทนค่า β_0 จะได้

$$\frac{n}{\beta_1} = \frac{n}{1 - \exp(-\beta_1 x_n)} x_n \exp(-\beta_1 x_n) + \sum_{i=1}^n x_i$$

เพราะฉะนั้น

$$\frac{n}{\beta_1} = \frac{nx_n}{\exp(\beta_1 x_n) - 1} + \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-128)$$

จะได้ว่าสมการสำหรับนำไปหา MLE สำหรับประมาณค่า β_1 คือ

$$\frac{n}{\hat{\beta}_1} = \frac{nX_n}{\exp(\hat{\beta}_1 X_n) - 1} + \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-129)$$

เราสามารถใช้แก้สมการ 2-129 โดยใช้ Numerical Techniques ด้วยวิธี False Position Method

2.5.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ Musa-Okumoto

สำหรับตัวแบบ Musa-Okumoto ฟังก์ชัน likelihood จะอยู่ในรูปแบบของ

$$L = e^{-\mu(x_n)} \prod_{i=1}^n \lambda(x_i) \quad (2-130)$$

ฟังก์ชันค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Mean Value Function) คือ

$$\mu(t) = \beta_0 \ln(\beta_1 t + 1) \quad (2-131)$$

ฟังก์ชันอัตราการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ (Failure Intensity Function) คือ

$$\lambda(t) = \frac{\beta_0 \beta_1}{\beta_1 t + 1} \quad (2-132)$$

ดังนั้น

$$L = \exp[-\beta_0 \ln(\beta_1 x_n + 1)] \prod_{i=1}^n \frac{\beta_0 \beta_1}{\beta_1 x_i + 1}$$

หรือ

$$L = \beta_0^n \beta_1^n \frac{1}{(\beta_1 x_n + 1)^{\beta_0}} \prod_{i=1}^n \frac{1}{\beta_1 x_i + 1} \quad (2-133)$$

$$\ln L = n \ln \beta_0 + n \ln \beta_1 - \beta_0 \ln(\beta_1 x_n + 1) - \sum_{i=1}^n \ln(\beta_1 x_i + 1) \quad (2-134)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_0

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = \frac{n}{\beta_0} - \ln(\beta_1 x_n + 1) \quad (2-135)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_0} = 0$ เพื่อหา β_0 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = \frac{n}{\beta_0} - \ln(\beta_1 x_n + 1) \quad (2-136)$$

ดังนั้น

$$\frac{n}{\beta_0} = \ln(\beta_1 x_n + 1)$$

ซึ่งทำให้ได้ว่า

$$\beta_0 = \frac{n}{\ln(\beta_1 x_n + 1)} \quad (2-137)$$

ดังนั้น MLE สำหรับ β_0 คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{\ln(\hat{\beta}_1 X_n + 1)} \quad (2-138)$$

หาอนุพันธ์ย่อยของ $\ln L$ เทียบกับ β_1

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = \frac{n}{\beta_1} - \beta_0 x_n \frac{1}{\beta_1 x_n + 1} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_1 x_i + 1} \quad (2-139)$$

ให้ $\frac{\partial \ln L}{\partial \beta_1} = 0$ เพื่อหา β_1 ที่ทำให้ $\ln L$ มีค่าสูงสุด

$$0 = \frac{n}{\beta_1} - \beta_0 \frac{x_n}{\beta_1 x_n + 1} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_1 x_i + 1} \quad (2-140)$$

แทนค่า β_0 ในสมการ 2-137 ลงในสมการ 2-140

$$0 = \frac{n}{\beta_1} - \frac{n}{\ln(\beta_1 x_n + 1)} \frac{x_n}{\beta_1 x_n + 1} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_1 x_i + 1}$$

จะได้ว่า

$$0 = \frac{n}{\beta_1} - \frac{nx_n}{(\beta_1 x_n + 1) \ln(\beta_1 x_n + 1)} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_1 x_i + 1}$$

หรือ

$$\frac{n}{\beta_1} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_1 x_i + 1} = \frac{nx_n}{(\beta_1 x_n + 1) \ln(\beta_1 x_n + 1)}$$

หรือ

$$\frac{1}{\beta_1} \left(n - \sum_{i=1}^n \frac{\beta_1 x_i}{\beta_1 x_i + 1} \right) = \frac{nx_n}{(\beta_1 x_n + 1) \ln(\beta_1 x_n + 1)}$$

หรือ

$$\frac{1}{\beta_1} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\beta_1 x_i}{\beta_1 x_i + 1} \right) = \frac{nx_n}{(\beta_1 x_n + 1) \ln(\beta_1 x_n + 1)}$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{\beta_1} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_1 x_i + 1} = \frac{nx_n}{(\beta_1 x_n + 1) \ln(\beta_1 x_n + 1)} \quad (2-141)$$

จะได้ว่าสมการสำหรับนำไปหาค่า MLE สำหรับประมาณค่า β_1 คือ

$$\frac{1}{\hat{\beta}_1} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_1 X_i + 1} = \frac{nX_n}{(\hat{\beta}_1 X_n + 1) \ln(\hat{\beta}_1 X_n + 1)} \quad (2-142)$$

เราสามารถแก้สมการ 2-142 โดยใช้ Numerical Techniques ด้วยวิธี False Position Method

2.6 วิธีการทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

2.6.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation)

สมการที่จะใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ที่จะใช้ในการวิจัยนี้มีดังนี้

1) ตัวแบบ Jelinski-Moranda มีสมการที่จะใช้หาค่า MLE คือ

$$\hat{\Phi} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (\hat{N} - i + 1) T_i} \quad (2-143)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{N} - i + 1} = \frac{n \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n (\hat{N} - i + 1) T_i} \quad (2-144)$$

2) ตัวแบบ Geometric มีสมการที่จะใช้หาค่า MLE คือ

$$\hat{D} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^{i-1} T_i} \quad (2-145)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n i \hat{k}^i T_i}{\sum_{i=1}^n \hat{k}^i T_i} = \frac{n+1}{2} \quad (2-146)$$

3) ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic form) มีสมการที่จะใช้หา MLE คือ

$$\hat{\alpha} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i) - \sum_{i=1}^n \ln(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2)} \quad (2-147)$$

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i} \quad (2-148)$$

$$\hat{\alpha} \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2} = (\hat{\alpha} + 1) \sum_{i=1}^n \frac{i^2}{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 i^2 + T_i} \quad (2-149)$$

4) ตัวแบบ Musa's Basic มีสมการที่จะใช้หา MLE คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{1 - \exp(-\hat{\beta}_1 X_n)} \quad (2-150)$$

$$\frac{n}{\hat{\beta}_1} = \frac{nX_n}{\exp(\hat{\beta}_1 X_n) - 1} + \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-151)$$

5) ตัวแบบ Musa-Okumoto มีสมการที่จะใช้หา MLE คือ

$$\hat{\beta}_0 = \frac{n}{\ln(\hat{\beta}_1 X_n + 1)} \quad (2-152)$$

$$\frac{1}{\hat{\beta}_1} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\beta}_1 X_i + 1} = \frac{nX_n}{(\hat{\beta}_1 X_n + 1) \ln(\hat{\beta}_1 X_n + 1)} \quad (2-153)$$

วิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) [24] เป็นวิธีที่นิยมมากในการใช้หาตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ ซึ่งใช้การประยุกต์ของอนุพันธ์ ซึ่งเมื่อมีฟังก์ชันใด ๆ แล้วสามารถหาค่าในโดเมน ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันมีค่าสูงที่สุดได้ โดยใช้คุณสมบัติที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันที่จุดสูงสุดนั้นมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้เราสร้างสมการเพื่อหาค่าในโดเมนที่ทำให้ฟังก์ชันมีค่าสูงที่สุดได้ มีวิธีการดังนี้

ให้ $X_1, X_2, X_3, \dots$ เป็นตัวแปรสุ่ม สมมติให้ X_i มีฟังก์ชันความหนาแน่นเป็น $f(\cdot, \theta)$ เมื่อ $-\infty < \theta < \infty$ เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ต้องการประมาณ สมมติได้ค่าสังเกตข้อมูล $X_1, X_2, \dots, X_n$ มาและต้องการประมาณ θ นิยาม Likelihood Function คือ

$$\begin{aligned} \Lambda_n(\theta) &= \Lambda_n(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) \\ &= f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) \\ &= f(x_1; \theta) f(x_2; \theta) \cdots f(x_n; \theta) \\ &= \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) \end{aligned} \quad (2-154)$$

ตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด คือ ค่าของ θ ที่ทำให้ฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็นมีค่าสูงสุด สมมติแทนด้วย $\hat{\theta}$ เมื่อ

$$\hat{\theta}_n = \sup_{\theta \in R} \Lambda_n(\theta) \quad (2-155)$$

$\hat{\theta}_n$ เป็นตัวแปรสุ่มเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของ $X_1, X_2, \dots, X_n$ จะเห็นว่าตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดขึ้นอยู่กับ n ซึ่งเป็นขนาดตัวอย่างด้วย ปกติ เราจะพิจารณาพฤติกรรมของตัวประมาณเมื่อตัวอย่างมีขนาดใหญ่ นั่นคือ $n \rightarrow \infty$ ภายใต้ข้อสมมติบางประการ ตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดเป็นตัวประมาณที่คงเส้นคงวา (Consistent) ในแง่ที่ $\hat{\theta}_n$ เข้าสู่อำนาจ θ ซึ่งความน่าจะเป็น ($\hat{\theta}_n \xrightarrow{P} \theta$ เมื่อ $n \rightarrow \infty$) และมีการแจกแจงลู่เข้าสู่การแจกแจงแบบปกติ กล่าวคือ มีค่าคงตัว $\sigma^2(\theta)$ ที่ $\sqrt{n}[\hat{\theta}_n - \theta] \xrightarrow{L} N(0, \sigma^2(\theta))$ ซึ่งจะแสดงว่าสามารถนำทฤษฎีลิมิตมาเพื่อพิสูจน์สมบัติของตัวประมาณ $\hat{\theta}_n$ ได้อย่างไร เราจะไม่พิจารณาฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็นโดยตรง แต่จะพิจารณาลอการิทึมของฟังก์ชันภาวะความน่าจะเป็นแทน ให้

$$L_n(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \theta) \quad (2-156)$$

ซึ่งจะเป็นว่า $L_n(\theta)$ เป็นผลบวกของตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันและมีการแจกแจงแบบเดียวกัน (independent identically distributed : iid) ทำนองเดียวกัน อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของ $L_n(\theta)$ เทียบกับ θ คือ

$$L'_n(\theta) = \sum_{i=1}^n \frac{f'(x_i, \theta)}{f(x_i, \theta)} \quad (2-157)$$

และ $L'_n(\theta)$ ยังคงเป็นตัวแปรสุ่ม และภายใต้เงื่อนไขปกติ (regularity conditions) ตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุดคือ $\hat{\theta}_n$ สอดคล้องกับสมการภาวะความน่าจะเป็น

$$L'_n(\theta) = 0 \quad (2-158)$$

ในกรณีที่ $L_n(\theta)$ เป็นฟังก์ชันซึ่งพารามิเตอร์ θ เป็นเวกเตอร์ กล่าวคือมีพารามิเตอร์มากกว่า 1 ค่า เราสามารถหาตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด หรือ MLE โดยการหาอนุพันธ์ย่อย เทียบกับพารามิเตอร์ที่สนใจ เช่น $L_n(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \theta)$ เมื่อ $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\frac{\partial L_n(\theta)}{\partial \theta_i} = 0 \quad (2-159)$$

ที่จุด $\theta_i = \hat{\theta}_i$ จะทำให้ $\frac{\partial L_n(\theta)}{\partial \theta_i} = 0$ หรือ $\frac{\partial^2 L_n(\theta)}{\partial \theta_i^2} < 0$

ดังนั้น $\hat{\theta}_i$ จะเป็นตัวประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด หรือ MLE ของ θ_i

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาความแม่นยำของค่าพยากรณ์ความน่าจะเป็นที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์จากตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ทั้ง 5 ตัวแบบได้แก่ ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadrdratic From) ตัวแบบ Musa's Basic ตัวแบบ Musa-Okumoto ซึ่งจะมีขั้นตอนในการคัดเลือกตัวแบบที่มีความแม่นยำสูงสุดดังต่อไปนี้

- 3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์
- 3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น
- 3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบทุกชุดข้อมูล
- 3.4 การประมาณค่าความน่าจะเป็นและความน่าจะเป็นสะสม
- 3.5 การใช้สถิติในการเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์ความเชื่อถือได้
- 3.6 การนำเสนอข้อมูล

3.1 กำหนดลักษณะข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

เนื่องจากข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์จะต้องมีลักษณะการบันทึกข้อมูลแบบบันทึกช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง ซึ่งข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ทั้ง 10 ชุด มีลักษณะการเก็บบันทึกข้อมูลแบบช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง แสดงได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลของช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง

การเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i	ช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาด (t_i)	ช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดสะสม (x_i)
1	t_1	$x_1 = t_1$
2	t_2	$x_2 = t_1 + t_2$
3	t_3	$x_3 = t_1 + t_2 + t_3$
M	M	M
I	t_i	$x_i = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i$

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

เมื่อได้ข้อมูลที่ตรงตามลักษณะที่จะนำมาวิจัยแล้วจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นโดยการสร้างกราฟแสดงไถ้การเจริญเติบโตระหว่างเวลาเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับจำนวนเกิดข้อผิดพลาด (Cumulative Failure of Raw Data) และกราฟของฟังก์ชันของเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับข้อผิดพลาดต่อหน่วยเวลา (Failure Intensity of Raw Data) ซึ่งกราฟทั้ง 3 นำมาเปรียบเทียบกับตัวแบบว่าตัวแบบให้ให้ค่าพยากรณ์ได้ดี

3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแบบทุกชุดข้อมูล

3.3.1 ตัวแบบ Jelinski-Moranda คือ

$$R(t) = \exp(-(N-i+1)\Phi t) \quad (3-1)$$

3.3.2 ตัวแบบ Geometric คือ

$$R(t) = \exp(-Dk^{-1}t) \quad (3-2)$$

3.3.3 ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic from) คือ

$$R(t) = \left(\frac{\beta_0 + \beta_1 i^2}{\beta_0 + \beta_1 i^2 + t} \right)^\alpha \quad (3-3)$$

3.3.4 ตัวแบบ Musa's Basic คือ

$$R(t) = \exp(-[\beta_0 \exp(-\beta_1 x_{i-1})][1 - \exp(-\beta_1 t)]) \quad (3-4)$$

3.3.5 ตัวแบบ Musa-Okumoto คือ

$$R(t) = \left(\frac{\beta_1 x_{i-1} + 1}{\beta_1 x_i + 1} \right)^{\beta_0} \quad (3-5)$$

3.4 การประมาณค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็นและและฟังก์ชันการแจกแจง

ให้ $T_1, T_2, \dots$ เป็นตัวแปรสุ่มของระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด เราจะประมาณค่า $f_i(t)$ ด้วย $\hat{f}_i(t)$ และประมาณค่า $F_i(t)$ ด้วย $\hat{F}_i(t)$ มีขั้นตอนดังนี้

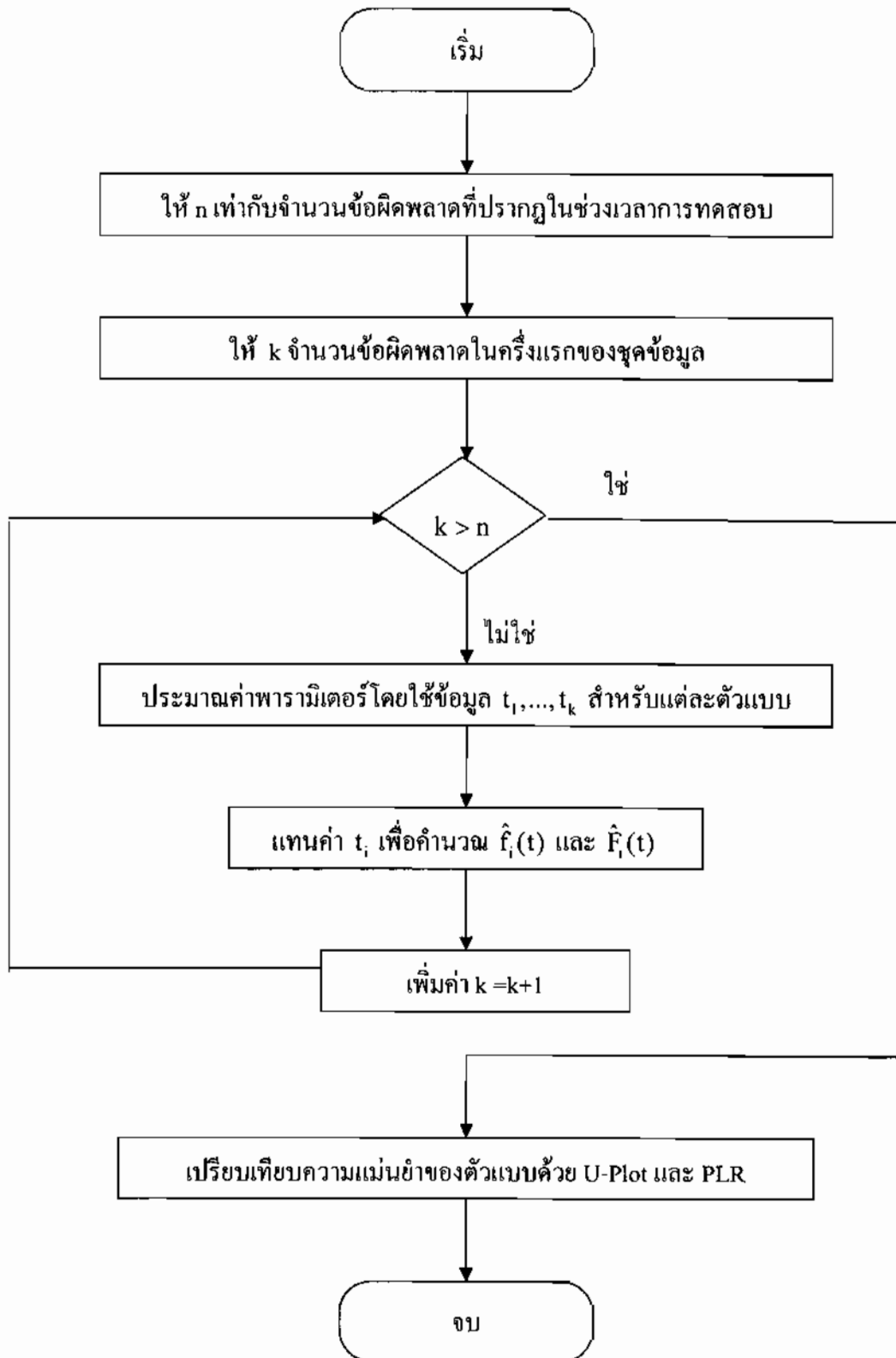
1) หาตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE) โดยใช้ข้อมูล $t_1, \dots, t_{i-1}$ เมื่อ $i-1$ เป็นจำนวนข้อมูลในครั้งแรกของแต่ละชุด

2) เมื่อได้ MLE แล้วจะนำมาหาค่าประมาณ $\hat{f}_i(t)$ และ $\hat{F}_i(t)$ โดยแทนค่า t_i ลงไป

3) หา MLE ซ้ำโดยใช้ข้อมูล $t_1, \dots, t_i$ (นั่นคือเพิ่มข้อมูล t_i เพิ่มไป 1 ตัว) และประมาณค่า $\hat{f}_{i+1}(t)$ และ $\hat{F}_{i+1}(t)$ โดยแทนค่า t_{i+1} ลงไป

4) ทำซ้ำในข้อ 3) โดยเพิ่มข้อมูลตัวถัดไปที่ละตัว ซึ่งเมื่อจบกระบวนการเราจะได้ลำดับของฟังก์ชันค่าประมาณความน่าจะเป็น $\hat{f}_1(t), \hat{f}_{i+1}(t), \hat{f}_{i+2}(t), \dots, \hat{f}_n(t)$ และลำดับของฟังก์ชันค่าประมาณการแจกแจง $\hat{F}_1(t), \hat{F}_{i+1}(t), \hat{F}_{i+2}(t), \dots, \hat{F}_n(t)$

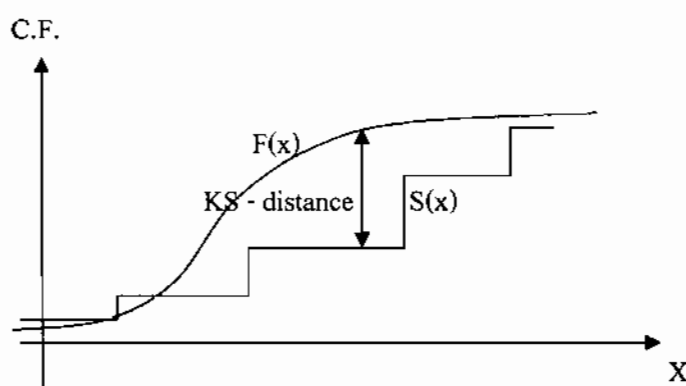
ขั้นตอนการหาลำดับของฟังก์ชันค่าประมาณ $\hat{f}_1(t), \hat{f}_{i+1}(t), \hat{f}_{i+2}(t), \dots, \hat{f}_n(t)$ และ $\hat{F}_1(t), \hat{F}_{i+1}(t), \hat{F}_{i+2}(t), \dots, \hat{F}_n(t)$ สรุปไว้ตามแผนผัง ในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 แผนผังขั้นตอนในการวิจัยสำหรับข้อมูลแต่ละชุด

3.5 การใช้สถิติในการเปรียบเทียบความแม่นยำของการพยากรณ์ความเชื่อถือได้

3.5.1 ตัวสถิติ KS ได้จากการทดสอบ Kolmogorov – Simirnov อาจเรียกชื่อได้อีกอย่างว่า การทดสอบ Kolmogorov Goodness – of – Fit โดยข้อมูลที่จะนำมาใช้ได้นั้นต้องเป็นข้อมูลที่อยู่ในระดับการจัดลำดับได้ (Ordinal Scale) การใช้สถิติตัวนี้เพื่อเปรียบเทียบการแจกแจงของข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง กับการแจกแจงของข้อมูลเชิงทฤษฎี ว่าเป็นการแจกแจงเดียวกันหรือไม่ การทดสอบประเภทนี้ เป็นการทดสอบการแจกแจงของความถี่สะสม (Cumulative Frequency) อย่างหนึ่ง ลักษณะของกราฟโค้งความถี่สะสมเชิงทฤษฎี กับ ข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างสามารถเขียนเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 แสดงการหาค่า KS-Statistic

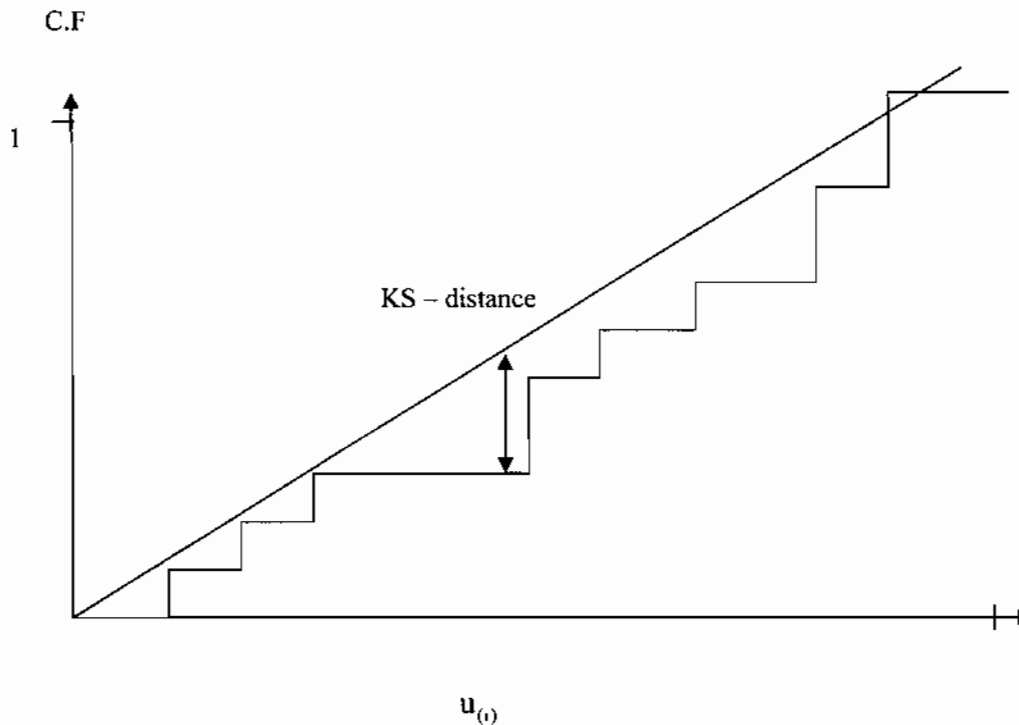
ในงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ถ้าตัวแบบ A มีฟังก์ชันการแจกแจงของระยะเวลาระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด T เป็น $F^A(t)$ ซึ่งถ้าค่าพยากรณ์ของฟังก์ชันการแจกแจง $\hat{F}_i^A(t)$ มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ แสดงว่า T ยังคงมีฟังก์ชันการแจกแจงเป็น $F^A(t)$ อยู่ ดังนั้น ตัวแบบ A จึงเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำ ถ้าให้ U_i เป็นตัวแปรสุ่มของค่าของฟังก์ชันการแจกแจงที่ได้จากการพยากรณ์ นั่นคือ

$$u_i^A = \hat{F}_i^A(t) \quad (3-6)$$

เนื่องจาก $0 \leq F(t) \leq 1$ ดังนั้นหาก U_i^A แจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform) บนช่วง $(0,1)$ แล้ว จะได้ว่าตัวแบบ A เป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำ

เราจะทดสอบว่า U_i^A แจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform) บนช่วง $(0,1)$ หรือไม่โดยใช้ตัวสถิติ KS ซึ่งหาได้จากกราฟ และเรียกวิธีนี้ว่า U-Plot ซึ่งการสร้างการขึ้นบันได ทำได้โดย

- 1) ลำดับค่า u_i จากน้อยไปมาก ใช้สัญลักษณ์ $u_{(i)}$ และ
- 2) สร้างกราฟขั้นบันไดให้แกนนอนเป็น $u_{(i)}$ โดยที่ขั้นบันไดจะมีความสูง $\frac{1}{n-k+1}$ เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ k คือจำนวนข้อมูลเริ่มแรกที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์



ภาพที่ 3-3 แสดงการหา KS-distance จากกราฟ U-Plot

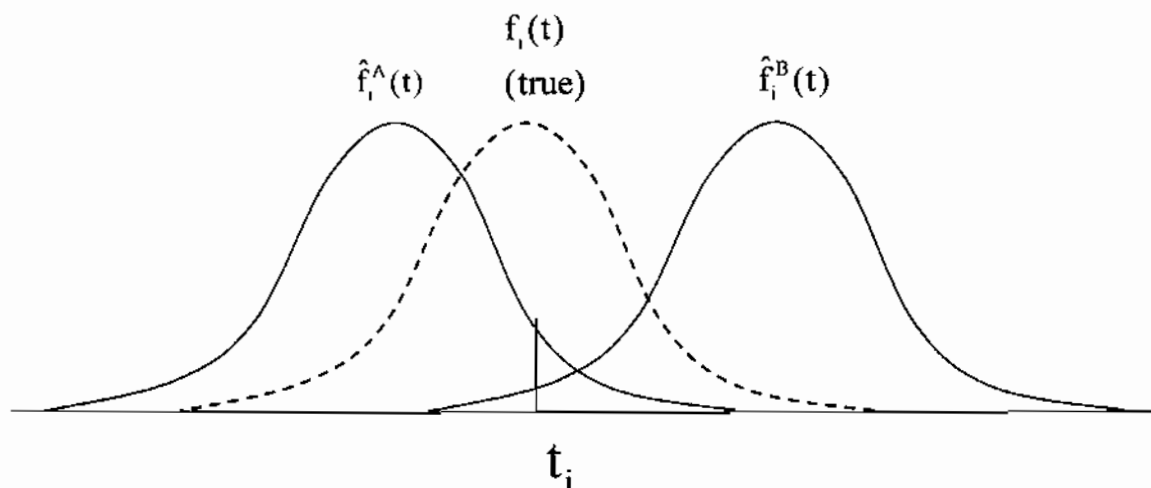
- 3) คำนวณค่า KS-distance ด้วยสูตร

$$KS\text{-distance} = \max_{i=k+1}^n \left\{ \left| u_{(i)} - \frac{i-k-1}{n-k+1} \right|, \left| u_{(i)} - \frac{i-k}{n-k+1} \right| \right\} \quad (3-7)$$

ถ้า p-value ของตัวสถิติ KS ที่คำนวณได้ 0.05 แล้ว จะยอมรับว่า U_i มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform) บนช่วง (0,1) และตัวแบบที่มีความแม่นยำที่สุดจะต้องมีค่า KS-distance หรือตัวสถิติ KS ต่ำสุด

3.5.2 PLR (Prequential Likelihood Ratio for Detecting Noise and Bias : PLR)

วิธีนี้จุดประสงค์คล้ายกับวิธีของ U-Plot แต่เป็นการทดสอบด้วยการประมาณค่าฟังก์ชันความน่าจะเป็น $\hat{f}_i(t)$ มีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันความน่าจะเป็นจริง $f_i(t)$ เพียงใด



ภาพที่ 3-4 การพยากรณ์ $f_i(t)$ โดยใช้ตัวแบบ A และ B

จากภาพที่ 3.4 $\hat{f}_i^A(t)$ มีความใกล้เคียง $f(t)$ มากกว่า $\hat{f}_i^B(t)$ และหากสังเกตที่ t_i จะเห็นว่า $\hat{f}_i^A(t) > \hat{f}_i^B(t)$ ทำให้ $\frac{\hat{f}_i^A(t)}{\hat{f}_i^B(t)} > 1$ ดังนั้นหาก อัตราส่วนนี้มีค่ามาก ๆ ก็แสดงจะให้เห็นว่า $\hat{f}_i^A(t)$ มีความใกล้เคียง $f(t)$ มากกว่า $\hat{f}_i^B(t)$ อย่างยิ่ง ดังนั้นหากเราหาลำดับของอัตราส่วน

$$PLR_n^{AB} = \frac{PL_n^A}{PL_n^B} = \frac{\prod_{i=k+1}^n \hat{f}_i^A(t_i)}{\prod_{i=k+1}^n \hat{f}_i^B(t_i)} \quad \text{และ } PLR_n^{AB} \text{ เป็นลำดับเพิ่ม แล้ว } \hat{f}_i^A(t) \text{ มีความใกล้เคียง } f(t)$$

มากกว่า $\hat{f}_i^B(t)$ แต่เนื่องจาก $\prod_{i=k+1}^n \hat{f}_i^A(t_i)$ และ $\prod_{i=k+1}^n \hat{f}_i^B(t_i)$ อาจมีค่าน้อยมาก ทำให้ยากต่อการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเราจึงใช้ ค่า Logarithm ฐาน e ของ ลำดับ PLR_n^{AB} แทน นั่นคือ

$$\begin{aligned} \ln(PLR_n^{AB}) &= \ln(PL_n^A) - \ln(PL_n^B) \\ &= \sum_{i=k+1}^n \ln(\hat{f}_i^A(t)) - \sum_{i=k+1}^n \ln(\hat{f}_i^B(t)) \end{aligned} \quad (3-8)$$

สรุปเป็นขั้นตอนดังนี้

- 1) คำนวณค่า $\ln(PL)$ โดยใช้สูตร

$$\ln(PL_n) = \sum_{i=k+1}^n \ln(\hat{f}_i(t)) \quad (3-9)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด และ k คือจำนวนข้อมูลครั้งแรก

- 2) การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบนั้นสามารถเทียบเทียบได้ครั้งละ 2 ตัวแบบดังภาพที่ 3-3 โดยใช้สมการ 3-8 เพื่อหาลำดับ $\ln(PLR_n^{AB})$

3) สร้างกราฟของลำดับ $\ln(\text{PLR}_n^{\text{AB}})$ หากมีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ (∞) แล้วตัวแบบ A จะเป็นตัวแบบที่แม่นยำกว่าตัวแบบ B ในทางกลับกันหากลำดับของ $\ln(\text{PLR}_n^{\text{AB}})$ มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าลบของอนันต์ ($-\infty$) แล้ว ตัวแบบ B จะเป็นตัวแบบที่ดีกว่าตัวแบบ A

4) หากกราฟของลำดับ $\ln(\text{PLR}_n^{\text{AB}})$ มีแนวโน้มเข้าสู่ 0 แสดงว่าตัวแบบ A มีความแม่นยำเทียบเท่าตัวแบบ B อย่างไรก็ตามเราสามารถเลือกตัวแบบที่ดีกว่าได้โดยสังเกตจากค่าของ $\ln(\text{PL}_n)$ ลำดับสุดท้าย หากตัวแบบใดมีค่ามากกว่า ก็มีแนวโน้มว่าเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากกว่า แต่เนื่องจาก $\ln(\text{PL}_n) < 0$ เสมอ ดังนั้น ในการนำเสนอจะใช้ค่า $-\ln(\text{PL}_n)$ หากค่า $-\ln(\text{PL}_n)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบใดมีค่าน้อยกว่า ก็มีแนวโน้มว่าเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากกว่า

3.6 การนำเสนอข้อมูล

การนำเสนอข้อมูลจะใช้ตารางและใช้กราฟเพื่อแสดงค่าต่าง ๆ ในแต่ละชุดข้อมูล และทำการเปรียบเทียบในแต่ละตัวแบบ แล้วจึงอภิปรายผลการวิจัย สรุปและเสนอข้อเสนอนะ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาการเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ได้ของซอฟต์แวร์ ซึ่งคำนวณจากระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาด โดยใช้ตัวแบบ 5 ตัวแบบ ดังนี้

- 1 ตัวแบบ Jelinski-Moranda
- 2 ตัวแบบ Geometric
- 3 ตัวแบบ Littlewood-Verrall
- 4 ตัวแบบ Musa's Basic
- 5 ตัวแบบ Musa-Okumoto

โดยใช้ข้อมูลจริงที่ได้จากการบันทึกช่วงเวลาของการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง แล้วนำข้อมูลระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดมาคำนวณหาตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ในแต่ละตัวแบบ ด้วยวิธีภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation : MLE)

ในการพิจารณาความแม่นยำของตัวแบบด้วยตัวสถิติ KS และ PLR ซึ่งตัวแบบที่ให้ค่า KS-Statistic ต่ำสุดจะเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากที่สุด และตัวแบบ 2 ตัวแบบที่นำมาเปรียบเทียบความแม่นยำโดยใช้กราฟของลำดับของ $\ln(PLR)$ หากกราฟมีแนวโน้มสูงสูด (∞) เมื่อ $i \rightarrow \infty$ แล้วตัวแบบที่นำค่า $-\ln(PL)$ มาเป็นตัวตั้งจะเป็นตัวแบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า หากกราฟสูงสูด 0 ทั้งสองตัวแบบจะมีความแม่นยำใกล้เคียงกัน แต่สามารถเลือกตัวแบบที่มีความแม่นยำมากกว่าได้ โดยตัวแบบใดมีค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายน้อยกว่าจะเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำมากกว่า

การนำเสนอผลการวิจัยจะแบ่งเป็น 10 ชุดข้อมูล มีขั้นตอนการนำเสนอ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แสดงลักษณะของข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 แสดงตารางค่าสถิติ KS ที่คำนวณได้จากทั้ง 5 ตัวแบบ

ขั้นตอนที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบกราฟของ U-Plot ของทั้ง 5 ตัวแบบ

ขั้นตอนที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบกราฟของ $\ln(PLR)$

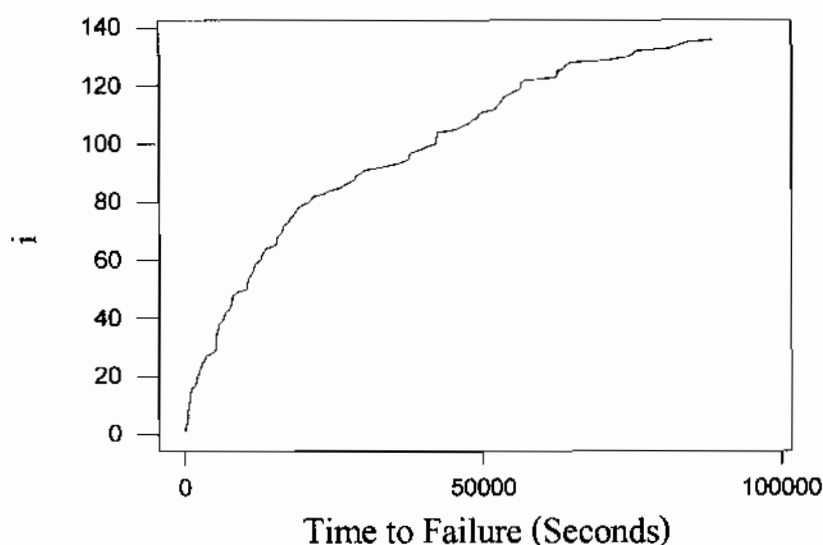
ขั้นตอนที่ 5 แสดงตารางค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ทั้ง 5 ตัวแบบ

เพื่อความสะดวกในการนำเสนอผลการวิจัยครั้งนี้ จึงกำหนดให้สัญลักษณ์ต่อไปนี้แทน
ความหมายต่าง ๆ ดังนี้

- JM หมายถึง ตัวแบบ Jelinski-Moranda
 GE หมายถึง ตัวแบบ Geometric
 LV หมายถึง ตัวแบบ Littlewood-Verrall (Quadratic form)
 MB หมายถึง ตัวแบบ Musa's Basic
 MO หมายถึง ตัวแบบ Musa-Okumoto
 i หมายถึง การเกิดข้อผิดพลาดครั้งที่ i
 t หมายถึง ระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดสะสม
 Cum.N(t) หมายถึง จำนวนข้อผิดพลาดสะสมที่เวลา t
 ผลการวิเคราะห์แต่ละชุดข้อมูล มีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 1

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ของมหาวิทยาลัยในประเทศไทย ใช้คำสั่งประมาณ 1,000 บรรทัด จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 136 จุด จากเวลาการทดสอบ 88,682 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลาที่มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-1



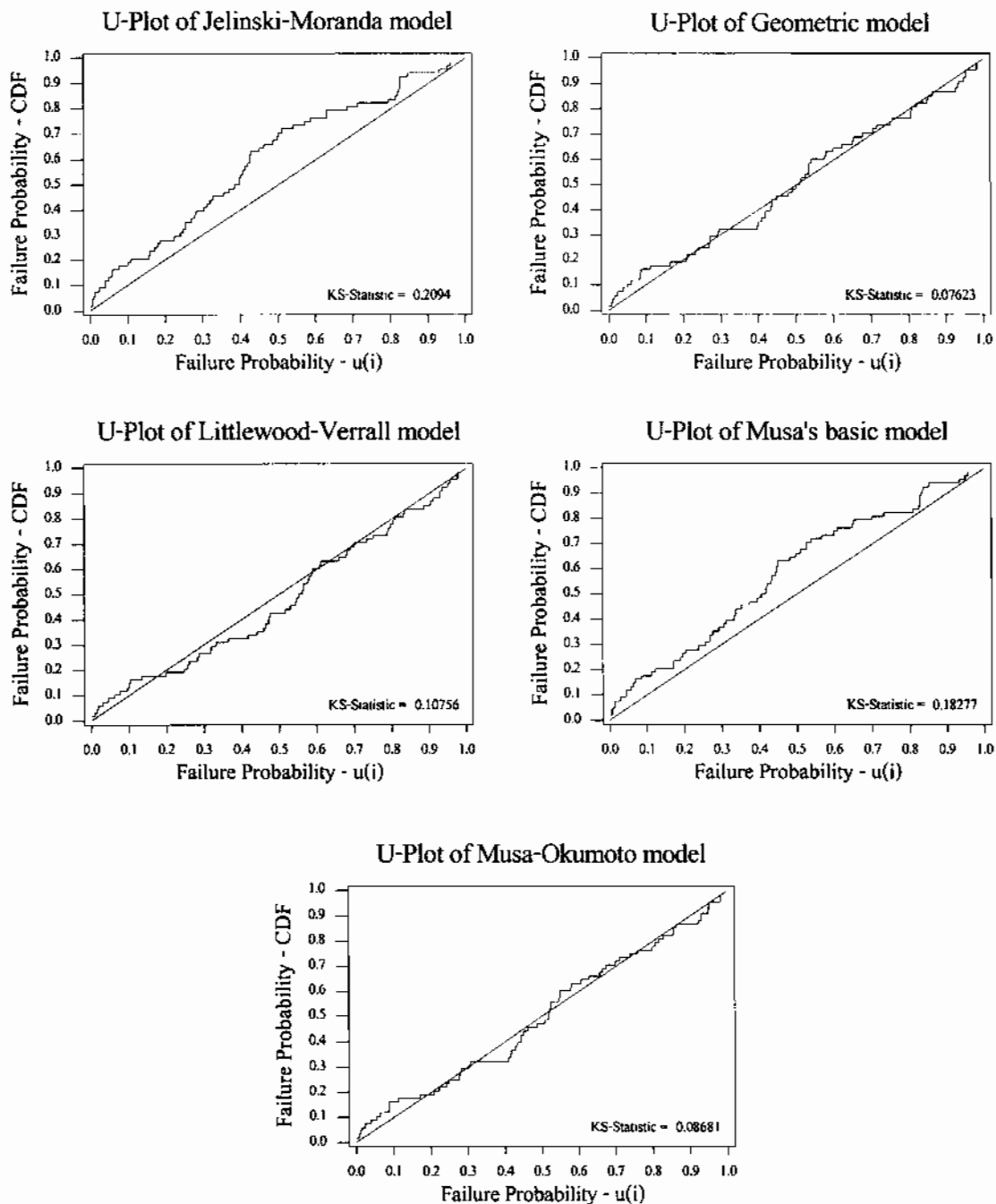
ภาพที่ 4-1 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 1

ตารางที่ 4-1 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric

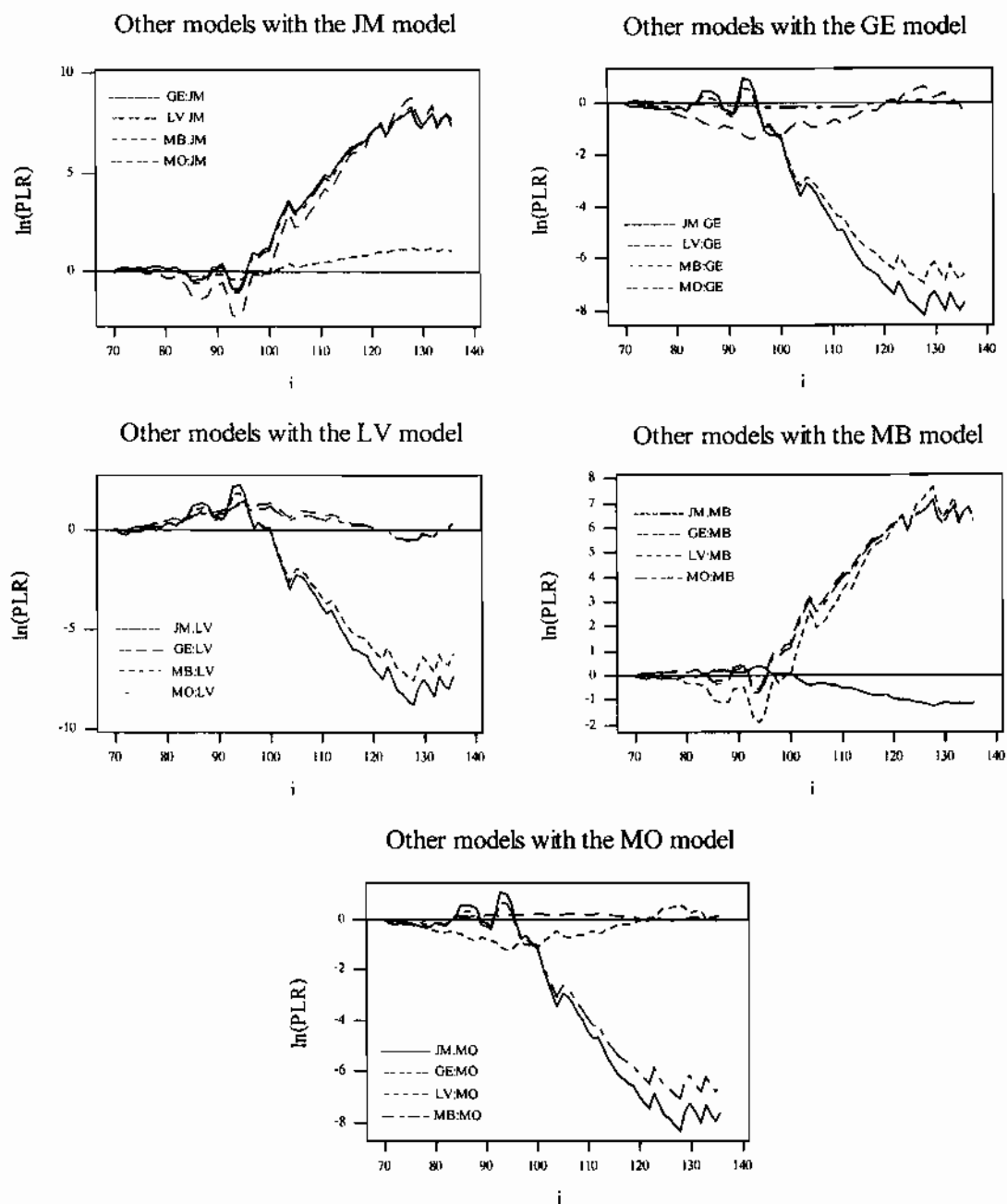
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.20940
Geometric	0.07623
Littlewood-Verrall	0.10756
Musa's Basic	0.18277
Musa-Okumoto	0.08681

จากภาพที่ 4-2 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Geometric มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิง
ทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-1 พบว่าตัวแบบ Geometric มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหาก
ใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Geometric จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้
ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

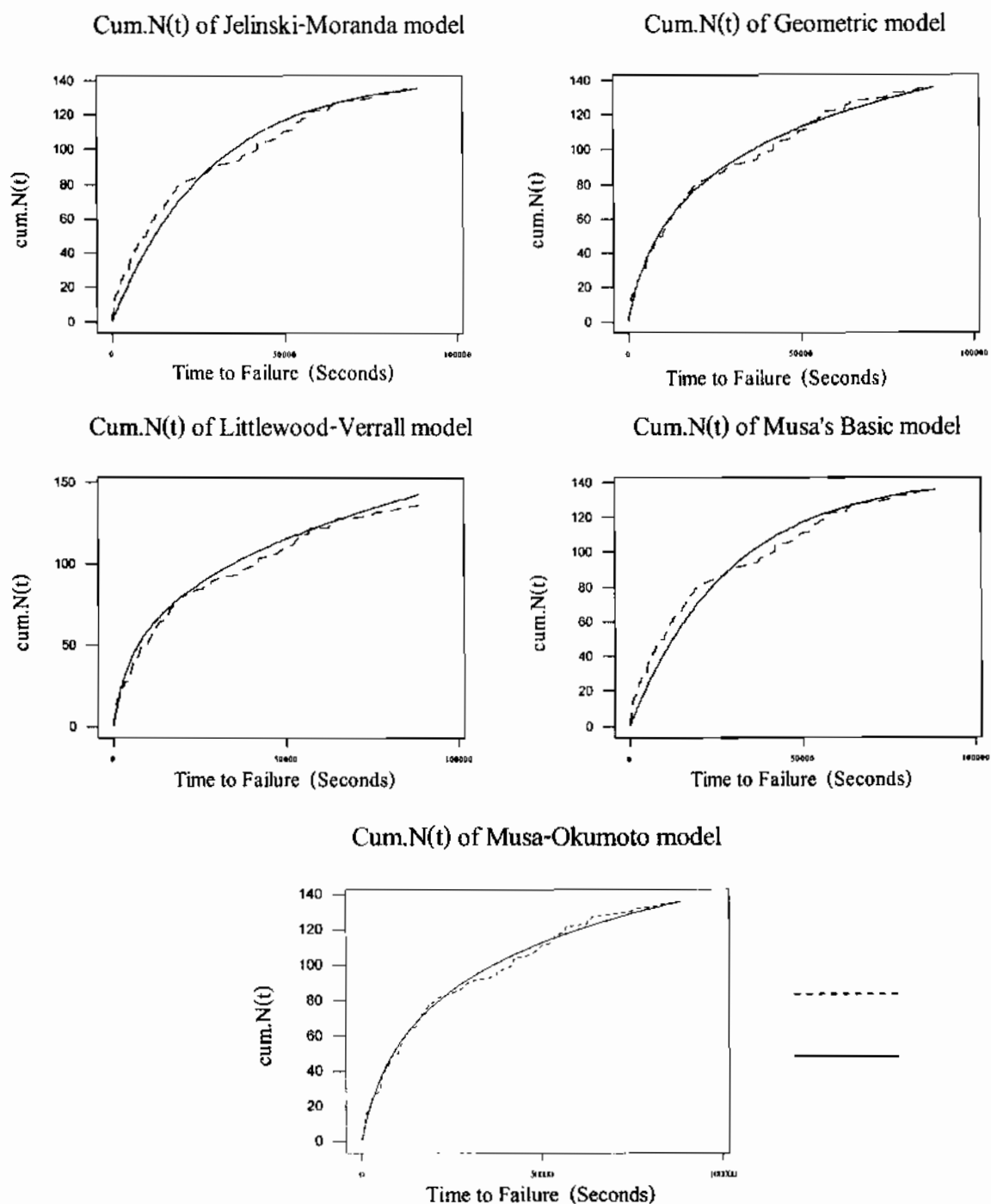


ภาพที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

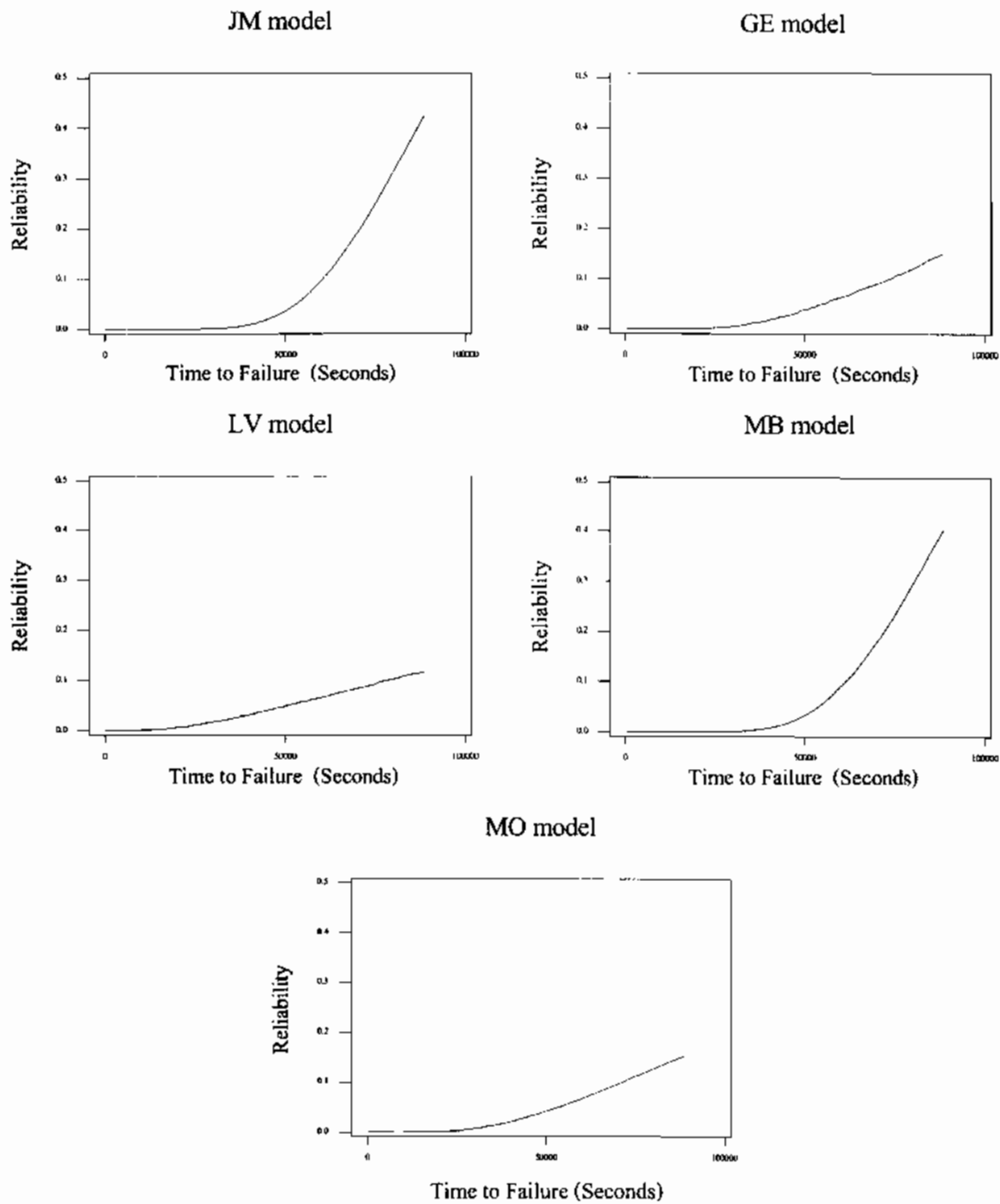
ตารางที่ 4-2 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	538.776
Geometric	531.083
Littlewood-Verrall	531.461
Musa's Basic	537.697
Musa-Okumoto	531.182

จากภาพที่ 4-3 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวแบบอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบตัวแบบ JM และ MB มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ (∞) ดังนั้นตัวแบบอื่น ๆ (GE LV และ MO) จึงเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากกว่าตัวแบบ JM และ MB และจากตารางที่ 4-2 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ GE มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Geometric เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-4 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $cum.N(t)$ กับค่าเฉลี่ยขอจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Geometric จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



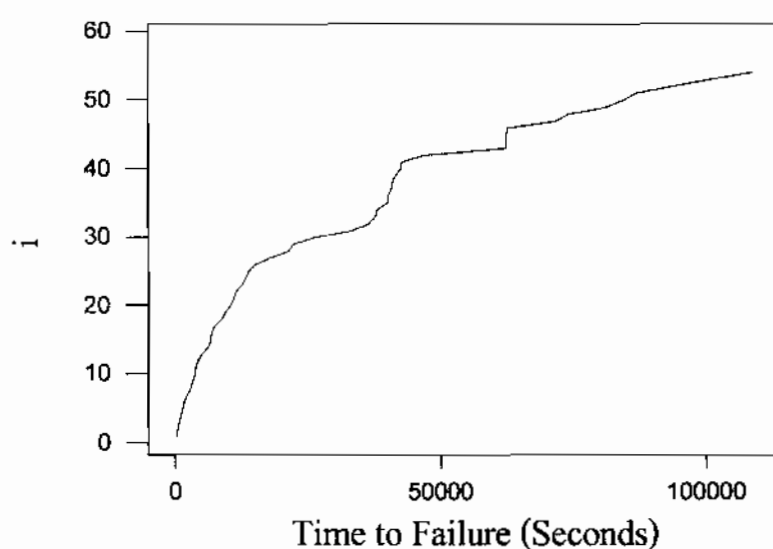
ภาพที่ 4-4 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 1



ภาพที่ 4-5 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 1

4.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 2

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานควบคุมปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งแบบ online ของประเทศญี่ปุ่น ใช้คำสั่งประมาณ 40000 คำสั่ง จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 54 จุด จากเวลาการทดสอบ 108,708 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลาที่มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-6



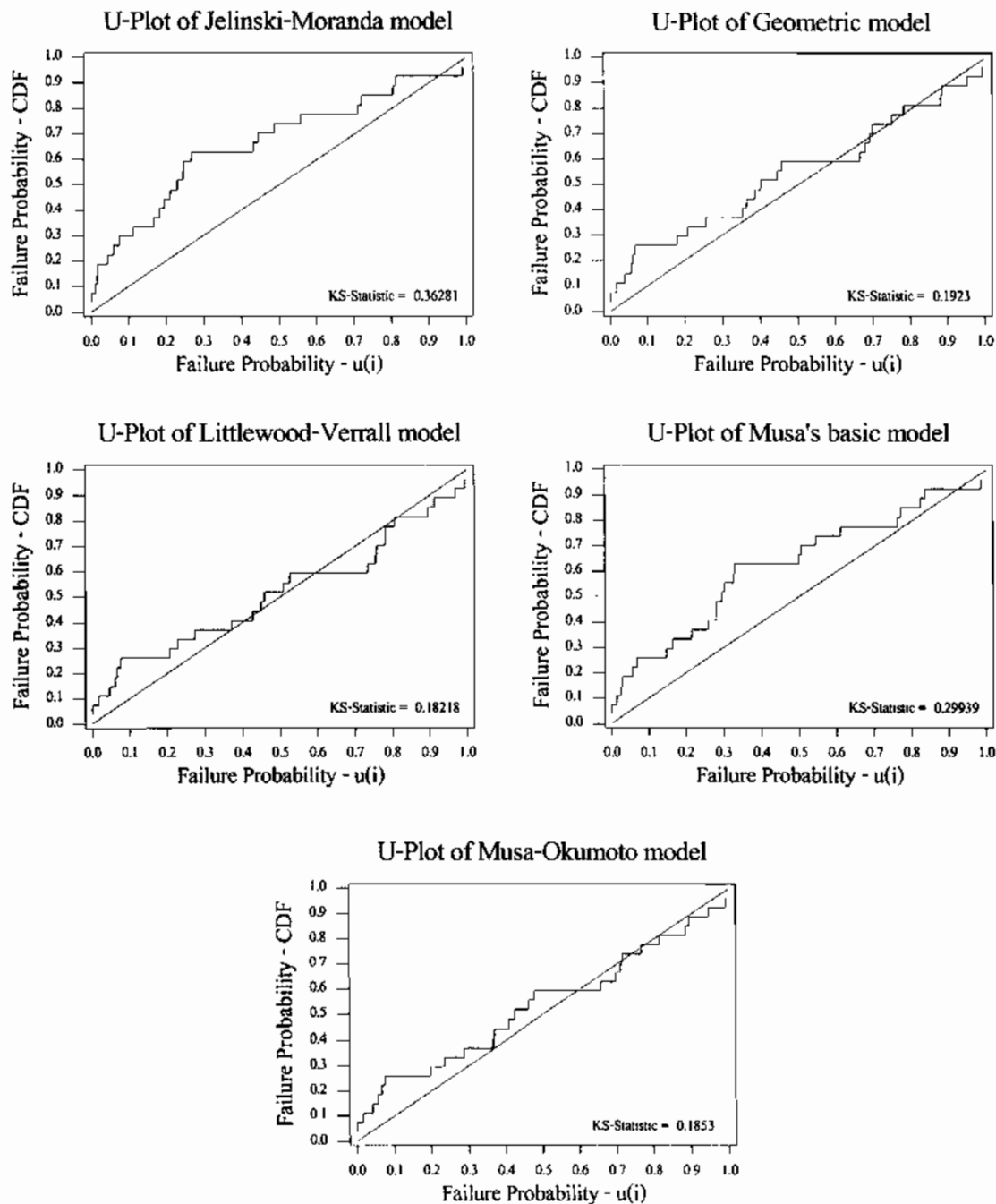
ภาพที่ 4-6 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 2

ตารางที่ 4-3 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric

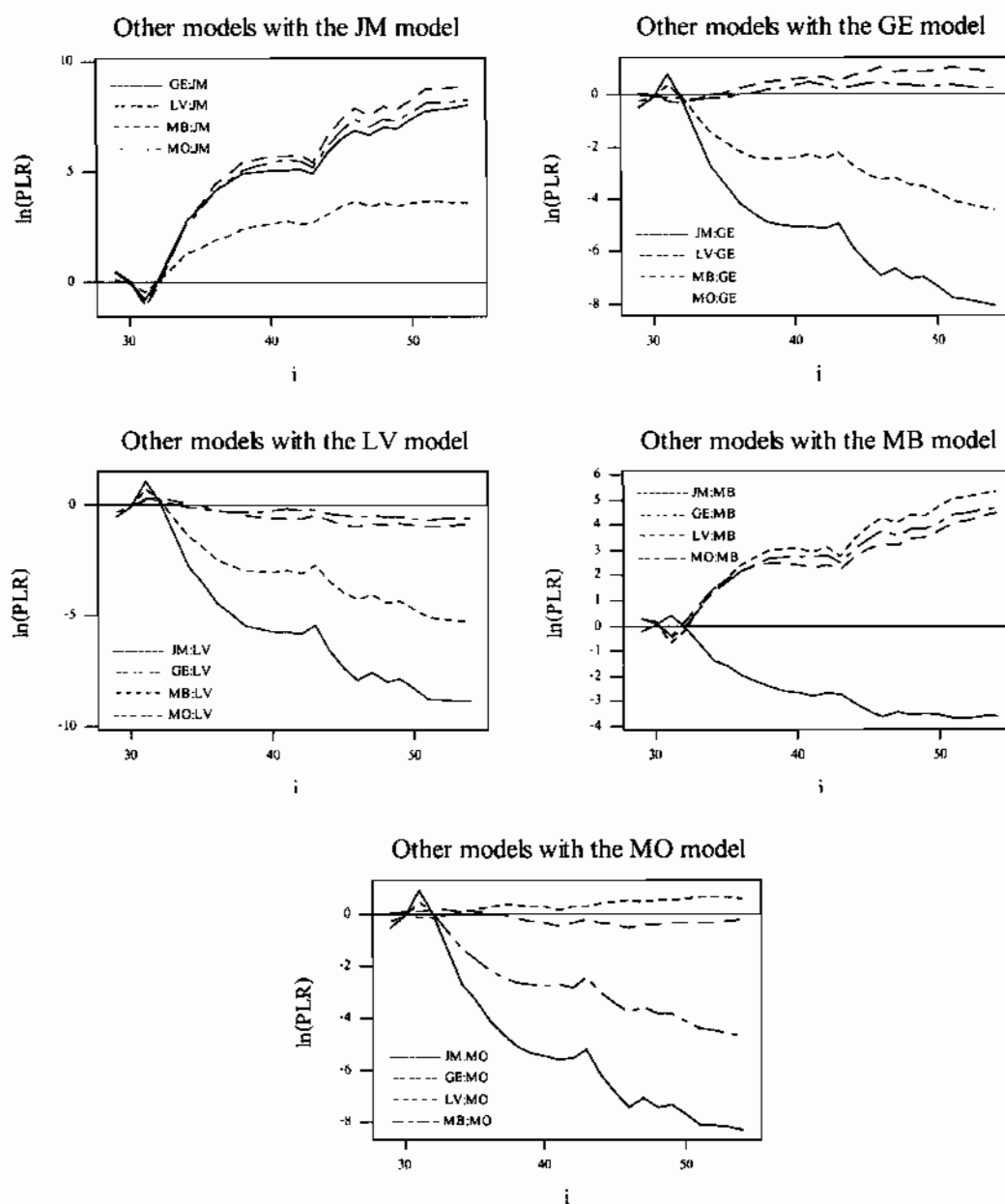
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.36281
Geometric	0.19230
Littlewood-Verrall	0.18218
Musa's Basic	0.29939
Musa-Okumoto	0.18530

จากภาพที่ 4-7 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-3 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-7 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

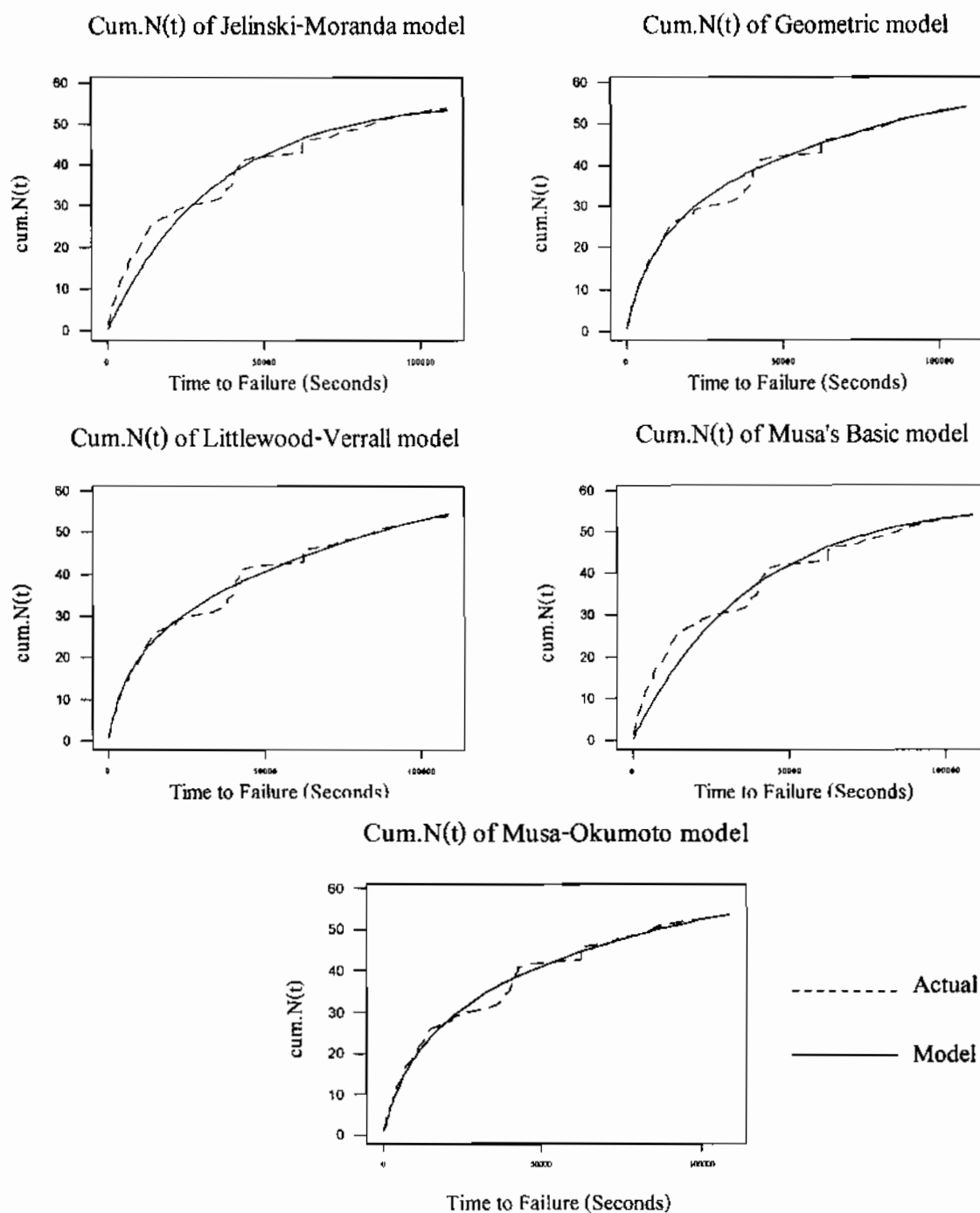


ภาพที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

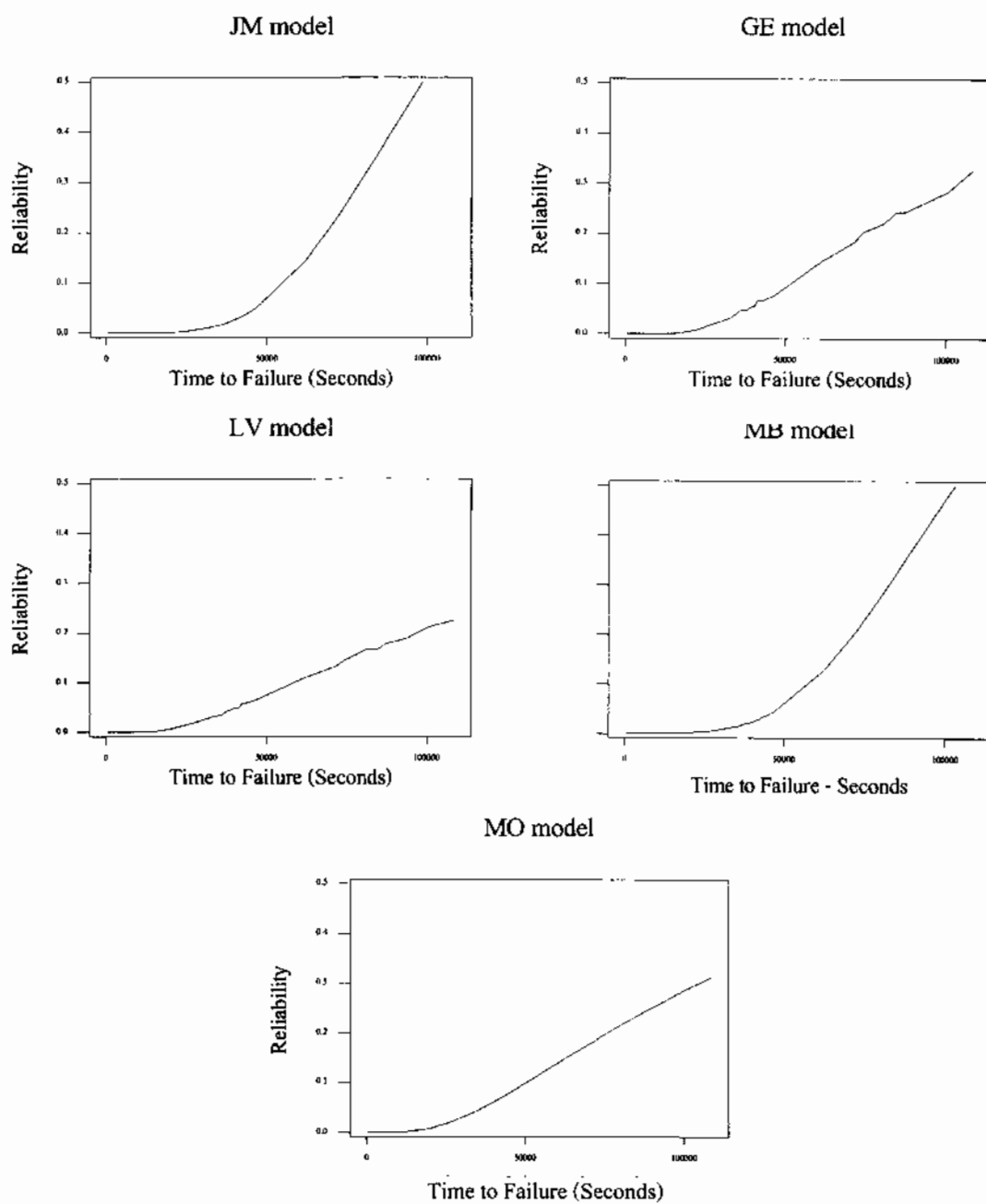
ตารางที่ 4-4 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	245.427
Geometric	237.386
Littlewood-Verrall	236.563
Musa's Basic	241.843
Musa-Okumoto	237.165

จากภาพที่ 4-8 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวแบบอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบตัวแบบ JM และ MB มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ (∞) ดังนั้นตัวแบบอื่น ๆ (GE LV และ MO) จึงเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากกว่าตัวแบบ JM และ MB และจากตารางที่ 4-4 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-9 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



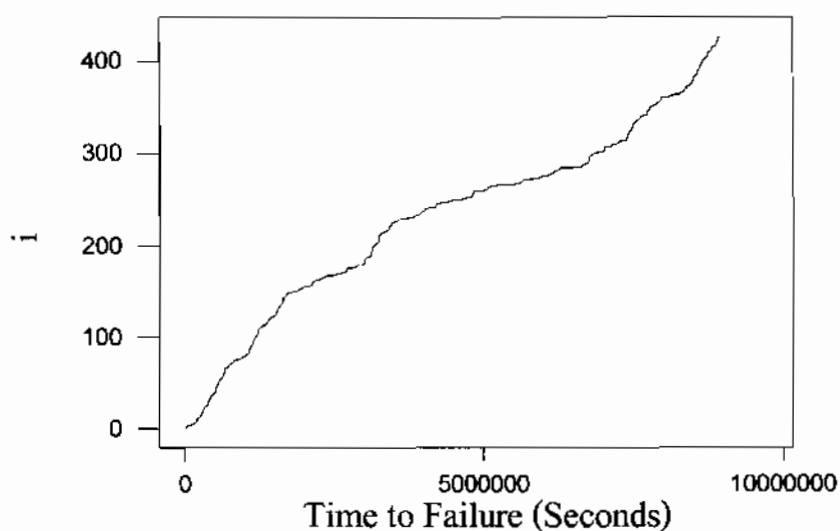
ภาพที่ 4-9 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 2



ภาพที่ 4-10 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 2

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 3

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ Flight Dynamic คำสั่งประมาณ 22,500 บรรทัด จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 431 จุด จากเวลาการทดสอบ 8,959,100 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลามีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-11



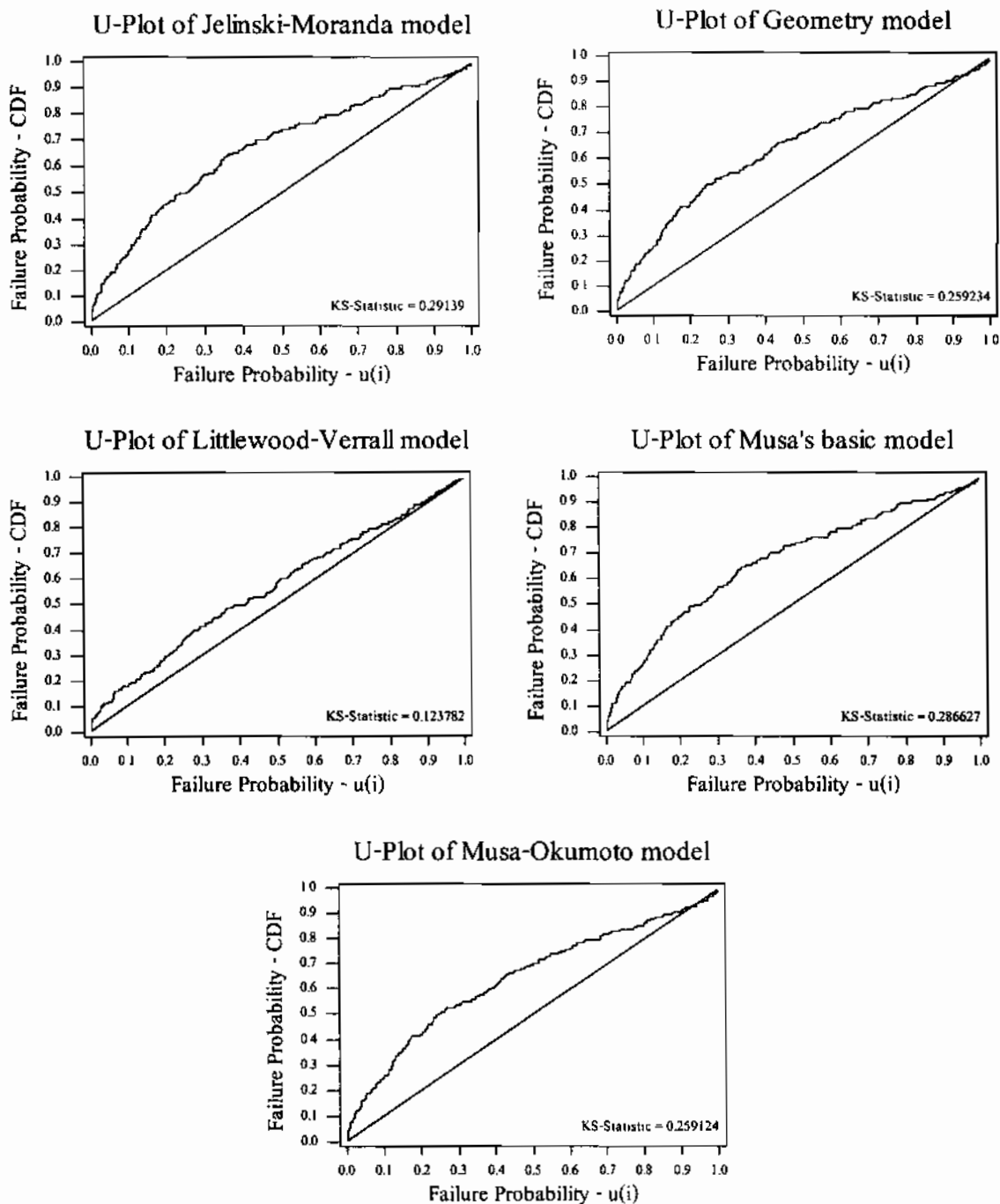
ภาพที่ 4-11 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 3

ตารางที่ 4-5 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric

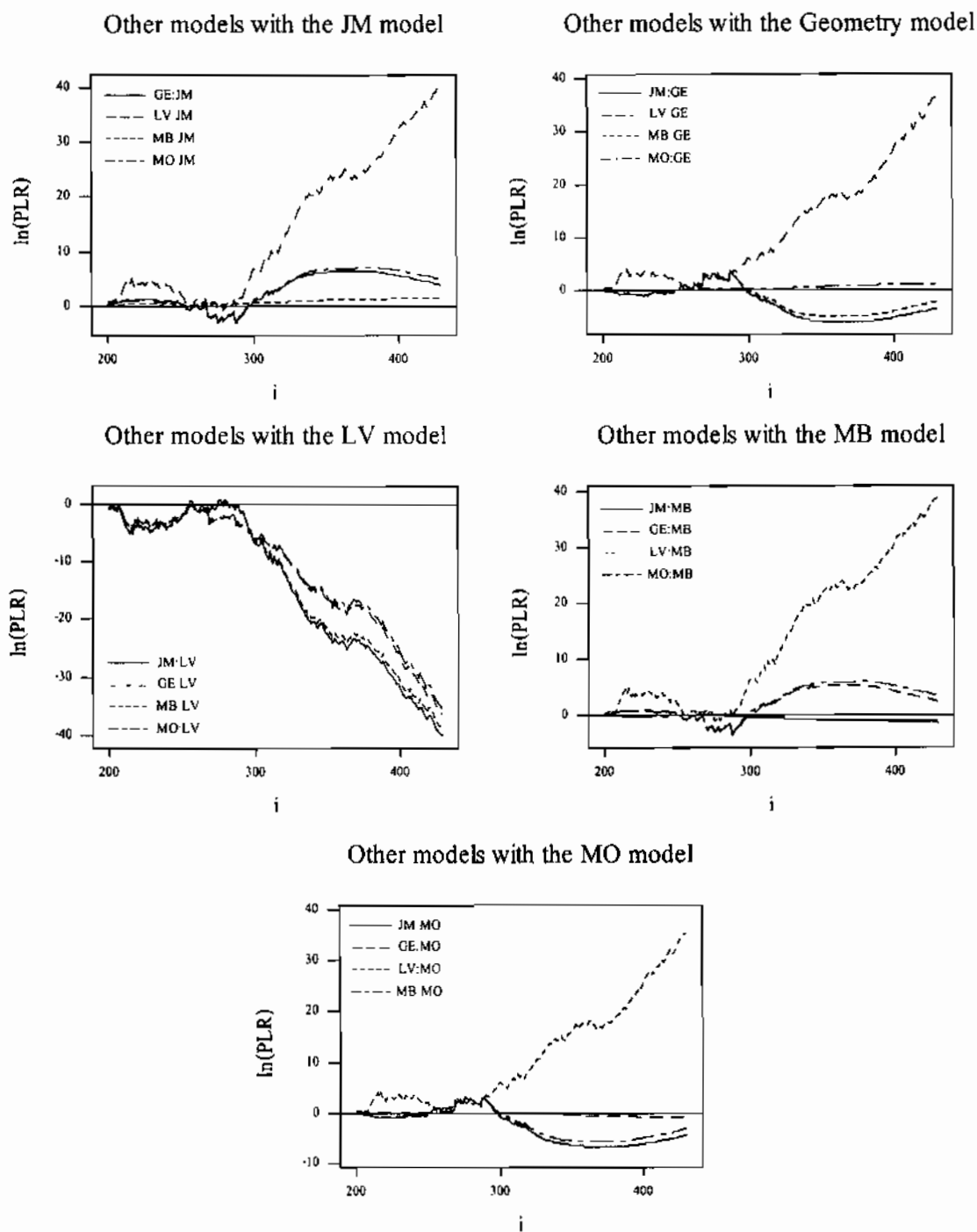
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.29139
Geometric	0.259234
Littlewood-Verrall	0.123782
Musa's Basic	0.296627
Musa-Okumoto	0.259124

จากภาพที่ 4-12 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-5 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

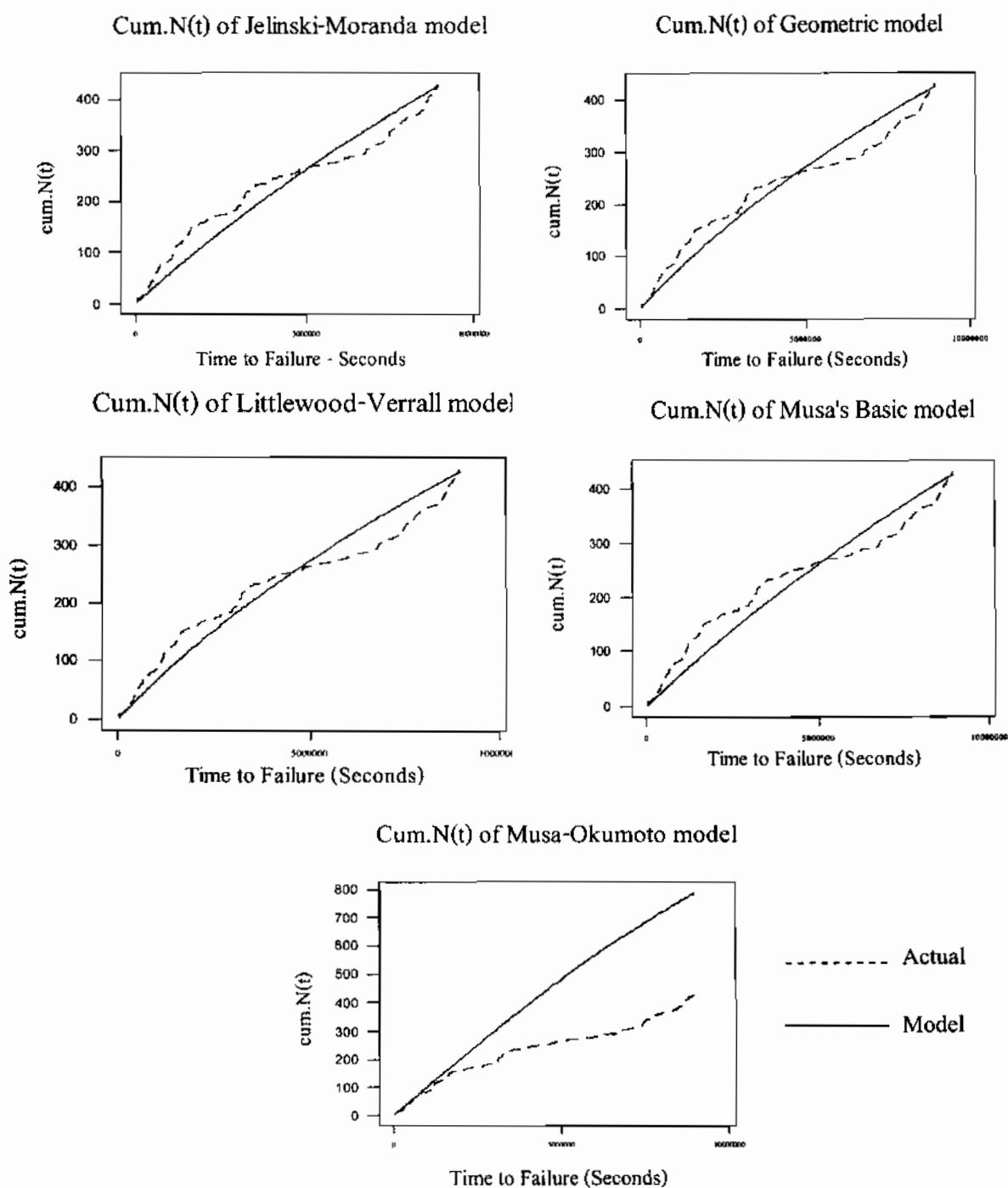


ภาพที่ 4-13 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

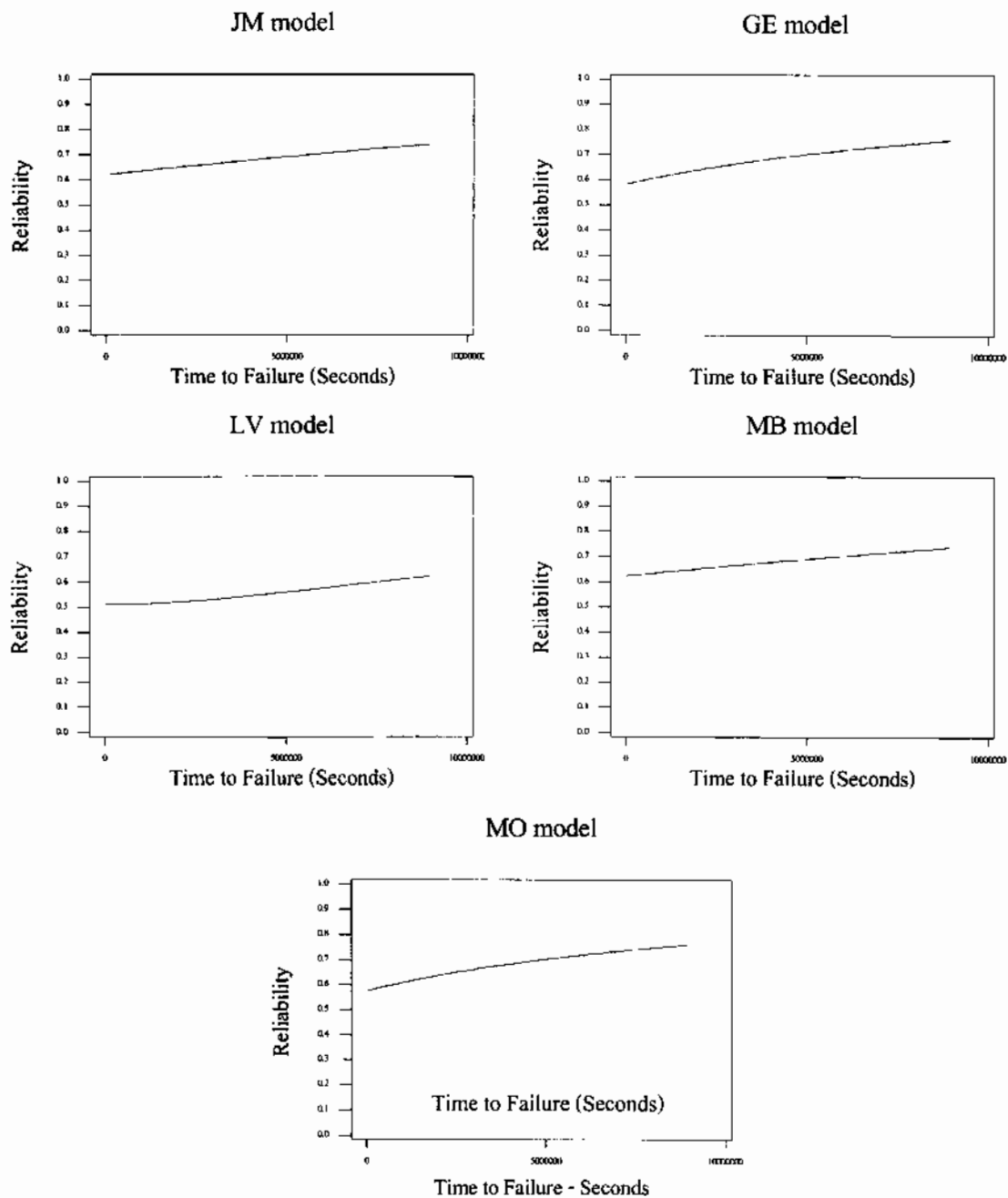
ตารางที่ 4-6 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	2582.138
Geometric	2578.138
Littlewood-Verrall	2542.693
Musa's Basic	2581.485
Musa-Okumoto	2578.144

จากภาพที่ 4-13 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-14 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-14 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5
สำหรับข้อมูลชุดที่ 3



ภาพที่ 4-15 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 3

4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 4

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ Tropico R-1500 ของ Brazilian Electronic Switching System เขียนด้วยภาษา Assembly จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 162 จุด จากเวลาการทดสอบ 109,661 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลา มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-16



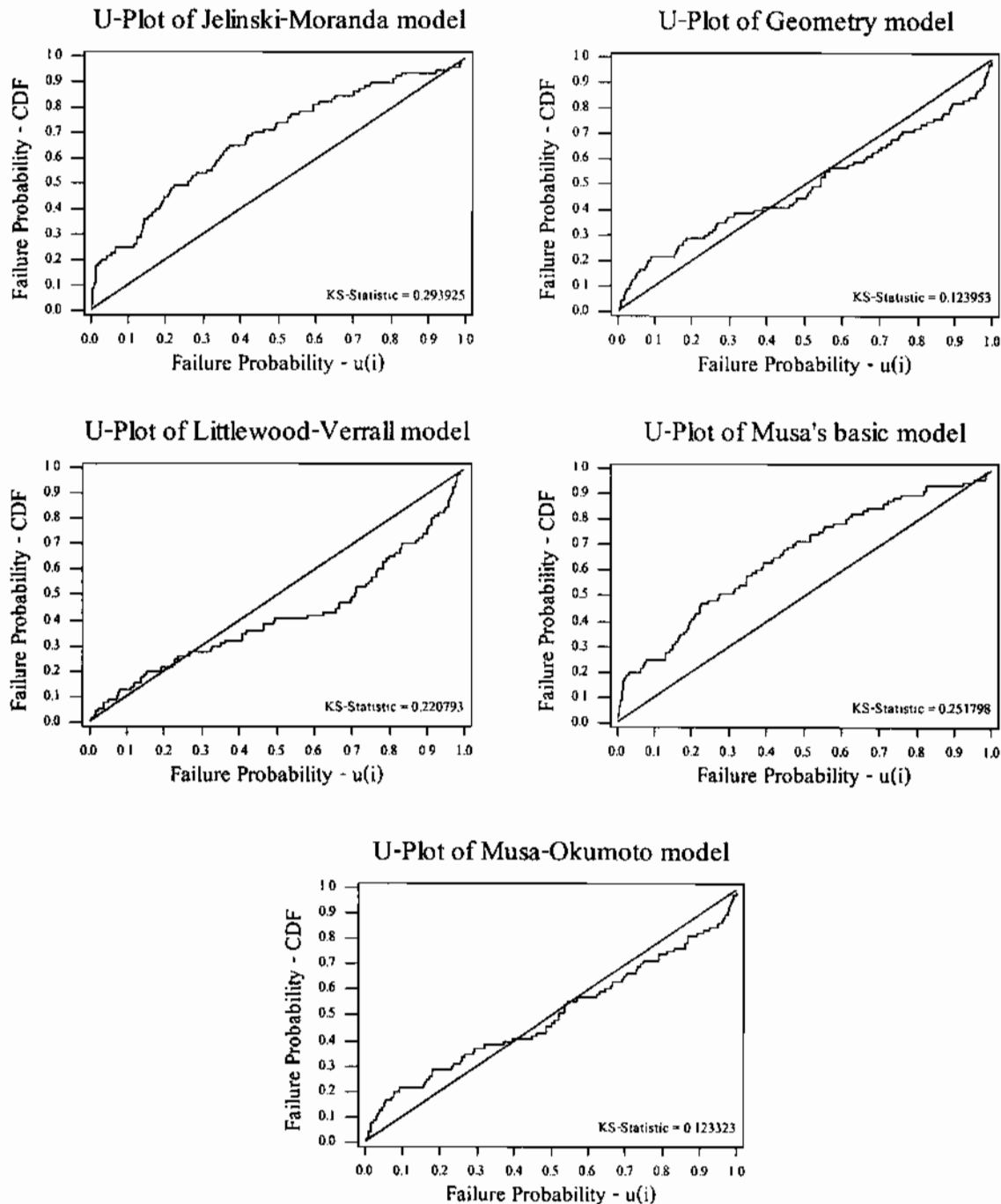
ภาพที่ 4-16 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 4

ตารางที่ 4-7 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric

ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

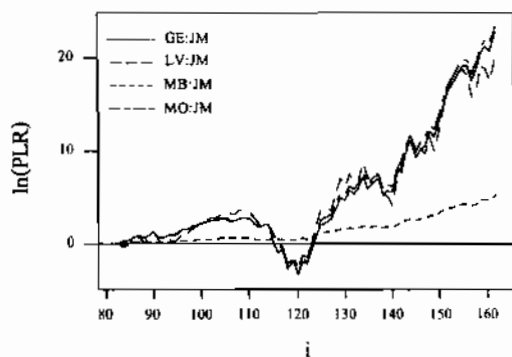
ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.293925
Geometric	0.123953
Littlewood-Verrall	0.220793
Musa's Basic	0.251798
Musa-Okumoto	0.123323

จากภาพที่ 4-17 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Musa-Okumoto มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-7 พบว่าตัวแบบ Musa-Okumoto มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Musa-Okumoto จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด

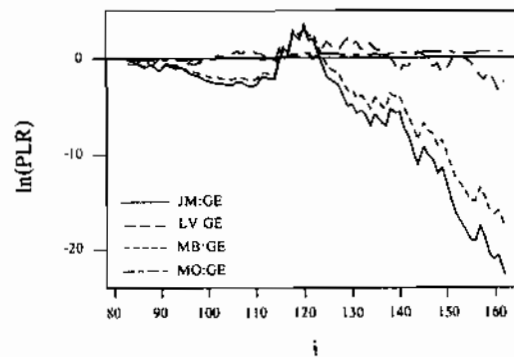


ภาพที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

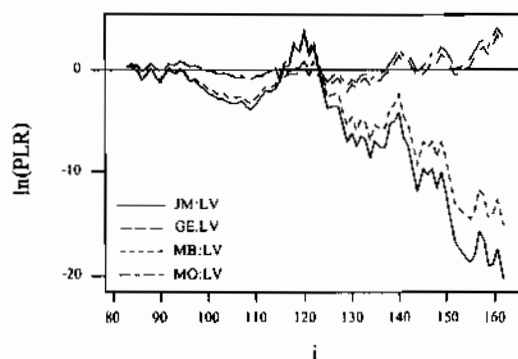
Other models with the JM model



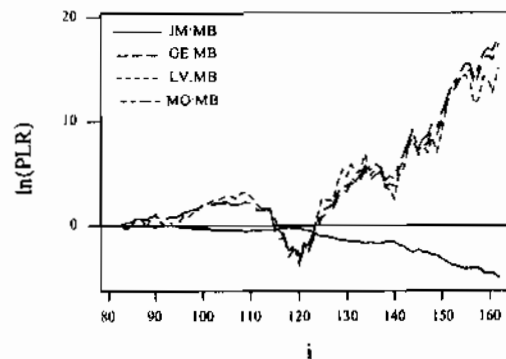
Other models with the Geometry model



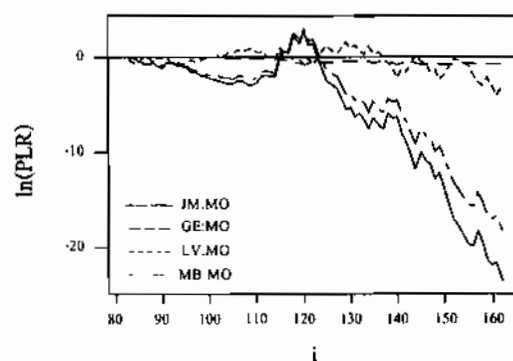
Other models with the LV model



Other models with the MB model



Other models with the MO model

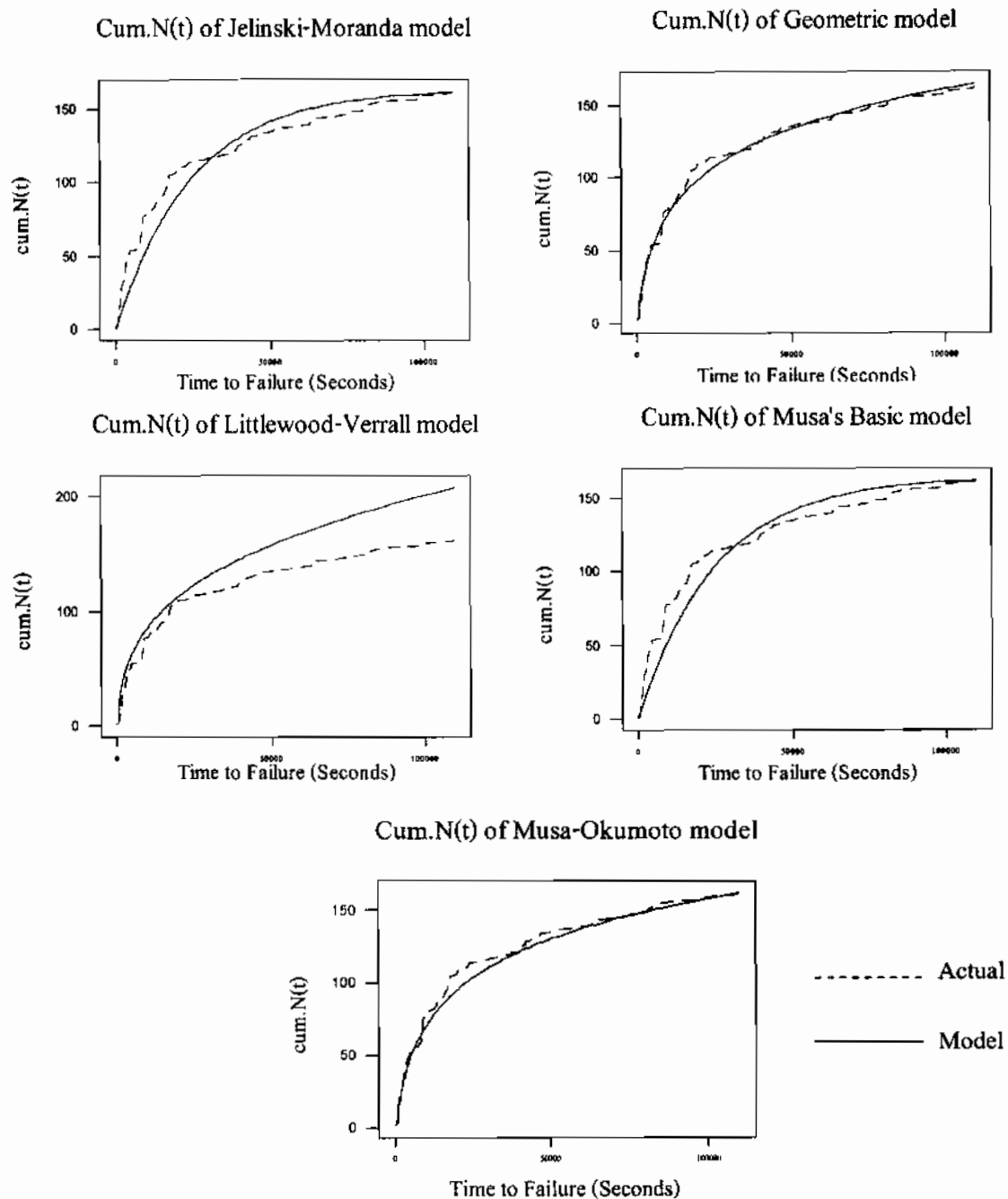


ภาพที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

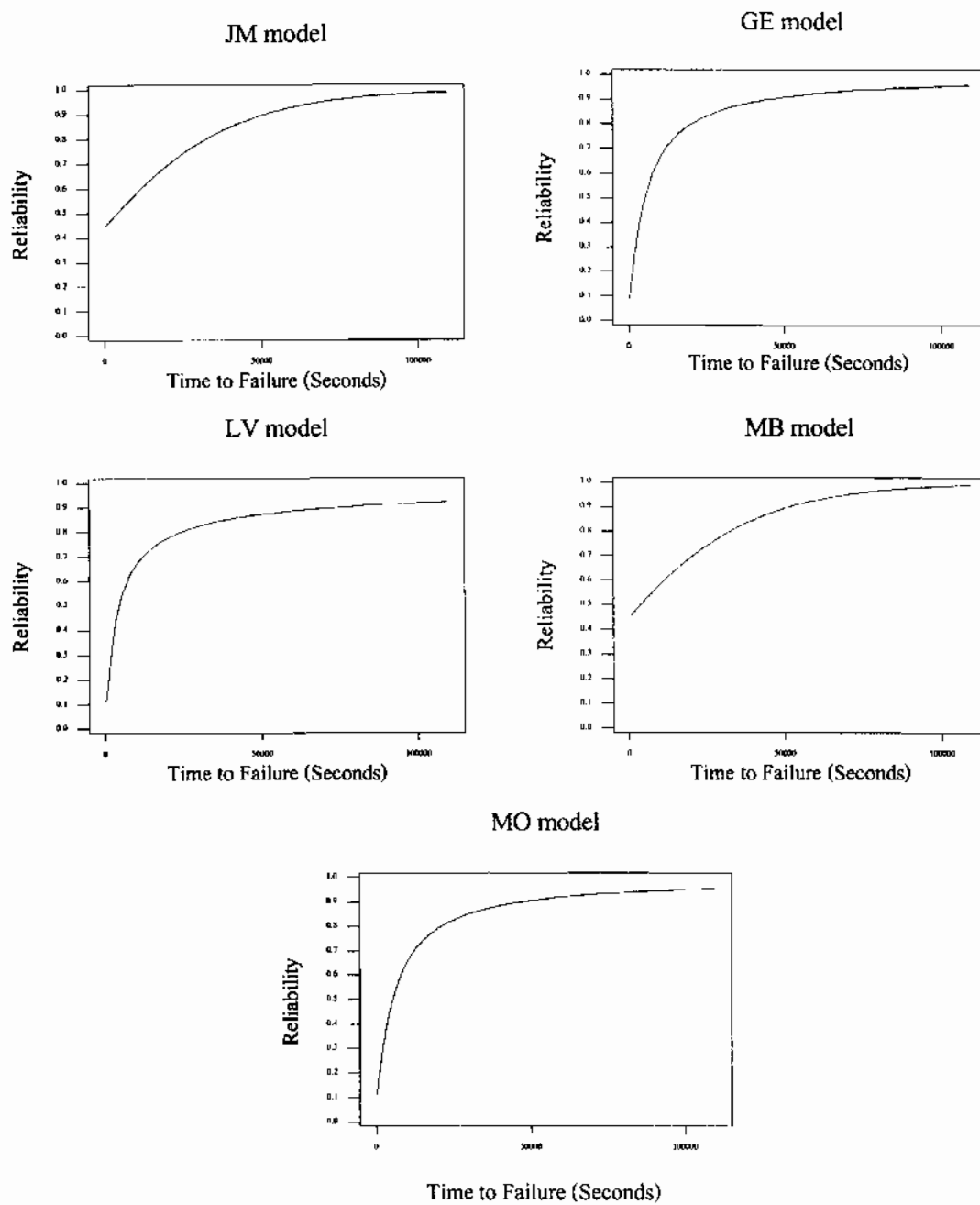
ตารางที่ 4-8 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	654.952
Geometric	632.217
Littlewood-Verrall	634.633
Musa's Basic	649.794
Musa-Okumoto	631.510

จากภาพที่ 4-18 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ตัวแบบอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ GE มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอนันต์ทางด้านลบ ดังนั้น ตัวแบบ GE น่าจะเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ นอกจากนี้ พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ตัวแบบอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ MO มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าอนันต์ทางด้านลบ เช่นเดียวกัน ดังนั้น ตัวแบบ MO น่าจะเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ด้วย แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายจากตารางที่ 4-8 แล้วพบว่า ค่า $-\ln(PL)$ ของตัวแบบ MO มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้น ตัวแบบ Musa-Okumoto จึงเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากภาพที่ 4-19 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $cum.N(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Musa-Okumoto จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



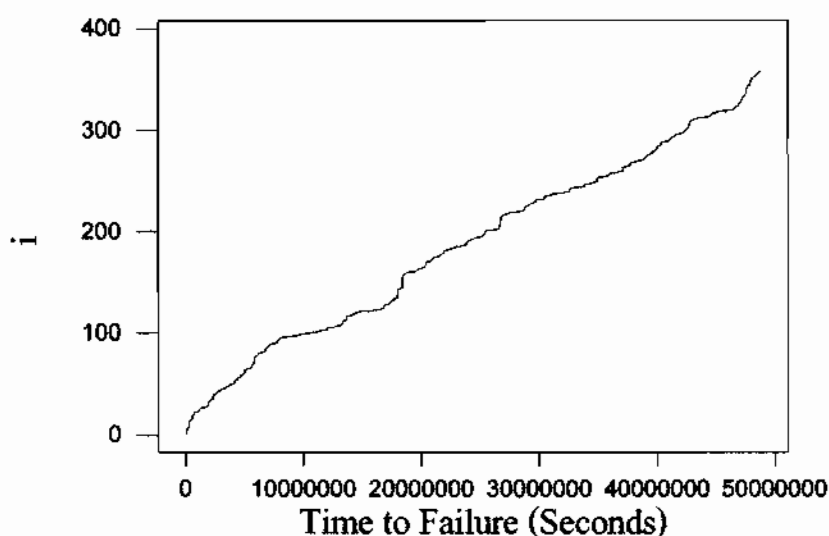
ภาพที่ 4-19 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 4



ภาพที่ 4-20 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 4

4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 5

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ Tropico R-4096 ของ Brazilian Electronic Switching System เขียนด้วยภาษา Assembly จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 357 จุด จากเวลาการทดสอบ 48,726,186 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลา มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 5

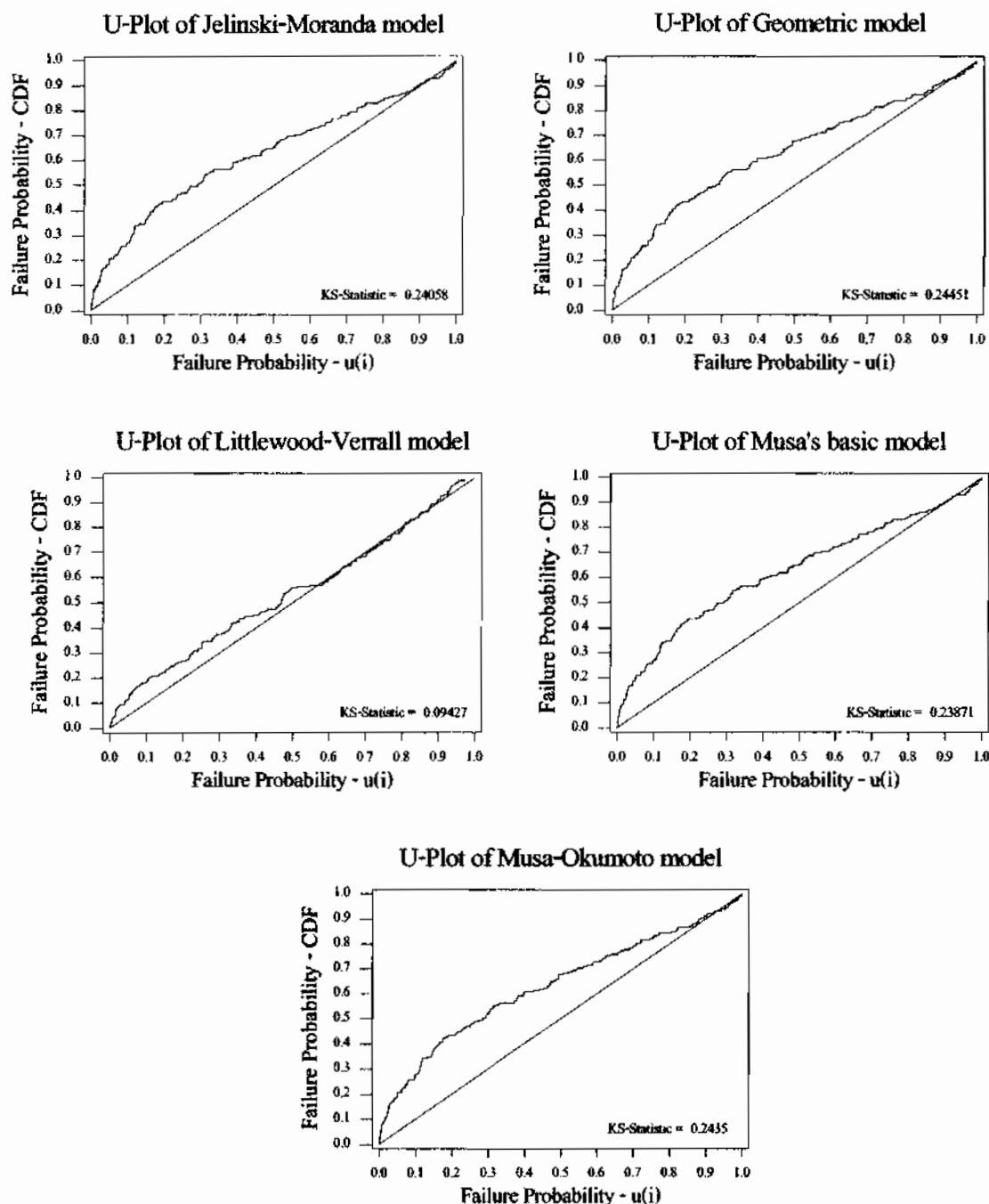
ตารางที่ 4-9 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric

ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto

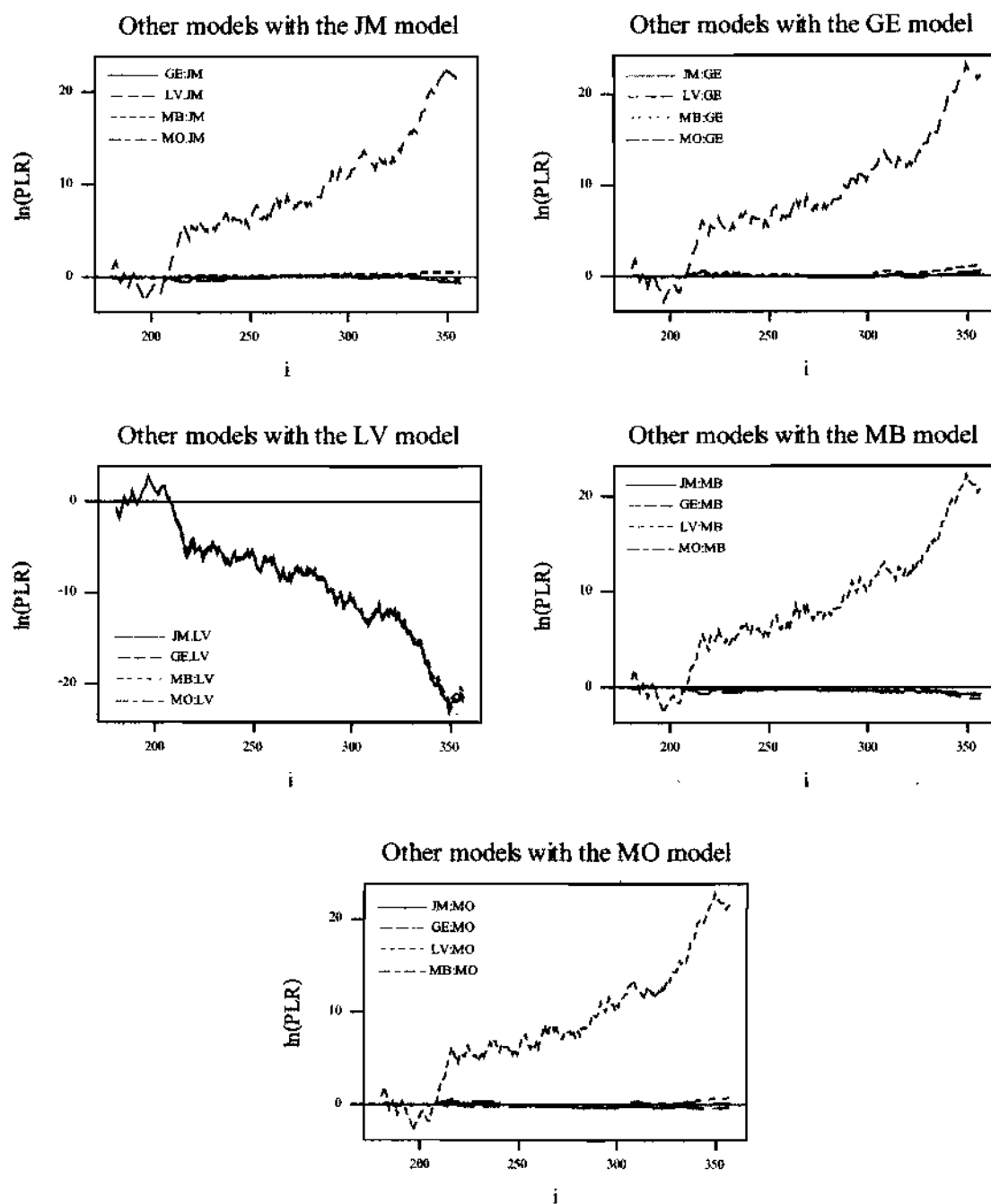
สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.24058
Geometric	0.24451
Littlewood-Verrall	0.09427
Musa's Basic	0.23871
Musa-Okumoto	0.24350

จากภาพที่ 4-22 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ จึงถูกเลือกมากที่สุด และจากตารางที่ 4-9 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

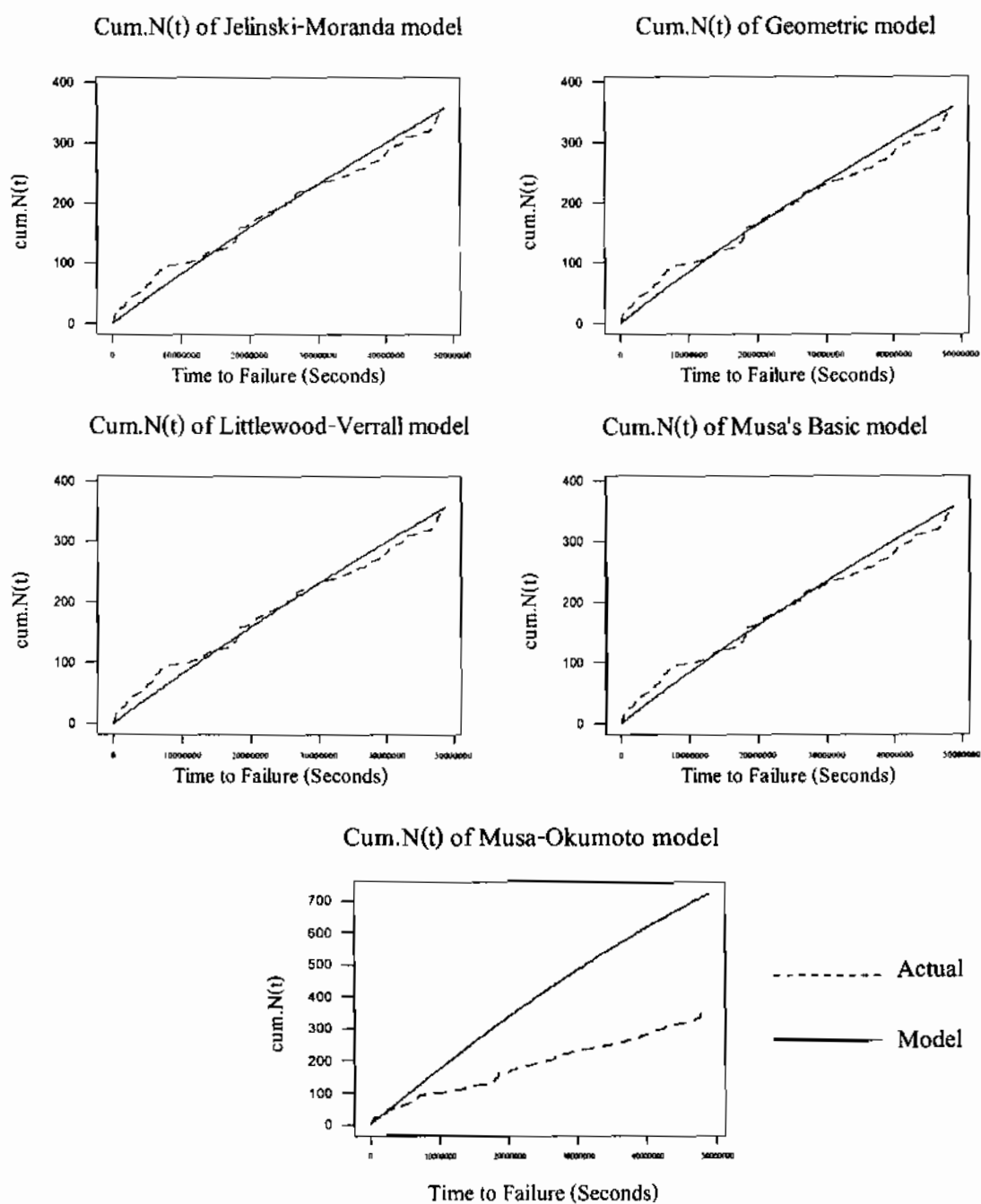


ภาพที่ 4-23 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

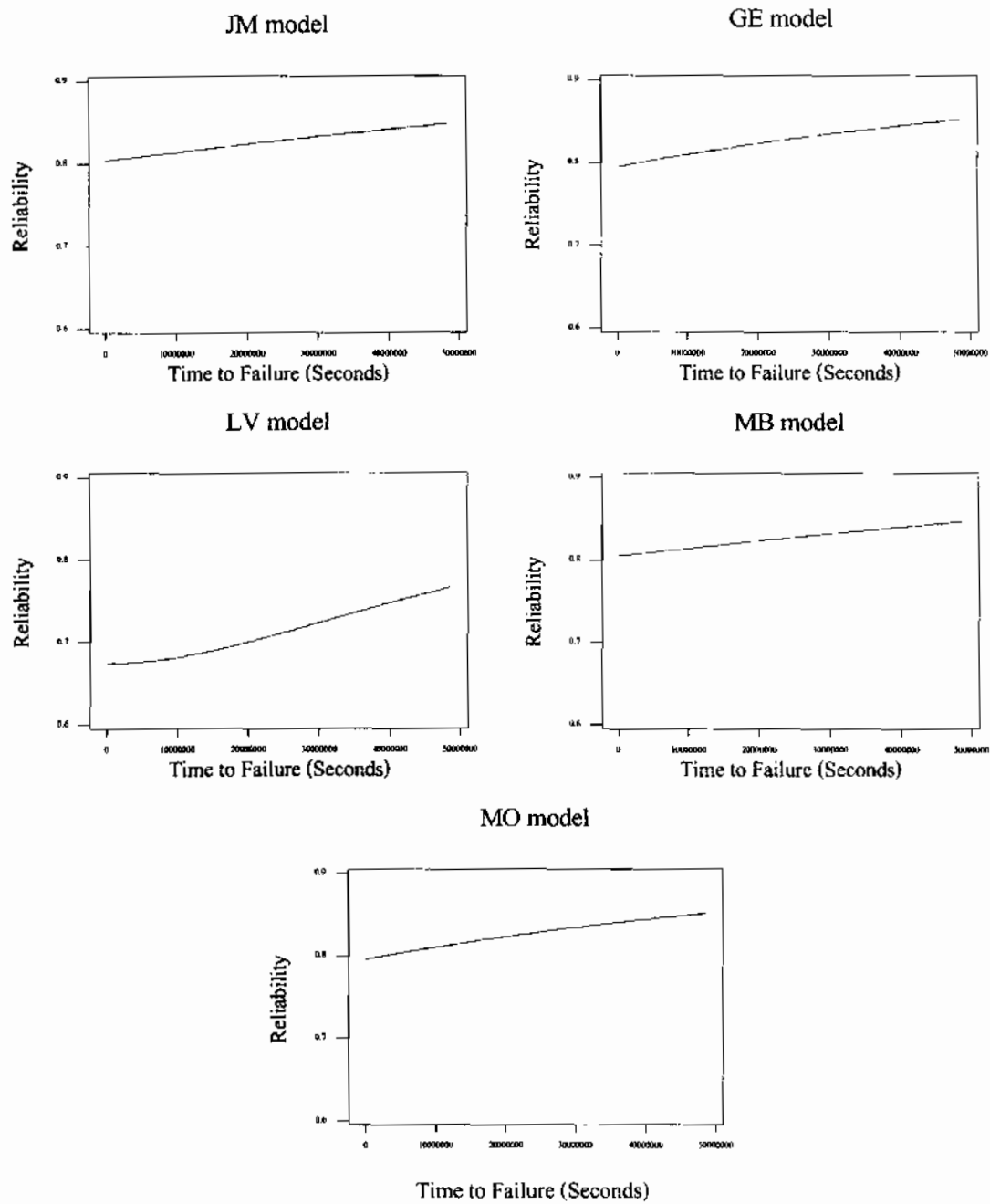
ตารางที่ 4-10 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	2306.89
Geometric	2307.45
Littlewood-Verrall	2285.56
Musa's Basic	2306.28
Musa-Okumoto	2307.11

จากภาพที่ 4-23 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-24 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



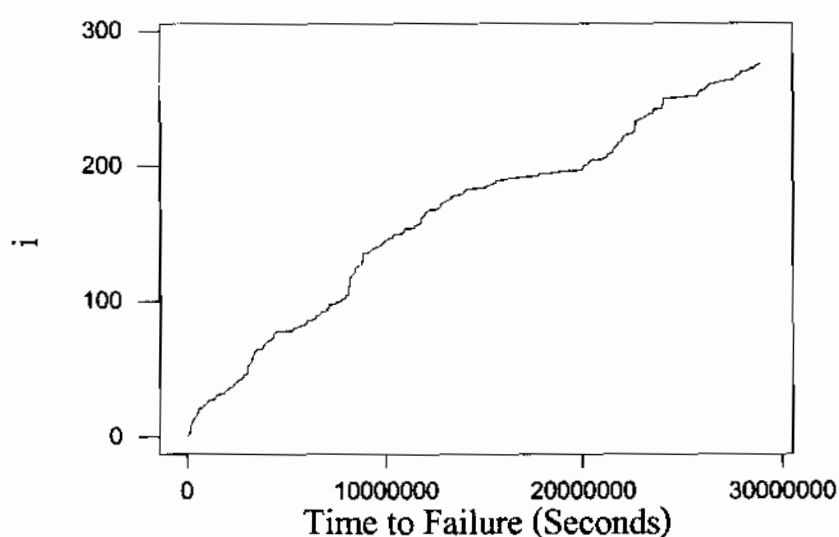
ภาพที่ 4-24 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 5



ภาพที่ 4-25 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 5

4.6 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 6

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ควบคุมระบบเวลาเขียนด้วยภาษา PL/I ใช้คำสั่งประมาณ 200,000บรรทัด จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 276 จุด จากเวลาการทดสอบ 28,903,760 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลาที่มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-26

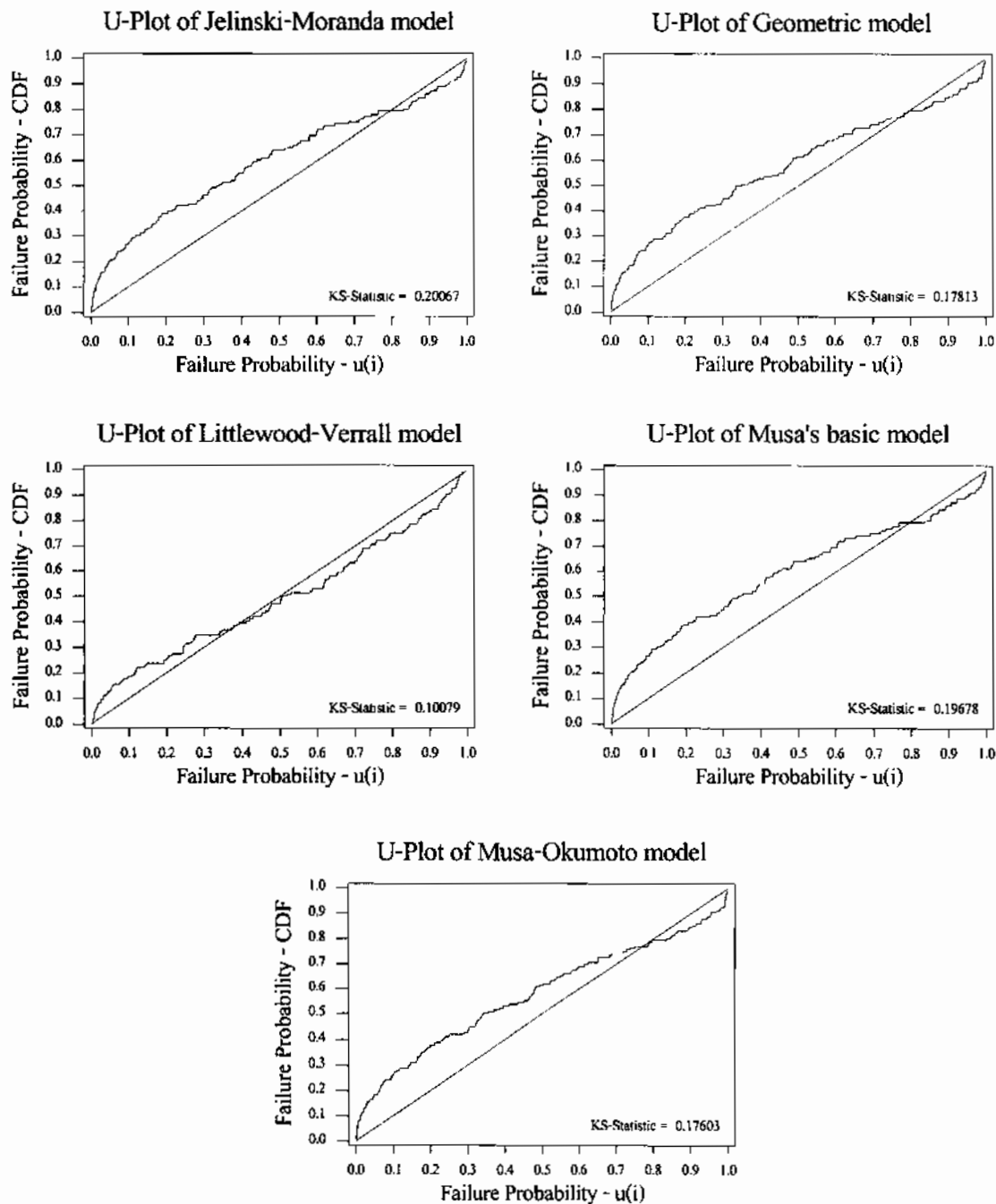


ภาพที่ 4-26 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 6

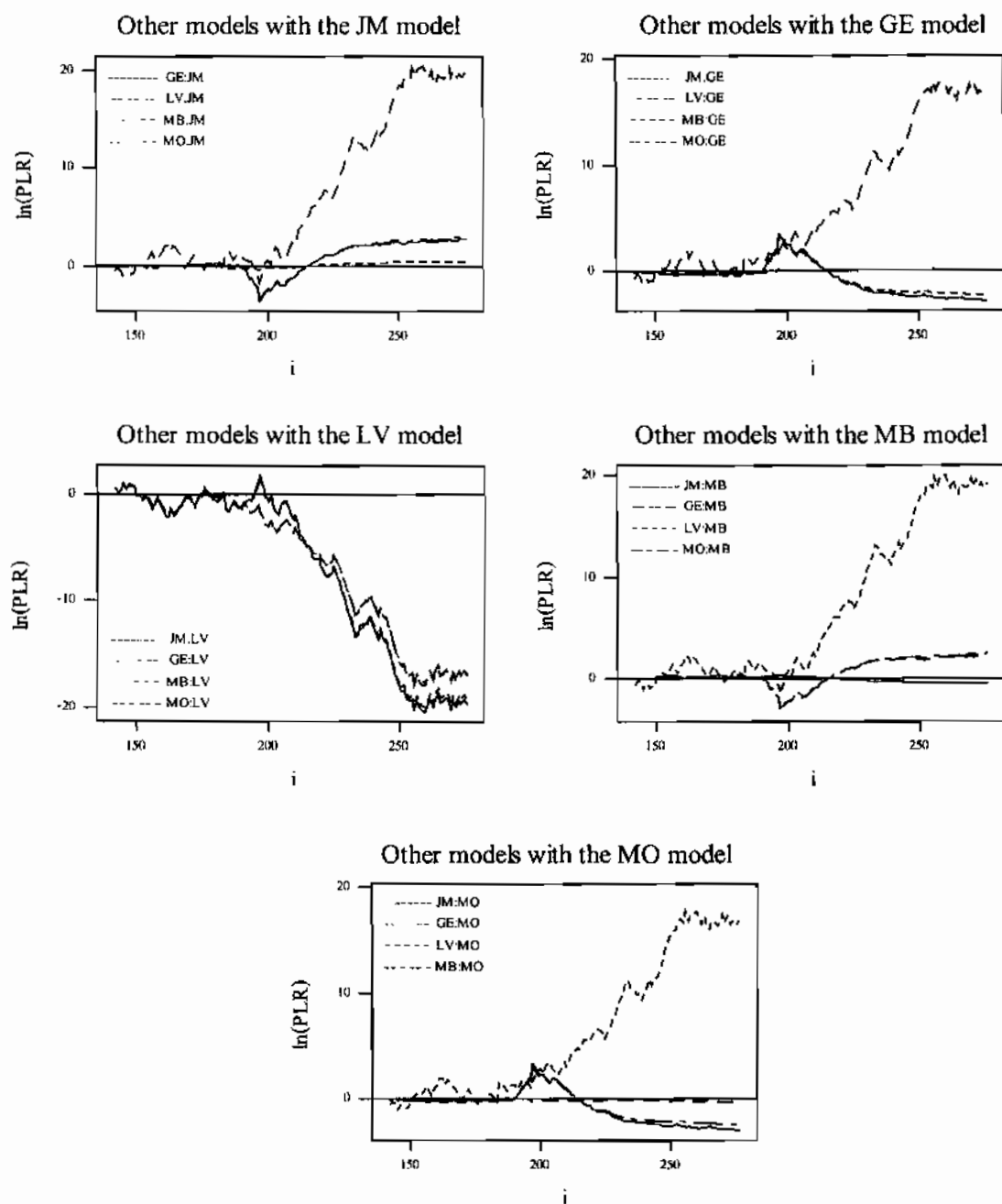
ตารางที่ 4-11 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric Littlewood-Verrall Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.20067
Geometric	0.17813
Littlewood-Verrall	0.10079
Musa's Basic	0.19678
Musa-Okumoto	0.17603

จากภาพที่ 4-27 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-11 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-27 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

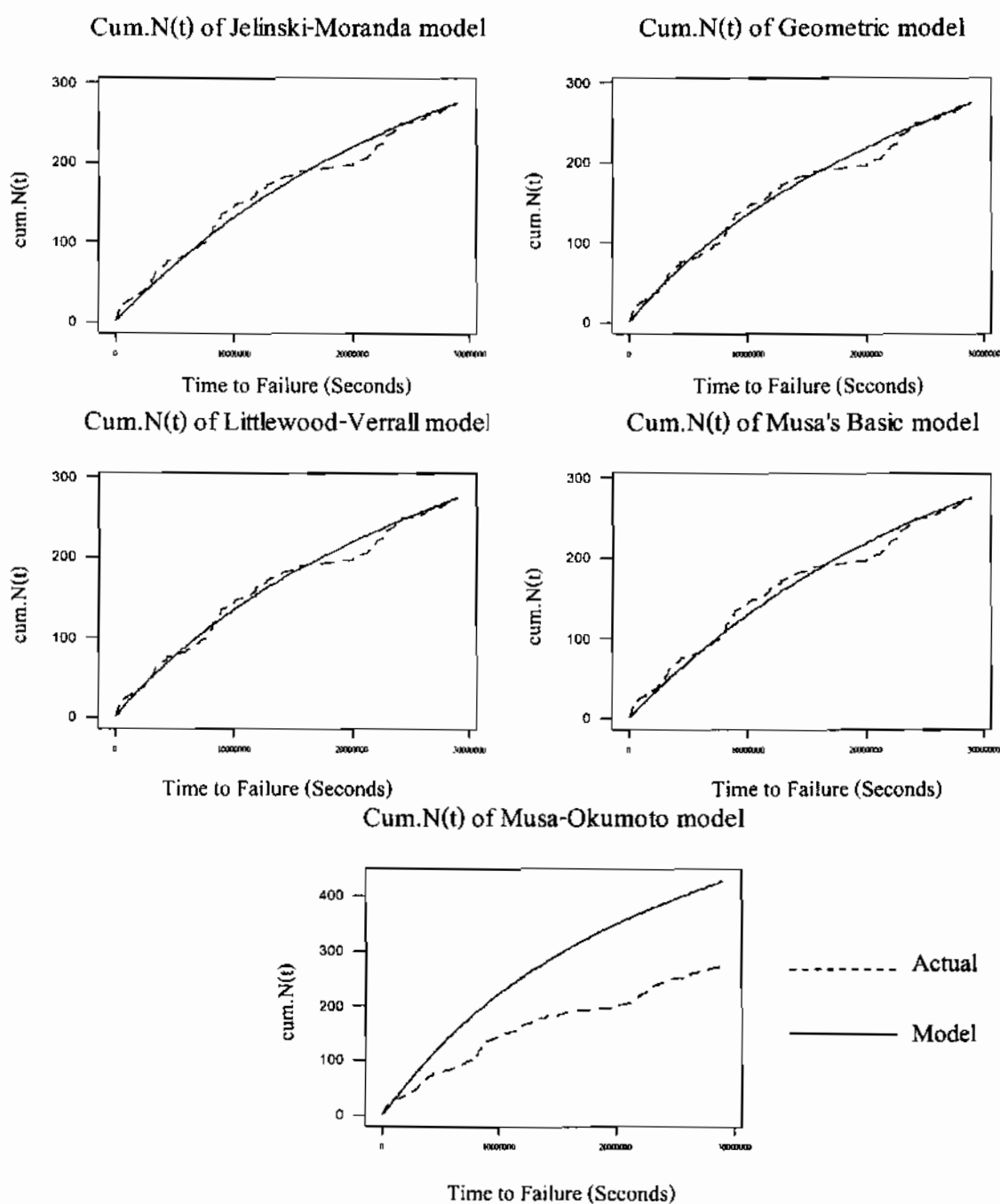


ภาพที่ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

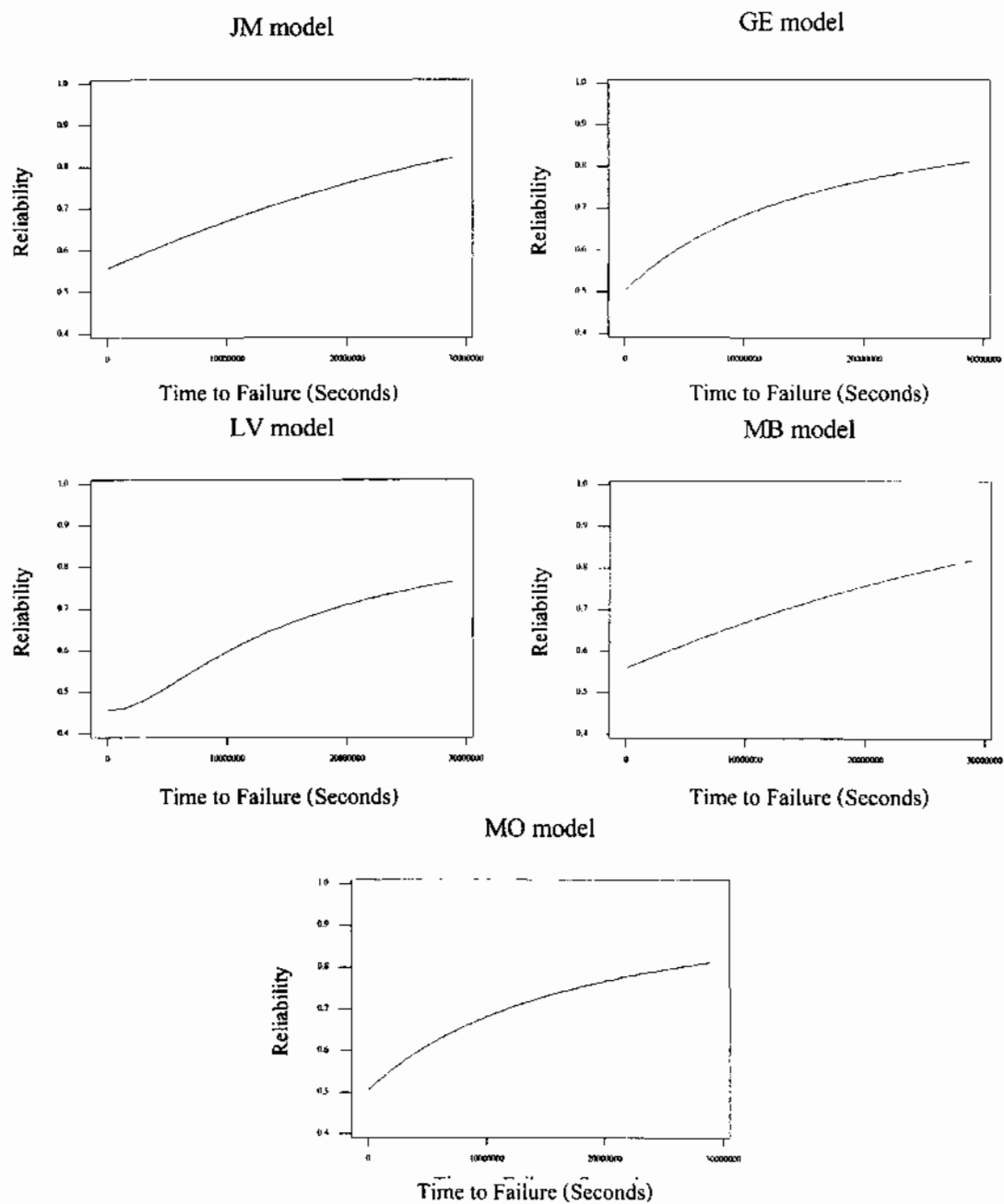
ตารางที่ 4-12 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	1746.01
Geometric	1743.26
Littlewood-Verrall	1726.28
Musa's Basic	1745.51
Musa-Okumoto	1743.06

จากภาพที่ 4-28 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-29 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



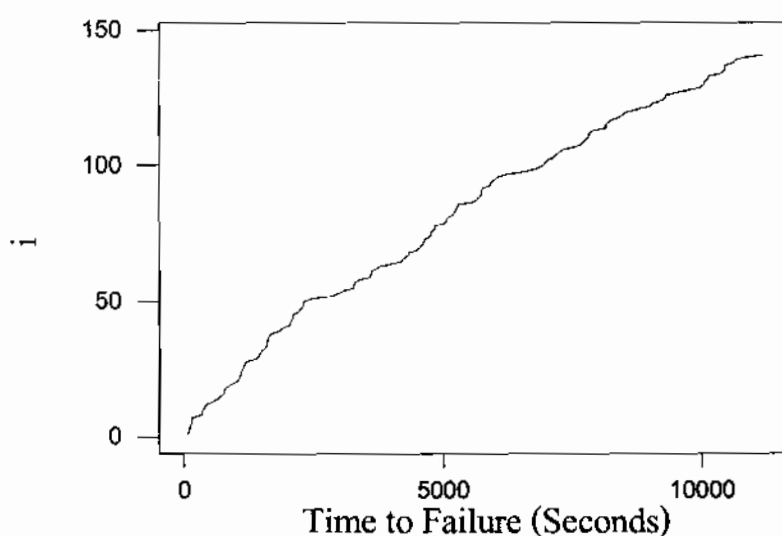
ภาพที่ 4-29 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 6



ภาพที่ 4-30 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 6

4.7 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 7

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ควบคุมเวลา เขียนด้วยภาษา PL/I ใช้คำสั่งประมาณ 500,000บรรทัด จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 207 จุด จากเวลาการทดสอบ 11,188 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลามีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-31

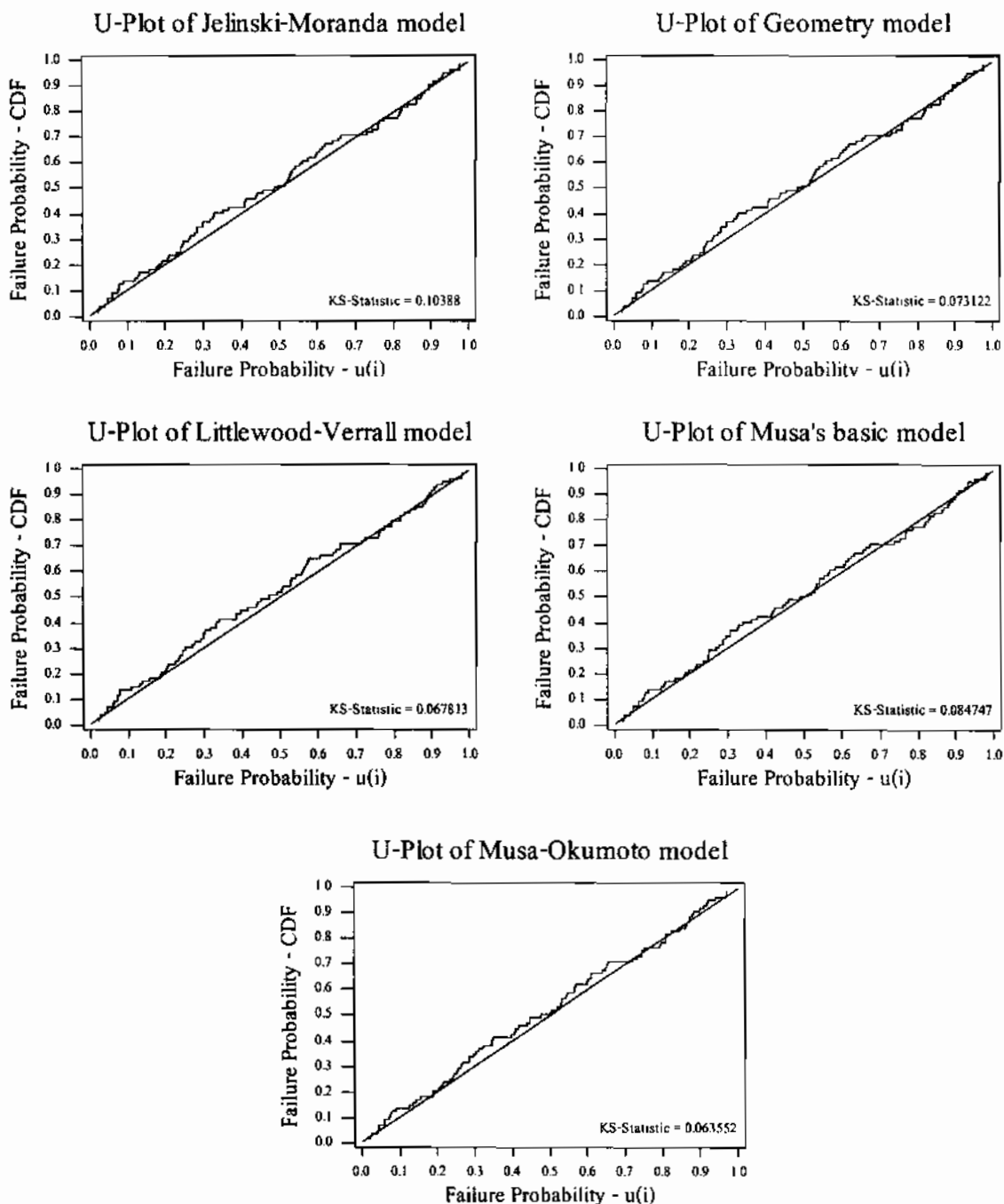


ภาพที่ 4-31 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 7

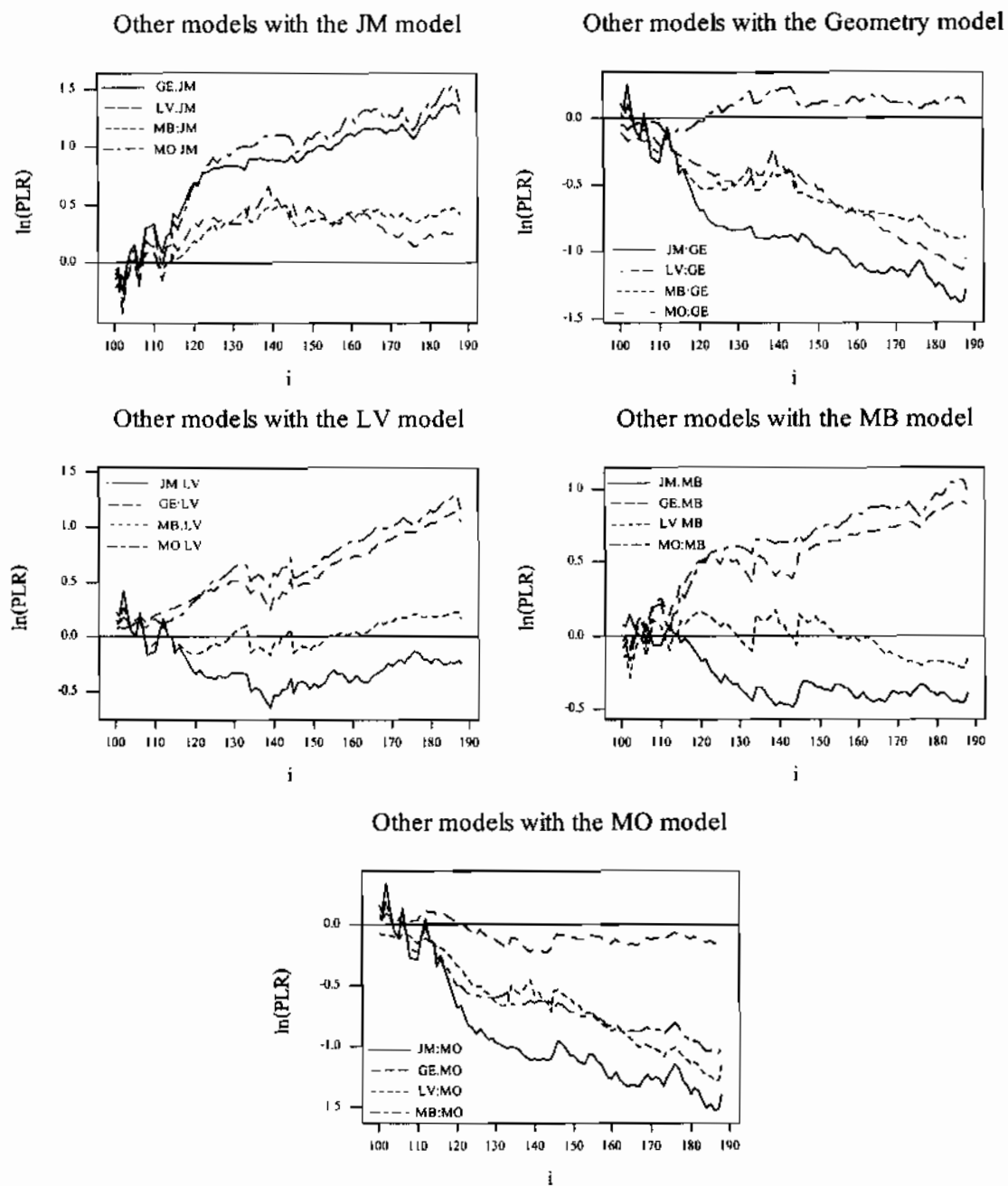
ตารางที่ 4-13 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.10388
Geometric	0.073122
Littlewood-Verrall	0.067813
Musa's Basic	0.084747
Musa-Okumoto	0.063552

จากภาพที่ 4-32 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Musa-Okumoto มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ ซึ่งทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-13 พบว่าตัวแบบ Musa-Okumoto มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Musa-Okumoto จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-32 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

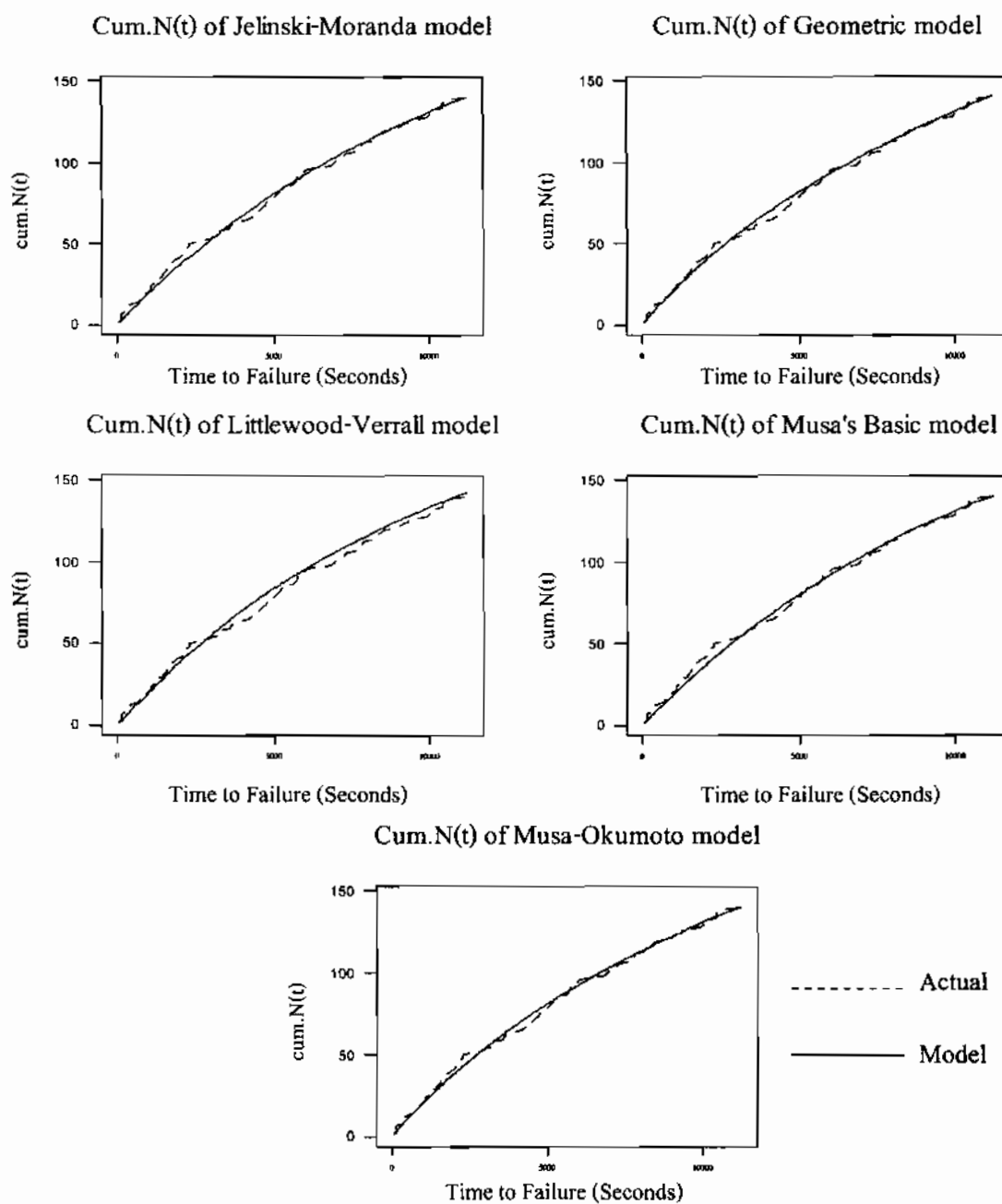


ภาพที่ 4-33 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

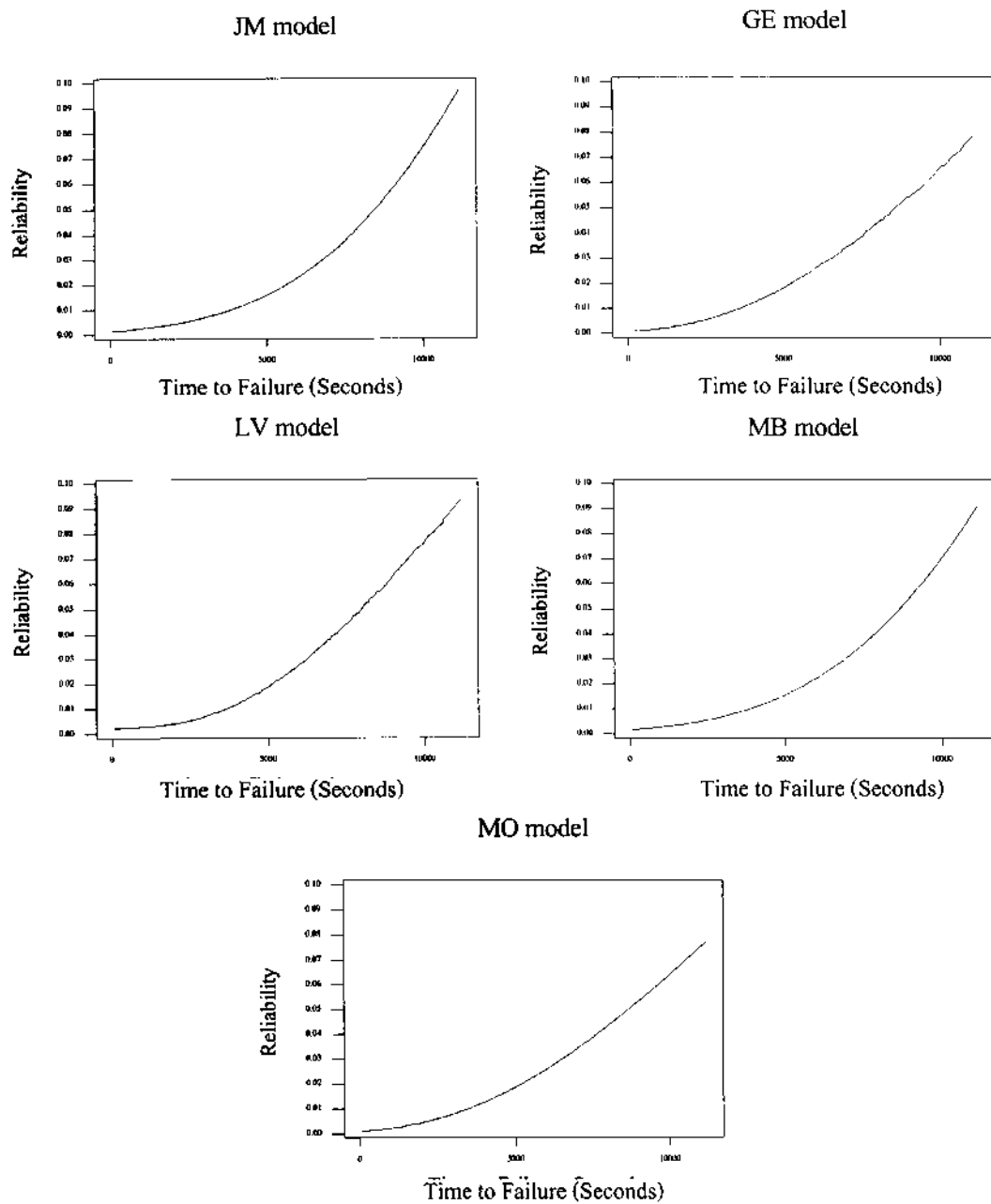
ตารางที่ 4-14 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	496.084
Geometric	494.784
Littlewood-Verrall	495.842
Musa's Basic	495.676
Musa-Okumoto	494.679

จากภาพที่ 4-33 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ MO มีแนวโน้มเข้าสู่
ศูนย์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ MO เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่
4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ MO มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัว
แบบ Musa-Okumoto เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-34 เป็นการเปรียบเทียบ
จำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่ง
แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Musa-Okumoto จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของ
ซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



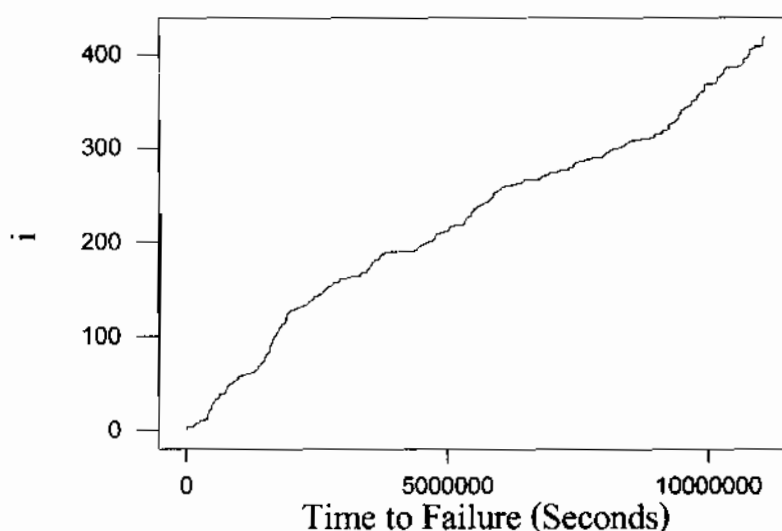
ภาพที่ 4-34 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5
สำหรับข้อมูลชุดที่ 7



ภาพที่ 4-35 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 7

4.8 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 8

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบรถไฟ เขียนด้วยภาษา Assemble ด้วยคำสั่งประมาณ 14,500 บรรทัด จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 544 จุด จากเวลาการทดสอบ 11,054,000 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลา มีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-36

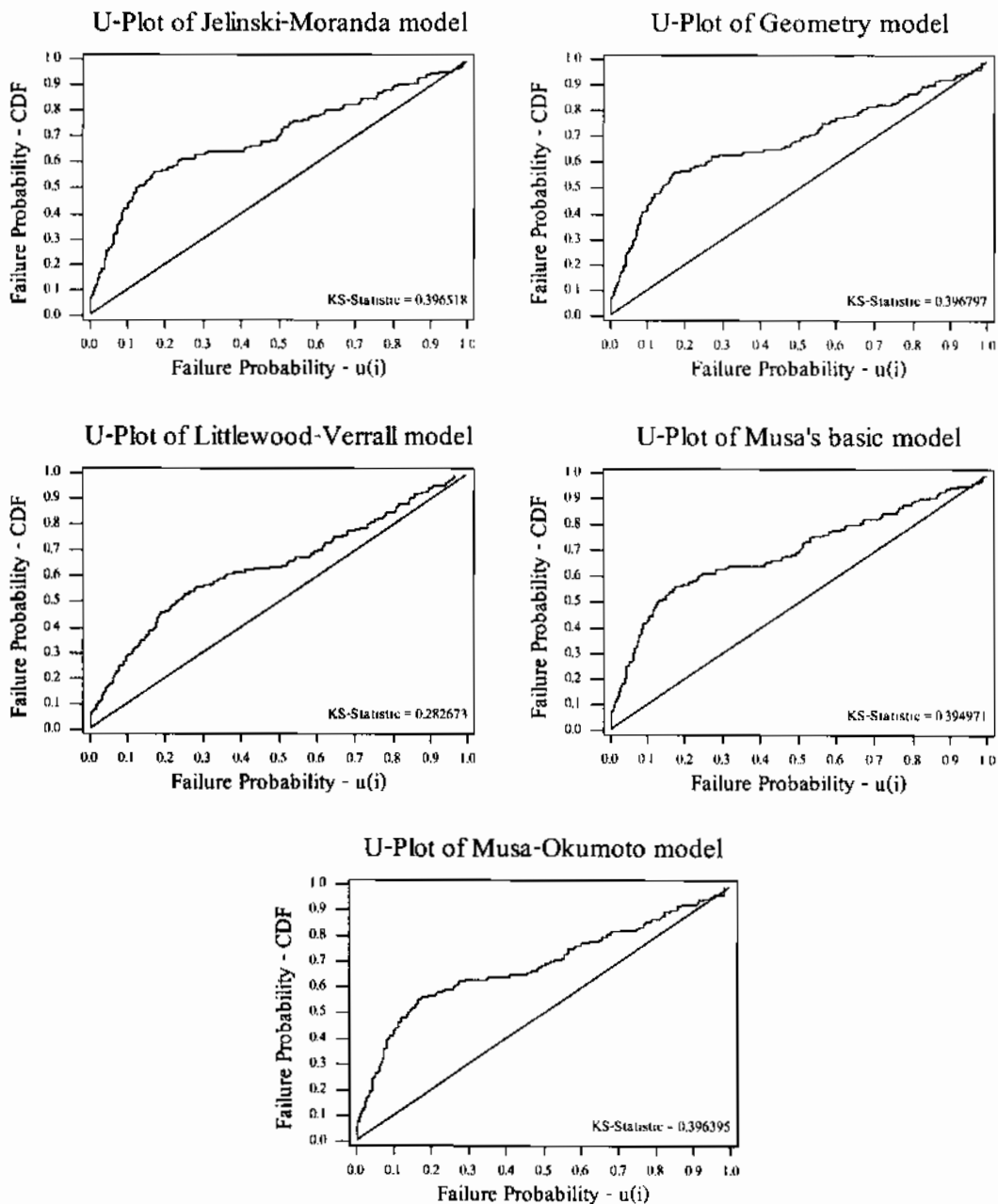


ภาพที่ 4-36 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 8

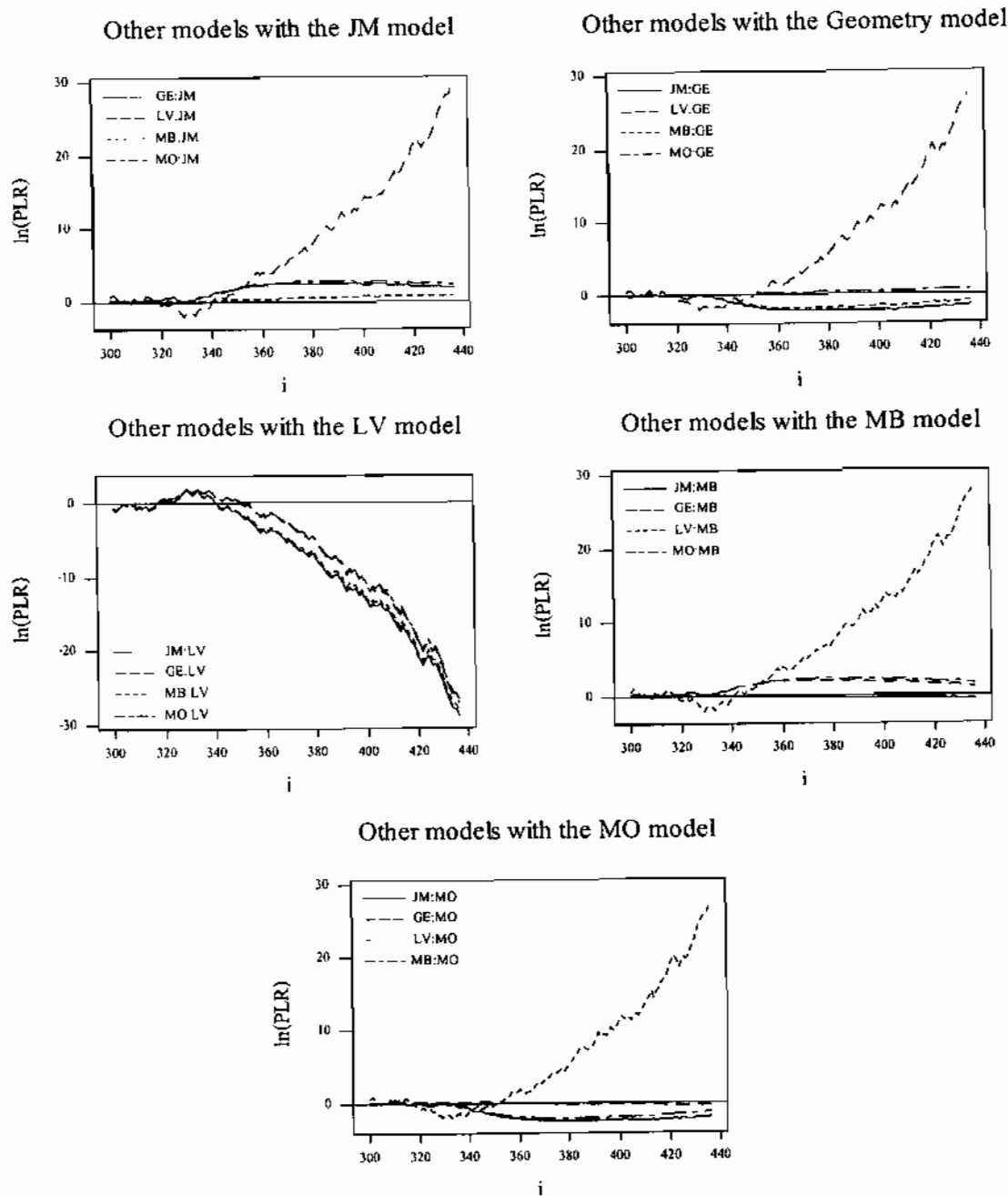
ตารางที่ 4-15 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.396518
Geometric	0.396797
Littlewood-Verrall	0.282673
Musa's Basic	0.394971
Musa-Okumoto	0.396395

จากภาพที่ 4-37 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-15 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-37 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

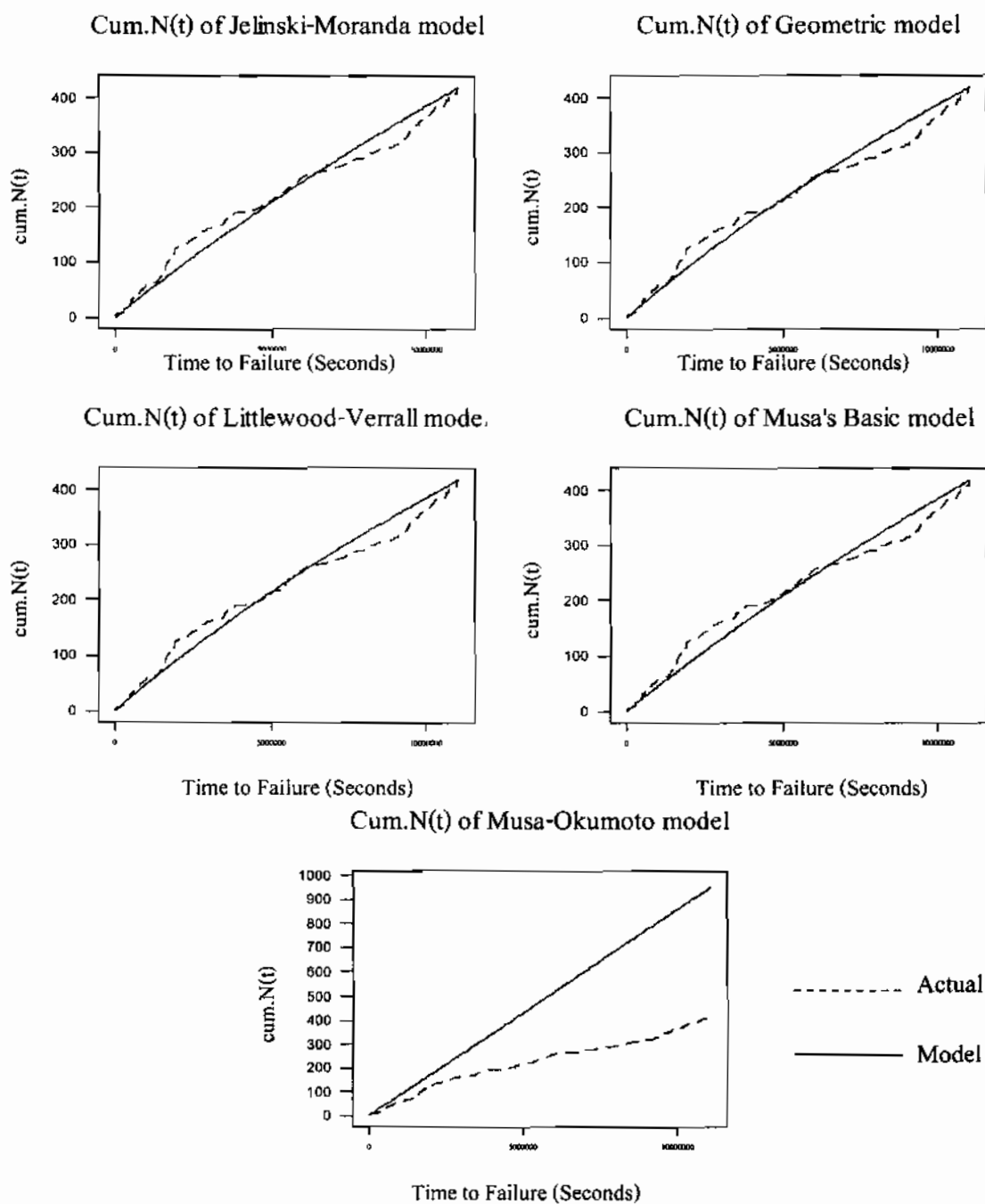


ภาพที่ 4-38 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

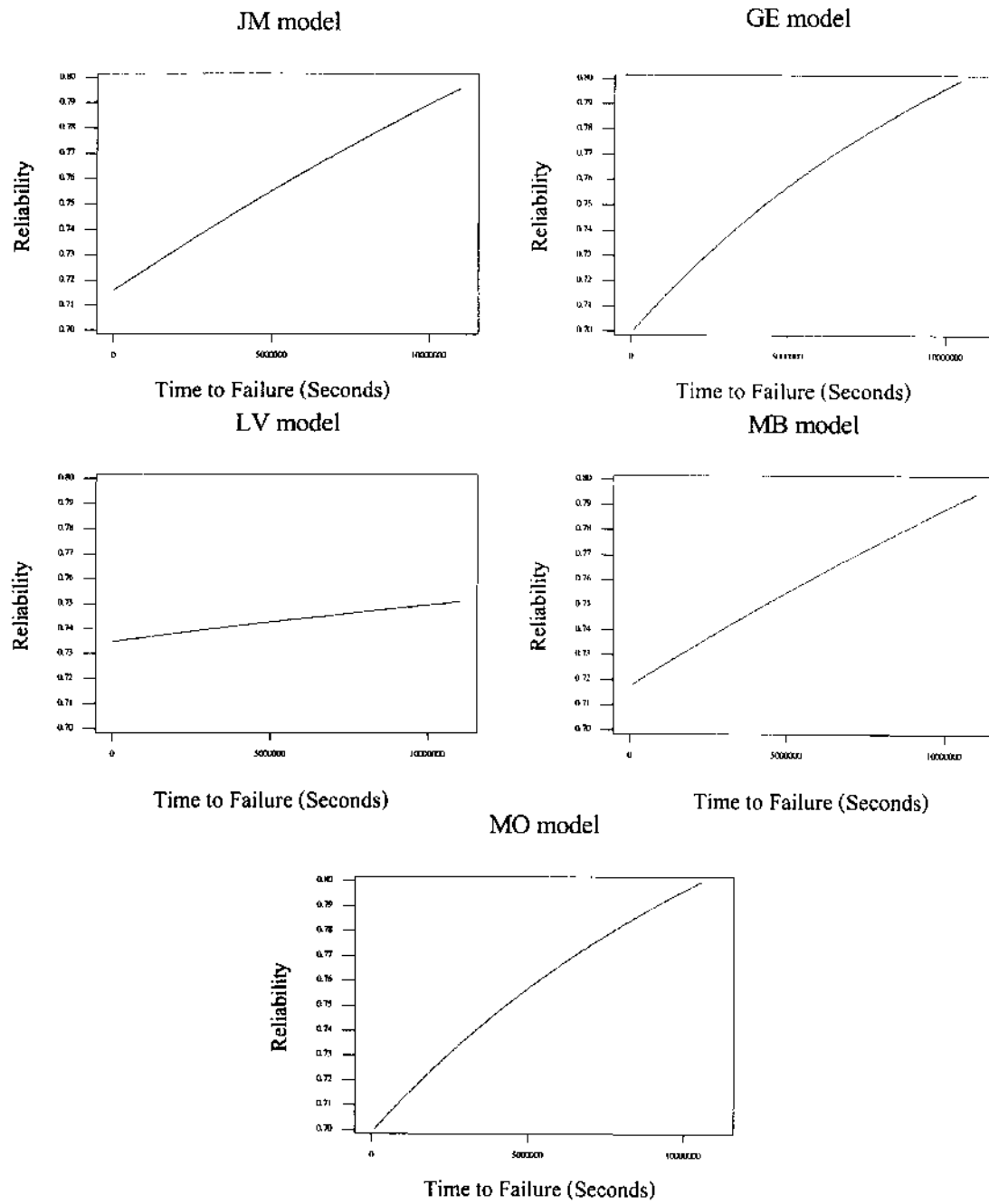
ตารางที่ 4-16 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	1545.955
Geometric	1544.340
Littlewood-Verrall	1516.962
Musa's Basic	1545.306
Musa-Okumoto	1543.885

จากภาพที่ 4-38 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-39 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $cum.N(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



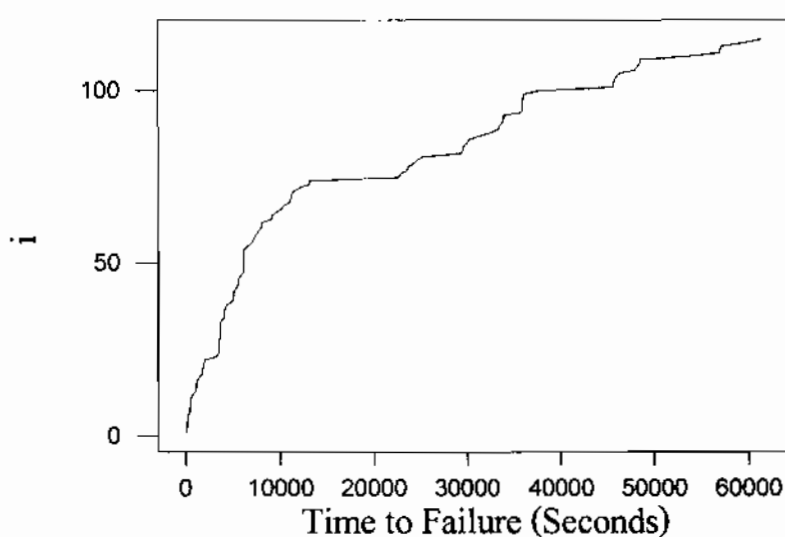
ภาพที่ 4-39 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 8



ภาพที่ 4-40 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 8

4.9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 9

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมระบบเวลามีโมดูลประมาณ 90 โมดูล เขียนด้วยภาษา Assembly และ Fortran จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 129 จุด จากเวลาการทดสอบ 61,499 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลามีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-41

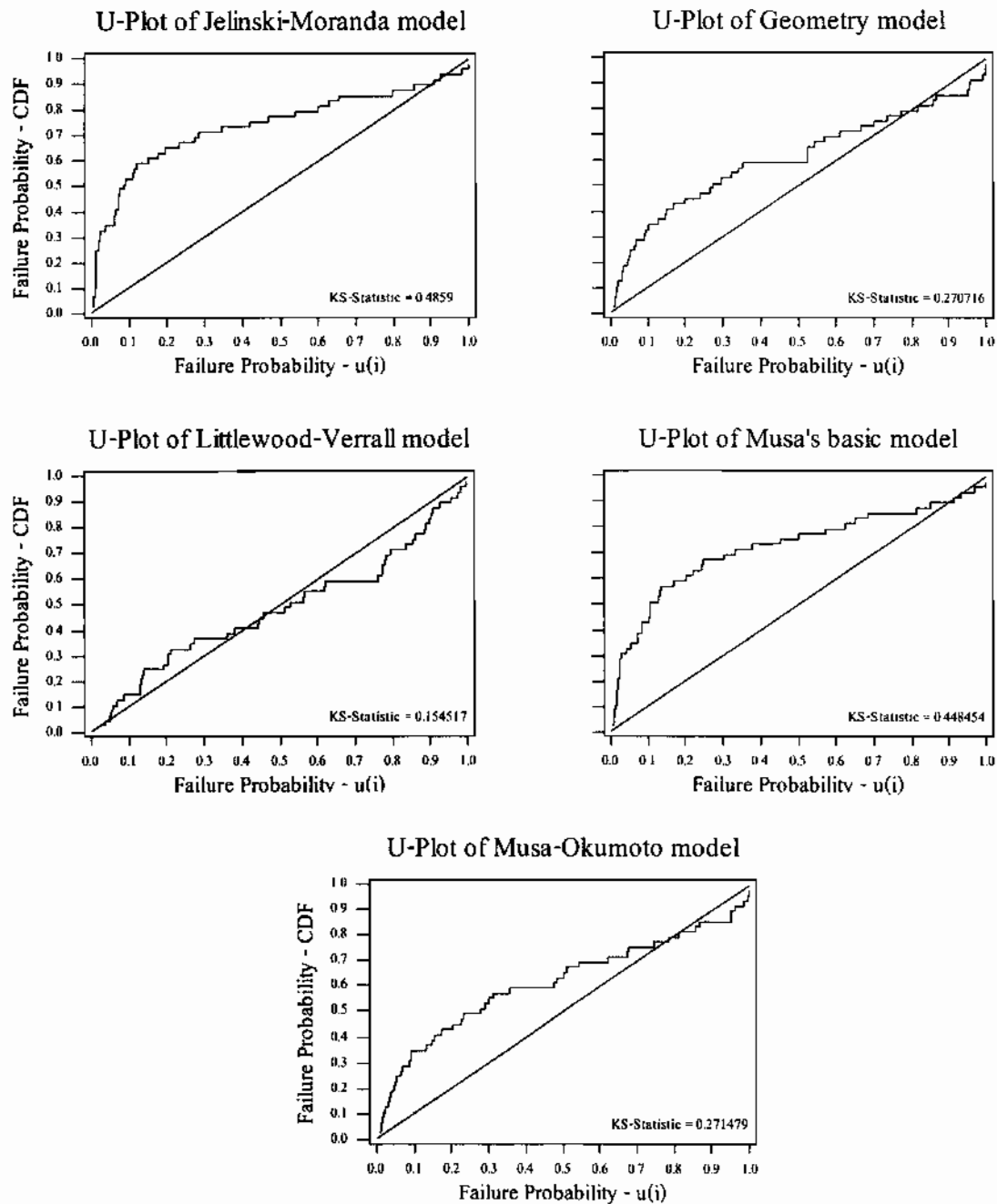


ภาพที่ 4-41 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 9

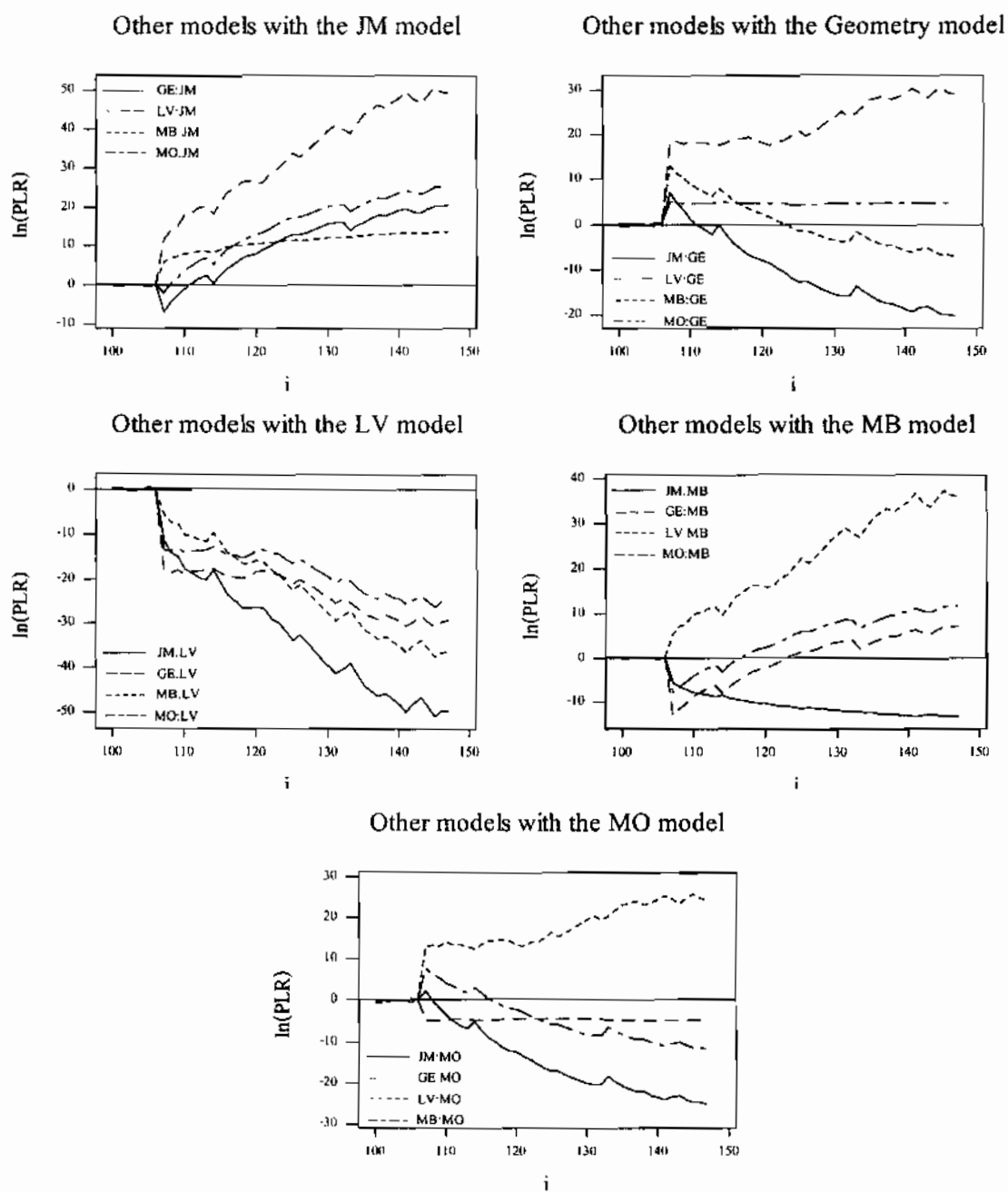
ตารางที่ 4-17 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.4859
Geometric	0.2707
Littlewood-Verrall	0.1545
Musa's Basic	0.4484
Musa-Okumoto	0.2715

จากภาพที่ 4-42 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ ซึ่งทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-17 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-42 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

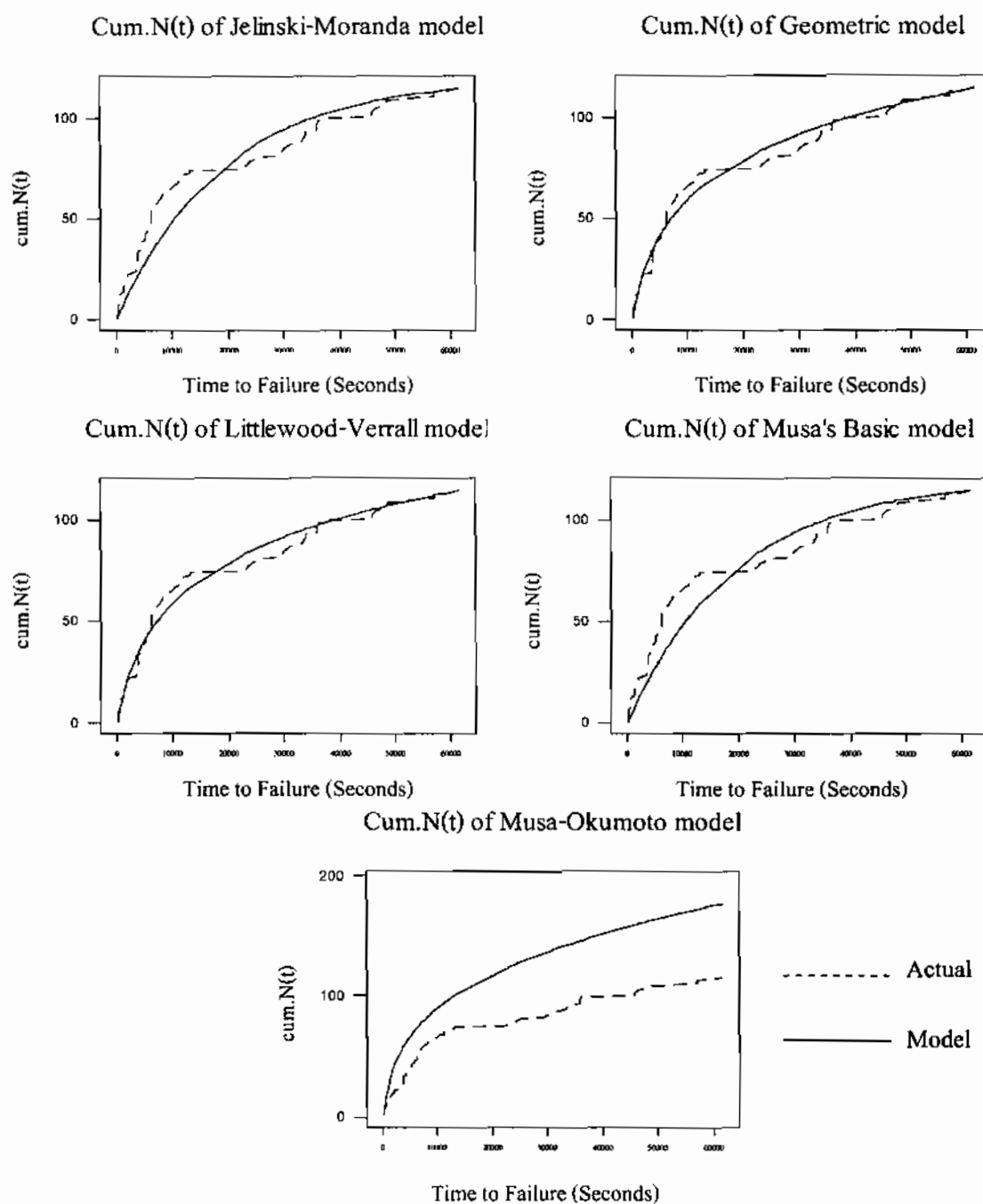


ภาพที่ 4-43 แสดงการเปรียบเทียบ $\ln(\text{PLR})$ -Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

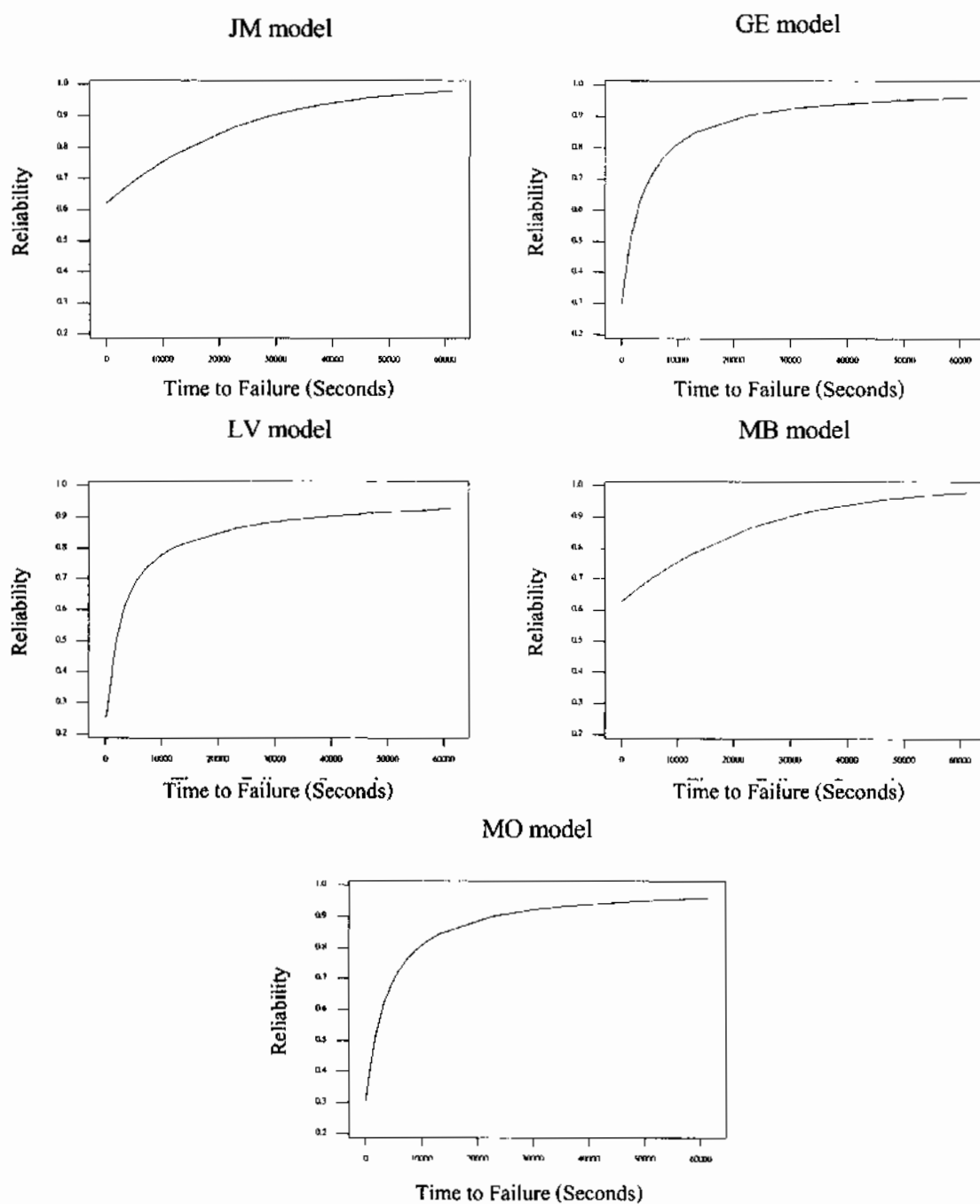
ตารางที่ 4-18 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	418.201
Geometric	397.640
Littlewood-Verrall	368.422
Musa's Basic	404.797
Musa-Okumoto	392.919

จากภาพที่ 4-43 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-44 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-44 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 สำหรับข้อมูลชุดที่ 9



ภาพที่ 4-45 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 9

4.10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลชุดที่ 10

ข้อมูลชุดนี้ได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ของ Medical Imaging System ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย ประมาณ 4500 ส่วน ใช้คำสั่งประมาณ 400,000 บรรทัด เขียนด้วยภาษา FORTRAN, assembly, PL/M จำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 103 จุด จากเวลาการทดสอบ 15,260.5 วินาที โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดสะสมกับเวลามีลักษณะที่แสดงในภาพที่ 4-46

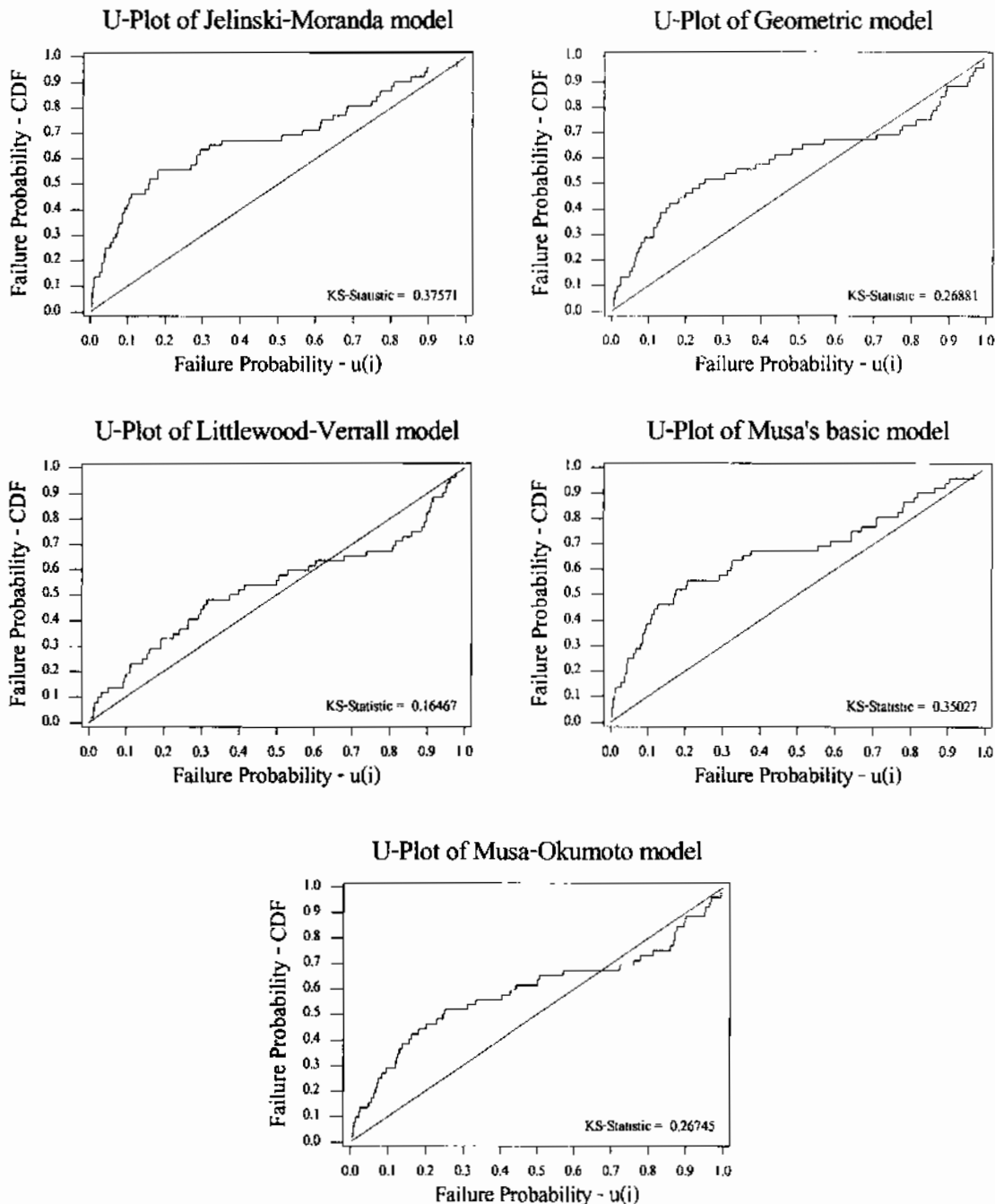


ภาพที่ 4-46 ลักษณะของโค้งการเจริญเติบโตของข้อมูลชุดที่ 10

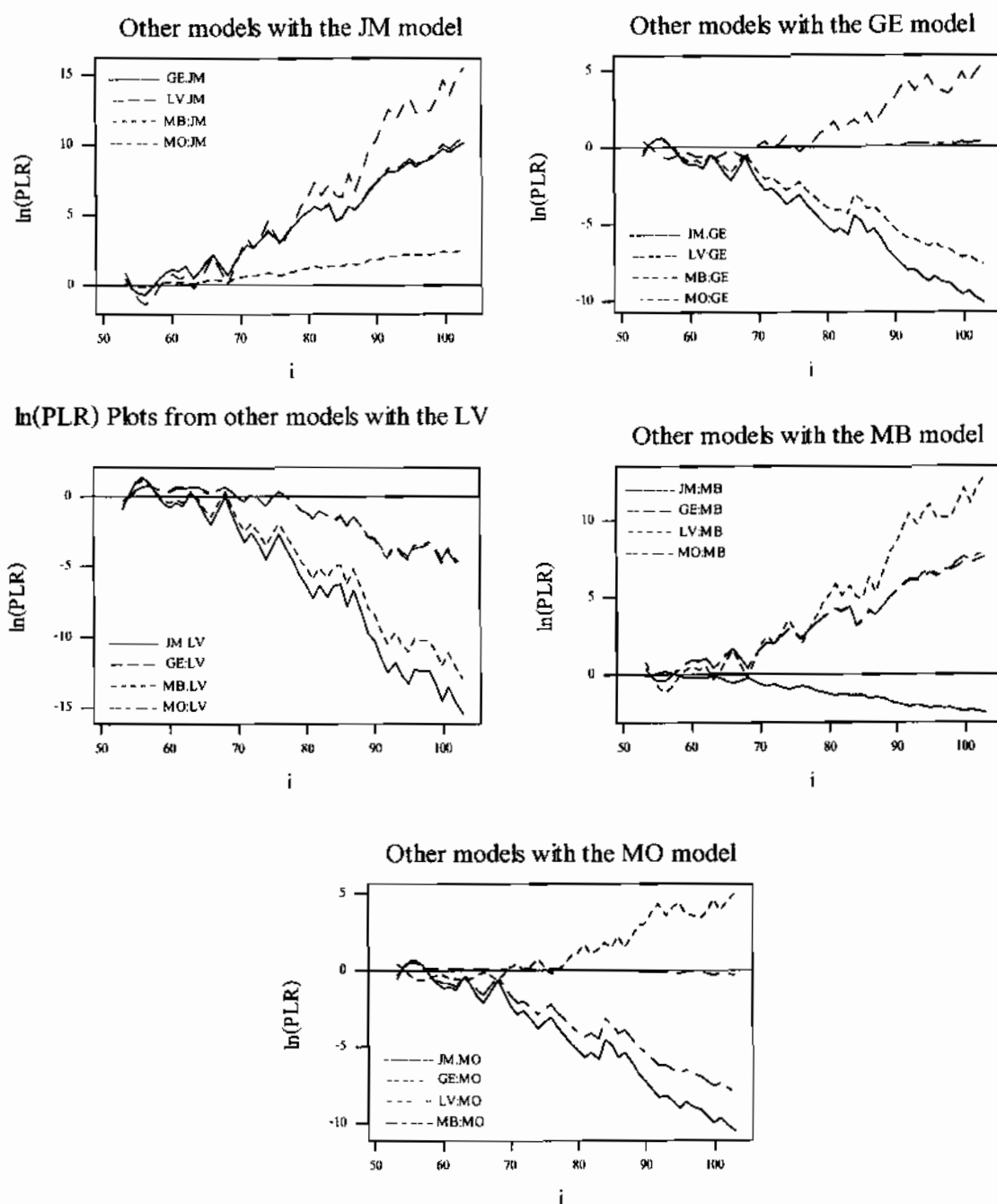
ตารางที่ 4-19 แสดงค่า KS-Statistic ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric ตัวแบบ Littlewood-Verrall Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตัวแบบ	KS-Statistic
Jelinski-Moranda	0.37571
Geometric	0.26881
Littlewood-Verrall	0.16467
Musa's Basic	0.35027
Musa-Okumoto	0.26745

จากภาพที่ 4-47 จะเห็นว่า U-Plot ของตัวแบบ Littlewood-Verrall มีความใกล้เคียงกราฟของ $F(t)$ เชิงทฤษฎีมากที่สุด และจากตารางที่ 4-19 พบว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall มีค่า KS-Statistic ต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ U-Plot เป็นเกณฑ์แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 47 แสดงการเปรียบเทียบ U-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

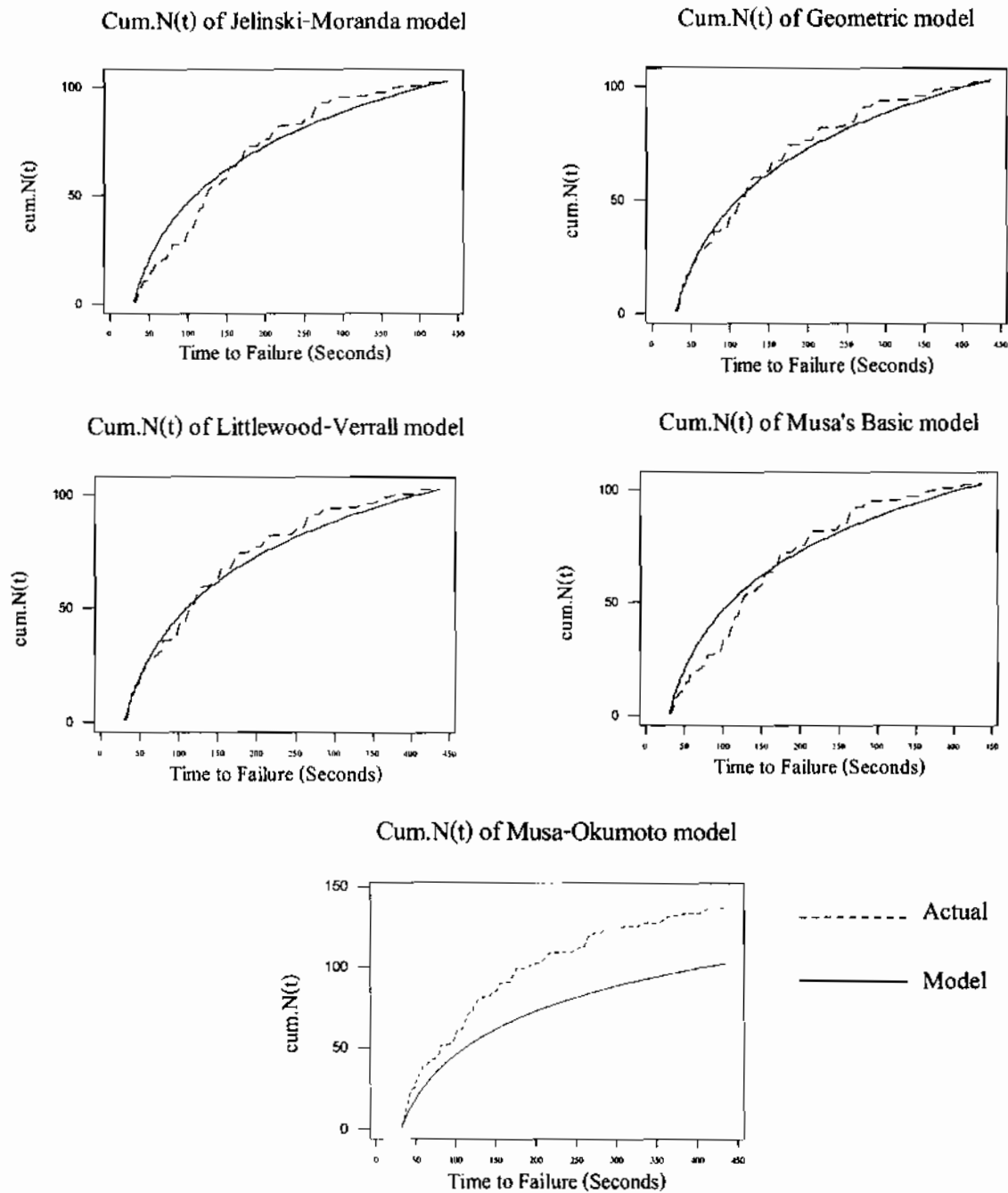


ภาพที่ 4-48 แสดงการเปรียบเทียบ ln(PLR)-Plot ของแต่ละตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

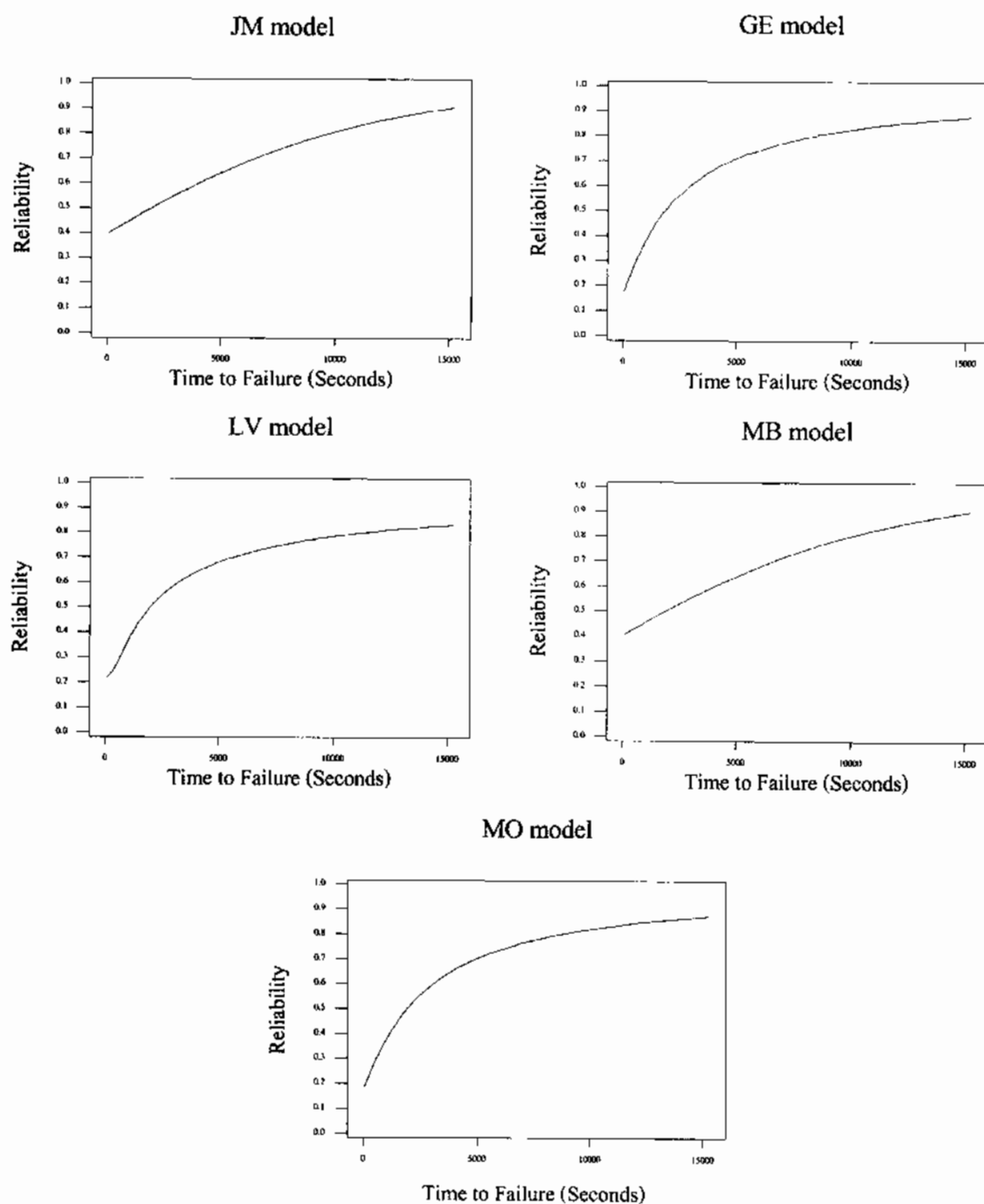
ตารางที่ 4-20 แสดงค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้าย ของตัวแบบ Jelinski-Moranda ตัวแบบ Geometric
ตัวแบบ Littlewood-Verrall ตัวแบบ Musa's Basic และตัวแบบ Musa-Okumoto
สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

ตัวแบบ	$-\ln PL$ (Final)
Jelinski-Moranda	522.545
Geometric	511.312
Littlewood-Verrall	476.605
Musa's Basic	513.786
Musa-Okumoto	507.024

จากภาพที่ 4-48 พบว่า $\ln(PLR)$ -Plot ของตัวอื่น ๆ เมื่อเทียบกับตัวแบบ LV มีแนวโน้มเข้าสู่อนันต์ทางด้านลบ ($-\infty$) แสดงให้เห็นว่าตัวแบบ LV เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้ และจากตารางที่ 4-6 พบว่าค่า $-\ln(PL)$ ลำดับสุดท้ายของตัวแบบ LV มีค่าต่ำสุด ดังนั้นหากใช้ $\ln(PLR)$ -Plot แล้ว ตัวแบบ Littlewood-Verrall เหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด และจากภาพที่ 4-49 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนข้อผิดพลาดสะสม $\text{cum.N}(t)$ กับค่าเฉลี่ยของจำนวนข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบ Littlewood-Verrall จะมีความแม่นยำในการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลชุดนี้มากที่สุด



ภาพที่ 4-49 จำนวนข้อผิดพลาดจริงกับจำนวนข้อผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้จากตัวแบบทั้ง 5
สำหรับข้อมูลชุดที่ 10



ภาพที่ 4-50 ค่าประมาณความเชื่อถือได้ที่ได้จากตัวแบบ สำหรับข้อมูลชุดที่ 10

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 5-1 แสดงข้อมูลทั้ง 10 ชุดและตัวแบบที่มีความแม่นยำสูงสุด

ข้อมูลชุดที่	ตัวแบบที่มีความแม่นยำสูงในการตรวจจับข้อผิดพลาด	
	วิธี U-Plot	วิธี ln(PLR)-Plot
1	Geometric	Geometric
2	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
3	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
4	Musa-Okumoto	Musa-Okumoto
5	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
6	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
7	Musa-Okumoto	Musa-Okumoto
8	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
9	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall
10	Littlewood-Verrall	Littlewood-Verrall

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากตารางที่ 5-1 พบว่าข้อมูลทั้ง 10 ชุด สามารถคัดเลือกตัวแบบที่มีความแม่นยำสำหรับการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ได้สอดคล้องกันทั้งวิธี U-Plot และวิธี ln(PLR)-Plot โดยจากข้อมูลทั้ง 10 ชุด พบว่า มีจำนวนชุดข้อมูลถึง 7 ชุด ที่ตัวแบบ Littlewood-Verrall ให้ค่าสถิติทั้งสองต่ำที่สุด ในขณะที่มีจำนวน 2 ชุดข้อมูล ที่ตัวแบบ Musa-Okumoto ให้ค่าสถิติทั้งสองต่ำที่สุด และมี 1 ชุดข้อมูลที่ ตัวแบบ Geometric ให้ค่าสถิติทั้งสองต่ำที่สุด

ดังนั้นตัวแบบ Littlewood-Verrall จึงเป็นตัวแบบที่มีความแม่นยำสูงสุด สำหรับการประมาณค่าความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ สำหรับข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตัวแบบต่าง ๆ นั้นได้หาตัวประมาณค่าพารามิเตอร์จาก Mean Value Function หรือ $\mu(x)$ และเปรียบเทียบตัวแบบโดยใช้ค่า MSE ระหว่างจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง กับจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดที่ได้จากตัวแบบ ซึ่งมีความแตกต่างจากงานวิจัยฉบับนี้ในด้านวิธีการเปรียบเทียบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแบบนั้น มีทั้งรูปแบบที่ตัวแปรสุ่มเป็นระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง และจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้การวิเคราะห์ด้วยรูปแบบตัวแปรสุ่มที่เป็นระยะเวลาห่างระหว่างการเกิดข้อผิดพลาดแต่ละครั้ง หากการศึกษารั้งต่อไป ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์ ที่คำนวณจากจำนวนการเกิดข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา ตัวแบบที่สามารถใช้จำนวนการเกิดข้อผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลามาคำนวณนั้น ได้แก่ตัวแบบ Goel-Okumoto ตัวแบบ Yanada และตัวแบบ ohba เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. Moranda, P.B. "Predictions of Software Reliability During Debugging," Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. 327-332. Washington D.C., 1975.
2. _____. "Event-Altered Rate Models for General Reliability Analysis." IEEE Transactions on Reliability. vol. R-28, no. 5 (1979) : 376-381.
3. Moranda, P.L., and Jelinski, Z., Final Report on Software Reliability Study
McDonnell Douglas Astronautics Company, MADC Report Number 63921, 1972.
4. Littlewood, B. and Verrall, J. "A Bayesian Reliability Growth Model for Computer Software." Journal of the Royal Statistical Society. series C, vol. 22, no. 3, (1973) : 332-346.
5. Littlewood, B. "Validation of a Software Model." Software Life Cycle Management Workshop. 146-152. Atlanta, Georgia. International Business Services, Inc, 1978.
6. _____. "The Littlewood-Verrall Model for Software Reliability Compared with Some Rivals " Journal of Systems and Software. vol. 1, no. 3 (1980) : 251-258.
7. Musa, J.D. "A Theory of Software Reliability and Its Applications." IEEE Transactions on Software Engineering. vol. SE-1, no. 3 (1975) : 312-327.
8. _____. "Software Reliability." Handbook of Software Engineering. C.R. Vick and C.V. Ramamoorthy (eds.). Van Nostrand Reinhold. New York, 1984.
9. DeGroot, M.H. Probability and Statistics. Series in Statistics. Addison-Wesley, Reading Mass., 1986.
10. Dawid, A.P. "Statistical Theory: The Prequential Approach," Journal Royal Statistical Society. series A, vol. 147 (1984) : 278-292.
11. Barlow, Richard E. The Mathematical theory of reliability. New York : John Wiley, 1965.
12. Grosh, Doris Lloyd. A primer of reliability theory. New York : John Wiley, c1989
13. Lyu Michael R.. Handbook of software reliability engineering. New York : McGraw-Hill, 1996.

14. Hudson RR. "Gene genealogies and the coalescent process." In Oxford Surveys in Evolutionary Biology, D Futuyma, J Antonovics, 7:1-49. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1990
15. Goel, A.L., and Okumoto, K. "Time-Dependent Error -Detection Rate Model for Software and Other Performance Measures." IEEE Transactions on Reliability, vol.R-28, no.5 (August 1979) : 206-211.
16. Musa, J.D., and Okumoto, K. "A Logarithmic Poisson Execution Time Model for Software Reliability Measurement." Proceedings Seventh International Conference on Software Engineering, 230-238 Orlando, Florida, 1984
17. Musa, J.D., "The Measurement and Management of Software Reliability." Proceedings of the IEEE, vol. 68, no.9(1980) : 1131-1143.
18. Musa, J.D., Iannino, A., and Okumoto, K., Software Reliability - Measurement, Prediction, Application New York. : McGraw-Hill, 1987.
19. Uemura, M., Yamada, S., and Fujino, K. "Software Reliability Method: Application of Delayed S-Shaped NHPP Model and Other Related Models." International Symposium on Reliability and Maintainability, 467-472. Tokyo, 1990
20. Yamada, S., Ohba, M., and Osaki, S. "S-Shaped Reliability Growth Modeling for Software Error Detection." IEEE Transactions on Reliability, vol. R-32, no.5 (December 1983) : 475-478.
21. Littlewood, B. "Theory of Software Reliability: How Good Are They and How Can They Be Improved?." IEEE Transactions on Software Engineering, vol.6 (1980) : 489-500.
22. Keiller, P.A., Littlewood, B., et al. "Comparison of Software Reliability Predictions," Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Fault-Tolerant Computing (FTCS-13), Milano, Italy, (June 1983) : 128-134.
23. Schick, G.J., and Wolverton, R.W. "Assessment of Software Reliability." Proceedings of the Operations Research, 395-422. Wurzburg-Wien : Physica-Verlag 1973.
24. Aldrich, John. "R.A. Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922." A paper on the history of Maximum Likelihood, Statistical Science 12(1997) : 162-176.

25. Daniel, W.W. Applied Nonparametric Statistics. Boston : PWS-KENT Pub, 1978.
26. Pham, Hoang. Software reliability and testing. Washington : IEEE Computer Society Press 1995.
27. Musa, John D. Software reliability engineering :more reliable software, faster development and testing. New York :McGraw-Hill, c1999.
28. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. Software Reliability Models :Theoretical Developments, Evaluation and Applications Los Alamitos. CA :IEEE,1990.
29. Jason Allen Denton. Accurate Software Reliability Estimation. Masters Thesis, Faculty of Science, Colorado State University, 1999.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ นำข้อมูลจริงทั้ง 10 ชุดข้อมูล ซึ่งได้จากการทดสอบซอฟต์แวร์ต่าง ๆ ที่นักพัฒนาซอฟต์แวร์ได้บันทึกและเก็บรวบรวมไว้ที่เว็บไซต์ <http://www.dacs.dtic.mil>

ตารางที่ ก-1 แสดงข้อมูลชุดที่ 1 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 136 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	3	26	180
2	30	27	10
3	113	28	1146
4	81	29	600
5	115	30	15
6	9	31	36
7	2	32	4
8	91	33	0
9	112	34	8
10	15	35	227
11	138	36	65
12	50	37	176
13	77	38	58
14	24	39	457
15	108	40	300
16	88	41	97
17	670	42	263
18	120	43	452
19	26	44	255
20	114	45	197
21	325	46	193
22	55	47	6
23	242	48	79
24	68	49	816
25	422	50	1351

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	148	76	529
52	21	77	281
53	233	78	160
54	134	79	828
55	357	80	1011
56	193	81	445
57	236	82	296
58	31	83	1755
59	369	84	1064
60	748	85	1783
61	0	86	860
62	232	87	983
63	330	88	707
64	365	89	33
65	1222	90	868
66	543	91	724
67	10	92	2323
68	16	93	2930
69	529	94	1461
70	379	95	843
71	44	96	12
72	129	97	261
73	810	98	1800
74	290	99	865
75	300	100	1435

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	30	126	1071
102	143	127	371
103	108	128	790
104	0	129	6150
105	3110	130	3321
106	1247	131	1045
107	943	132	648
108	700	133	5485
109	875	134	1160
110	245	135	1864
111	729	136	4116
112	1897		
113	447		
114	386		
115	446		
116	122		
117	990		
118	948		
119	1082		
120	22		
121	75		
122	482		
123	5509		
124	100		
125	10		

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลชุดที่ 2 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 54 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	191	26	1215
2	222	27	2715
3	280	28	3551
4	290	29	800
5	290	30	3910
6	385	31	6900
7	570	32	3300
8	610	33	1510
9	365	34	195
10	390	35	1956
11	275	36	135
12	360	37	661
13	800	38	50
14	1210	39	729
15	407	40	900
16	50	41	180
17	660	42	4225
18	1507	43	15600
19	625	44	0
20	912	45	0
21	638	46	300
22	293	47	9021
23	1212	48	2519
24	612	49	6890
25	675	50	3348

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	2750		
52	6675		
53	6945		
54	7899		
51	2750		
52	6675		
53	6945		
54	7899		

ตารางที่ ก-3 แสดงข้อมูลชุดที่ 3 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 427 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	21480	26	8280
2	600	27	15000
3	2280	28	10860
4	18840	29	600
5	77400	30	2280
6	12600	31	420
7	42840	32	10680
8	2740	33	3220
9	16020	34	9000
10	7200	35	7800
11	120	36	8940
12	31020	37	20460
13	26640	38	9000
14	300	39	12300
15	8640	40	24000
16	780	41	60
17	7680	42	1740
18	600	43	60
19	6420	44	2520
20	12900	45	2280
21	360	46	16980
22	25800	47	1380
23	600	48	16620
24	15720	49	7380
25	19380	50	3600

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	11580	76	61860
52	11520	77	38040
53	5460	78	25200
54	780	79	60
55	840	80	58740
56	32580	81	7200
57	15180	82	24180
58	600	83	22620
59	10860	84	4800
60	5340	85	480
61	5400	86	10200
62	5400	87	900
63	10800	88	4020
64	300	89	5700
65	300	90	5400
66	300	91	17100
67	3720	92	1260
68	38400	93	13380
69	7200	94	4260
70	300	95	180
71	17100	96	6060
72	58740	97	21600
73	6720	98	360
74	2580	99	3720
75	16800	100	13860

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	11280	126	180
102	4020	127	4800
103	2460	128	7980
104	14640	129	3600
105	600	130	2100
106	600	131	13860
107	600	132	9840
108	600	133	13980
109	21180	134	12120
110	11740	135	6660
111	33720	136	17040
112	11220	137	15240
113	10860	138	960
114	46380	139	600
115	2220	140	4500
116	22800	141	5400
117	4500	142	5400
118	6300	143	300
119	5400	144	300
120	26400	145	39840
121	13500	146	2640
122	29200	147	19200
123	16500	148	5400
124	35700	149	9000
125	3840	150	110700

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	43200	176	0
152	27900	177	146400
153	10800	178	1260
154	27060	179	2160
155	35280	180	136440
156	27720	181	2940
157	84540	182	1440
158	19200	183	8160
159	660	184	0
160	20640	185	178
161	23700	186	17286
162	14100	187	12000
163	26940	188	35936
164	61320	189	35225
165	21900	190	5577
166	26700	191	5795
167	44220	192	3524
168	9000	193	616
169	175080	194	2535
170	2968	195	4217
171	134497	196	2331
172	3955	197	360
173	23962	198	4560
174	3038	199	10068
175	0	200	18852

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
201	6240	226	1500
202	15000	227	77280
203	5640	228	8880
204	37860	229	24240
205	13500	230	100380
206	0	231	29220
207	0	232	133931
208	0	233	21827
209	0	234	77042
210	2880	235	5880
211	1980	236	12120
212	3840	237	1215
213	37860	238	42945
214	0	239	13151
215	31620	240	18169
216	50115	241	18122
217	5373	242	61558
218	29532	243	88200
219	2280	244	3288
220	11792	245	12612
221	7847	246	24540
222	7935	247	100260
223	25312	248	66600
224	5554	249	22500
225	5880	250	127895

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
251	82105	276	11466
252	61798	277	125578
253	49089	278	23956
254	55313	279	22020
255	17040	280	28380
256	8160	281	4523
257	4680	282	72277
258	600	283	29700
259	12664	284	281
260	152156	285	299419
261	66600	286	74580
262	19800	287	6240
263	4800	288	10680
264	40200	289	37800
265	1800	290	32400
266	100800	291	14400
267	295080	292	8400
268	36840	293	7868
269	86468	294	1880
270	10612	295	2525
271	24554	296	685
272	86446	297	1825
273	160500	298	21817
274	37200	299	34200
275	13500	300	25200

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
301	25985	326	18420
302	80815	327	5400
303	48264	328	3600
304	1891	329	3600
305	29	330	7020
306	932	331	1080
307	1785	332	2700
308	141499	333	31523
309	0	334	395
310	1800	335	20582
311	91800	336	5400
312	22500	337	29100
313	120	338	21900
314	42180	339	22800
315	80700	340	600
316	0	341	7200
317	5316	342	59400
318	344	343	40800
319	918	344	3600
320	2993	345	1500
321	24458	346	7500
322	754	347	17840
323	2294	348	5408
324	11823	349	7352
325	15780	350	13800

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
351	1200	376	13568
352	37884	377	7365
353	47555	378	4987
354	3185	379	1320
355	2758	380	10200
356	30078	381	6300
357	37440	382	16941
358	17100	383	6459
359	4649	384	4500
360	2734	385	9180
361	9297	386	38860
362	110700	387	281
363	46620	388	760
364	20640	389	5726
365	97804	390	6979
366	47523	391	1211
367	585	392	10956
368	32412	393	4954
369	22524	394	5337
370	5897	395	315
371	6841	396	25841
372	23474	397	6391
373	5400	398	29
374	9000	399	3128
375	38460	400	2868

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
401	9664	426	9160
402	4920	427	8013
403	32475		
404	3580		
405	27905		
406	1646		
407	2201		
408	17265		
409	4191		
410	6368		
411	4269		
412	39300		
413	8880		
414	60		
415	120		
416	1440		
417	47940		
418	18660		
419	7200		
420	7200		
421	3660		
422	720		
423	2820		
424	9179		
425	3708		

ตารางที่ ก-4 แสดงข้อมูลชุดที่ 4 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 161 ข้อ

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	60	26	43
2	30	27	12
3	607	28	87
4	40	29	138
5	28	30	108
6	53	31	30
7	4	32	295
8	16	33	113
9	94	34	36
10	15	35	50
11	5	36	81
12	90	37	89
13	77	38	157
14	68	39	14
15	15	40	166
16	160	41	36
17	1	42	5
18	104	43	69
19	16	44	50
20	9	45	164
21	22	46	392
22	14	47	16
23	82	48	154
24	6	49	176
25	79	50	247

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	304	76	23
52	5	77	193
53	2	78	1104
54	135	79	103
55	2233	80	318
56	156	81	114
57	295	82	1553
58	152	83	306
59	341	84	245
60	103	85	107
61	16	86	2
62	83	87	327
63	7	88	696
64	221	89	5
65	4	90	63
66	38	91	1054
67	11	92	495
68	17	93	128
69	107	94	482
70	59	95	116
71	127	96	35
72	20	97	310
73	1	98	110
74	21	99	98
75	112	100	60

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	177	126	1176
102	65	127	1040
103	231	128	38
104	62	129	78
105	158	130	1798
106	1622	131	205
107	386	132	2095
108	70	133	788
109	151	134	1
110	809	135	3812
111	1710	136	726
112	745	137	1452
113	360	138	5173
114	592	139	1957
115	3569	140	3097
116	1967	141	25
117	772	142	1048
118	3337	143	78
119	620	144	33
120	3044	145	6725
121	6	146	1366
122	1923	147	2859
123	17	148	556
124	71	149	5028
125	34	150	537

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	63		
152	113		
153	1236		
154	1406		
155	1580		
156	3546		
157	8575		
158	1893		
159	198		
160	3326		
161	6372		

ตารางที่ ก-5 แสดงข้อมูลชุดที่ 5 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 357 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	5400	26	175860
2	10200	27	310020
3	24060	28	148920
4	8460	29	79680
5	33900	30	12720
6	16500	31	4920
7	6300	32	70320
8	87540	33	71340
9	5400	34	1200
10	51780	35	219660
11	1140	36	36540
12	6300	37	1680
13	2400	38	44160
14	16260	39	20160
15	109140	40	48300
16	94380	41	210060
17	5400	42	30180
18	15600	43	168000
19	14400	44	173580
20	30660	45	56820
21	131460	46	271440
22	38700	47	139920
23	273480	48	186240
24	84540	49	15900
25	23160	50	185640

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	208020	76	1500
52	62340	77	79800
53	40380	78	75600
54	29820	79	159600
55	257334	80	600
56	480	81	292080
57	108360	82	140040
58	133920	83	207660
59	137160	84	14640
60	18420	85	1200
61	170040	86	136320
62	32640	87	3000
63	10200	88	39240
64	24000	89	249960
65	120480	90	446460
66	352260	91	99600
67	75000	92	780
68	1380	93	72900
69	163020	94	69960
70	13980	95	108120
71	9120	96	249420
72	29400	97	730560
73	9360	98	506880
74	1200	99	46920
75	3600	100	790260

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	841020	126	11220
102	33480	127	22380
103	158640	128	219300
104	548460	129	266340
105	130560	130	2100
106	556380	131	157740
107	16740	132	144480
108	539820	133	14040
109	94980	134	34200
110	13920	135	346652
111	84780	136	1080
112	3780	137	9000
113	233640	138	6660
114	13860	139	120
115	420	140	240
116	40920	141	240
117	4560	142	68700
118	507840	143	1620
119	55740	144	77340
120	82680	145	234540
121	409620	146	900
122	1167840	147	960
123	69120	148	1260
124	668700	149	540
125	160320	150	1260

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	1560	176	348000
152	600	177	66960
153	22620	178	190260
154	600	179	123540
155	600	180	5520
156	21000	181	960
157	35880	182	180900
158	59040	183	423900
159	141540	184	335460
160	291720	185	5220
161	512880	186	559140
162	171360	187	95280
163	229740	188	297360
164	170700	189	23220
165	175620	190	3480
166	81660	191	186240
167	23340	192	101940
168	63420	193	245160
169	58020	194	298020
170	2100	195	406920
171	396240	196	186600
172	10020	197	25440
173	132700	198	35220
174	70620	199	15360
175	163080	200	48600

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
201	46740	226	185220
202	596820	227	104880
203	479760	228	47940
204	84480	229	408840
205	8760	230	24180
206	5100	231	34560
207	73140	232	612600
208	1380	233	30420
209	12300	234	52920
210	540	235	1200
211	55260	236	637860
212	14760	237	35760
213	4200	238	891600
214	13020	239	253140
215	18600	240	288360
216	28020	241	1800
217	360420	242	101280
218	116400	243	105540
219	120780	244	863400
220	1109520	245	172440
221	119520	246	70320
222	99660	247	554940
223	23760	248	11700
224	19800	249	432480
225	155880	250	26700

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
251	7560	276	78120
252	28200	277	309660
253	39060	278	26640
254	511380	279	209700
255	315960	280	18000
256	131460	281	195000
257	37260	282	2700
258	750480	283	79560
259	23940	284	86460
260	400080	285	80100
261	180	286	77160
262	240	287	9000
263	480	288	5640
264	262200	289	678720
265	279180	290	57120
266	3960	291	18120
267	43320	292	780
268	364020	293	263820
269	11820	294	210600
270	447660	295	2640
271	249480	296	600
272	146040	297	523500
273	26940	298	147420
274	142920	299	199740
275	32100	300	25800

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
301	97740	326	1320
302	1560	327	156540
303	61380	328	3900
304	41520	329	43860
305	70080	330	68340
306	4800	331	13440
307	68040	332	31380
308	15660	333	123120
309	130860	334	39180
310	213660	335	130620
311	73260	336	4860
312	242760	337	9360
313	722940	338	4320
314	423360	339	48780
315	420	340	4980
316	1440	341	7560
317	340860	342	55500
318	128700	343	30900
319	940500	344	140940
320	448980	345	29160
321	21900	346	21480
322	157200	347	33420
323	360	348	20700
324	225600	349	50040
325	10860	350	10740

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
351	142020		
352	79440		
353	113640		
354	59400		
355	78300		
356	196380		
357	25980		

ตารางที่ ก-6 แสดงข้อมูลชุดที่ 6 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 276 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	5400	26	43380
2	81060	27	26820
3	2100	28	286500
4	13620	29	27000
5	22800	30	44400
6	13380	31	110220
7	4620	32	269100
8	5100	33	60840
9	26640	34	85800
10	45960	35	98820
11	5100	36	61260
12	28800	37	156300
13	58620	38	52740
14	1920	39	54960
15	99540	40	32100
16	60000	41	129660
17	3000	42	116760
18	34500	43	75000
19	52500	44	37260
20	2280	45	24180
21	32100	46	146640
22	167940	47	35760
23	42840	48	16080
24	145920	49	900
25	43380	50	10320

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	2280	76	42840
52	28800	77	55500
53	75960	78	890340
54	52140	79	1620
55	28920	80	73560
56	52920	81	284407
57	240	82	85140
58	600	83	177360
59	13080	84	45360
60	58980	85	44400
61	1140	86	270472
62	62160	87	172140
63	34620	88	960
64	118140	89	23700
65	262980	90	190020
66	47400	91	55260
67	1320	92	48660
68	41880	93	264900
69	39300	94	1080
70	115860	95	86700
71	66960	96	60
72	178740	97	1
73	2340	98	337920
74	6780	99	31320
75	780	100	245760

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	36480	126	128040
102	187260	127	134340
103	28980	128	16800
104	120	129	5760
105	119340	130	41760
106	1740	131	540
107	840	132	540
108	1500	133	600
109	1200	134	420
110	2820	135	540
111	51960	136	305040
112	8940	137	102480
113	1800	138	60840
114	1680	139	86880
115	7980	140	130980
116	420	141	172140
117	11460	142	144660
118	25440	143	12180
119	99360	144	66960
120	45360	145	155820
121	62040	146	5100
122	24360	147	242820
123	3420	148	33840
124	2220	149	34140
125	41460	150	479968

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	31260	176	188280
152	23520	177	2880
153	57720	178	43260
154	454200	179	494640
155	36060	180	38700
156	3780	181	53520
157	226440	182	100560
158	73560	183	207840
159	180	184	810840
160	20760	185	48720
161	10340	186	130920
162	45660	187	280260
163	117720	188	23160
164	10860	189	25020
165	71280	190	501060
166	83460	191	175476
167	79560	192	659392
168	319260	193	790440
169	219328	194	107400
170	38940	195	625140
171	19200	196	507300
172	6900	197	1016040
173	101280	198	1080
174	174180	199	30540
175	80040	200	56160

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
201	224520	226	720
202	12120	227	660
203	13080	228	2460
204	142140	229	2760
205	510780	230	8880
206	181500	231	420
207	131580	232	840
208	6180	233	480
209	120	234	87960
210	228900	235	228360
211	4320	236	100020
212	9300	237	163260
213	75720	238	66420
214	13080	239	255840
215	118020	240	13080
216	33900	241	4740
217	29940	242	1980
218	86400	243	430800
219	118980	244	12660
220	8400	245	40020
221	33000	246	16680
222	43020	247	1080
223	118620	248	2100
224	137940	249	1020
225	287160	250	13080

ตารางที่ ก-6 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
251	842220	276	37260
252	805176		
253	18780		
254	47100		
255	110520		
256	840		
257	266760		
258	33480		
259	38520		
260	70800		
261	119100		
262	462600		
263	17400		
264	543060		
265	191040		
266	3720		
267	103080		
268	117360		
269	63960		
270	3960		
271	442860		
272	22260		
273	241500		
274	49920		
275	144240		

ตารางที่ ก-7 แสดงข้อมูลชุดที่ 7 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 207 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	39	26	129
2	10	27	103
3	4	28	224
4	36	29	186
5	4	30	53
6	5	31	14
7	4	32	9
8	91	33	2
9	49	34	10
10	1	35	1
11	25	36	34
12	1	37	170
13	4	38	129
14	30	39	4
15	42	40	4
16	9	41	35
17	49	42	5
18	44	43	5
19	32	44	22
20	3	45	36
21	78	46	35
22	1	47	121
23	30	48	23
24	205	49	33
25	5	50	48

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	32	76	11
52	21	77	41
53	4	78	210
54	23	79	16
55	9	80	30
56	13	81	37
57	165	82	66
58	14	83	9
59	22	84	16
60	41	85	14
61	12	86	24
62	138	87	12
63	95	88	159
64	49	89	89
65	62	90	118
66	2	91	29
67	35	92	21
68	89	93	18
69	90	94	2
70	69	95	114
71	22	96	37
72	15	97	46
73	19	98	17
74	42	99	1
75	14	100	150

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	382	126	51
102	160	127	6
103	66	128	193
104	206	129	27
105	9	130	25
106	26	131	96
107	62	132	26
108	239	133	30
109	13	134	30
110	4	135	17
111	85	136	320
112	85	137	78
113	240	138	39
114	178	139	13
115	34	140	13
116	102	141	19
117	9	142	128
118	146	143	34
119	59	144	84
120	48	145	40
121	25	146	177
122	25	147	349
123	111	148	274
124	5	149	82
125	31	150	58

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	31	176	228
152	114	177	220
153	39	178	208
154	88	179	78
155	84	180	3
156	232	181	83
157	108	182	6
158	38	183	212
159	86	184	91
160	7	185	3
161	22	186	10
162	80	187	172
163	239	188	21
164	3	189	173
165	39	190	371
166	63	191	40
167	152	192	48
168	63	193	126
169	80	194	90
170	245	195	149
171	196	196	30
172	46	197	317
173	152	198	500
174	102	199	673
175	9	200	432

ตารางที่ ก-7 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
201	66		
202	168		
203	66		
204	66		
205	128		
206	49		
207	332		

ตารางที่ ก-8 แสดงข้อมูลชุดที่ 8 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 544 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	299419	26	1800
2	74580	27	91800
3	6240	28	22500
4	10680	29	120
5	37800	30	42180
6	32400	31	80700
7	14400	32	0
8	8400	33	5316
9	7868	34	344
10	1880	35	918
11	2525	36	2993
12	685	37	24458
13	1825	38	754
14	21817	39	2294
15	34200	40	11823
16	25200	41	15780
17	25985	42	18420
18	80815	43	5400
19	48264	44	3600
20	1891	45	3600
21	29	46	7020
22	932	47	1080
23	1785	48	2700
24	141499	49	31523
25	0	50	395

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	20582	76	2734
52	5400	77	9297
53	29100	78	110700
54	21900	79	46620
55	22800	80	20640
56	600	81	97804
57	7200	82	47523
58	59400	83	585
59	40800	84	32412
60	3600	85	22524
61	1500	86	5897
62	7500	87	6841
63	17840	88	23474
64	5408	89	5400
65	7352	90	9000
66	13800	91	38460
67	1200	92	13568
68	37884	93	7365
69	47555	94	4987
70	3185	95	1320
71	2758	96	10200
72	30078	97	6300
73	37440	98	16941
74	17100	99	6459
75	4649	100	4500

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	9180	126	6368
102	38860	127	4269
103	281	128	39300
104	760	129	8880
105	5726	130	60
106	6979	131	120
107	1211	132	1440
108	10956	133	47940
109	4954	134	18660
110	5337	135	7200
111	315	136	7200
112	25841	137	3660
113	6391	138	720
114	29	139	2820
115	3128	140	9179
116	2868	141	3708
117	9664	142	9160
118	4920	143	8013
119	32475	144	7740
120	3580	145	29160
121	27905	146	13140
122	1646	147	43827
123	2201	148	74019
124	17265	149	10854
125	4191	150	46920

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
151	44340	176	98813
152	55170	177	22800
153	38216	178	6000
154	25614	179	12000
155	24618	180	5633
156	4200	181	112927
157	37948	182	29085
158	18976	183	92406
159	13462	184	155991
160	19614	185	1560
161	3600	186	4320
162	61200	187	106140
163	1800	188	4080
164	71700	189	8880
165	23772	190	360
166	1149	191	34651
167	29379	192	12767
168	22500	193	6900
169	7200	194	7500
170	11820	195	18120
171	3480	196	8984
172	48466	197	14400
173	29834	198	29056
174	34675	199	9601
175	5712	200	3860

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
201	75819	226	19842
202	0	227	3260
203	16648	228	7106
204	5074	229	67600
205	6058	230	34140
206	3600	231	72360
207	89175	232	40500
208	1990	233	22500
209	65066	234	13125
210	498869	235	3210
211	10800	236	54045
212	32400	237	48480
213	7200	238	172440
214	24098	239	12000
215	45808	240	2400
216	2994	241	600
217	67858	242	11400
218	41342	243	3480
219	540	244	360
220	90360	245	35040
221	28800	246	8555
222	10716	247	56641
223	10884	248	2400
224	25236	249	3360
225	656	250	4200

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
251	6600	276	21120
252	9564	277	15600
253	25200	278	46800
254	10800	279	35494
255	34080	280	144389
256	18900	281	46917
257	6951	282	39720
258	36909	283	85118
259	53432	284	28462
260	2971	285	10800
261	38457	286	298832
262	41760	287	10818
263	38512	288	15581
264	44288	289	5936
265	3600	290	40773
266	37800	291	76860
267	2940	292	37200
268	7860	293	4200
269	4800	294	175080
270	3300	295	25020
271	120	296	163680
272	2580	297	600
273	57600	298	840
274	32400	299	81180
251	6600	276	21120

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
301	1026	326	14400
302	1244	327	52048
303	2040	328	138752
304	52200	329	84600
305	106760	330	119700
306	63660	331	74880
307	2160	332	0
308	115920	333	7200
309	19560	334	52200
310	192600	335	84600
311	1186	336	5400
312	45614	337	5400
313	8848	338	7200
314	32792	339	86400
315	40797	340	21600
316	62	341	1800
317	37381	342	0
318	40320	343	3600
319	90600	344	3600
320	39110	345	14400
321	53890	346	68400
322	39000	347	30600
323	15000	348	7200
324	28800	349	3600
325	35520	350	37800

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
351	12300	376	30600
352	2100	377	7339
353	7200	378	7061
354	5400	379	3600
355	30600	380	75600
356	600	381	0
357	3000	382	3032
358	720	383	783
359	2880	384	982
360	1080	385	464
361	66120	386	1714
362	0	387	6960
363	36000	388	165720
364	75600	389	45000
365	7200	390	21600
366	15300	391	1800
367	900	392	3600
368	3600	393	0
369	0	394	0
370	1800	395	61320
371	88200	396	6120
372	3600	397	26160
373	1800	398	0
374	3600	399	7200
375	1800	400	35400

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
401	960	426	38001
402	1140	427	6322
403	3180	428	2070
404	31300	429	147320
405	9020	430	2688
406	154700	431	210
407	124080	432	2440
408	1500	433	1294
409	8220	434	102
410	26486	435	2100
411	4546	436	3600
412	258	437	10694
413	3959	438	2411
414	3196	439	2296
415	4405	440	3815
416	73594	441	14286
417	3808	442	1311
418	4678	443	2520
419	398	444	128894
420	9962	445	15946
421	2255	446	23455
422	1800	447	636
423	4495	448	901
424	2551	449	6939
425	48609	450	1155

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
451	67008	476	57888
452	347	477	2642
453	2408	478	7440
454	7475	479	280
455	37199	480	4188
456	19942	481	416
457	21738	482	15417
458	16057	483	7662
459	26328	484	2266
460	35592	485	1333
461	15710	486	20553
462	10634	487	24491
463	83343	488	36034
464	11164	489	8059
465	19763	490	21232
466	119272	491	48462
467	31234	492	5078
468	54559	493	125221
469	7417	494	129023
470	3217	495	52957
471	20762	496	1942
472	9690	497	36013
473	6514	498	63960
474	6853	499	1090
475	152344	500	36459

ตารางที่ ก-8 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
501	60001	526	32060
502	33804	527	12
503	179232	528	3488
504	54496	529	2828
505	70568	530	0
506	16906	531	336
507	111502	532	30332
508	157275	533	5216
509	14700	534	1472
510	3528	535	1168
511	150932	536	3648
512	75460	537	44424
513	277380	538	3424
514	38560	539	47275
515	148020	540	5805
516	1320	541	6720
517	6975	542	55664
518	8967	543	13088
519	456	544	7328
520	60		
521	0		
522	1752		
523	32640		
524	46924		
525	1088		

ตารางที่ ก-9 แสดงข้อมูลชุดที่ 9 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 129 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	760	26	54
2	758	27	1337
3	303	28	163
4	6	29	8
5	22	30	1
6	14	31	17
7	42	32	16
8	4	33	87
9	84	34	19
10	15	35	29
11	221	36	0
12	14	37	5
13	15	38	360
14	41	39	10
15	1	40	11
16	153	41	100
17	409	42	252
18	54	43	460
19	24	44	179
20	44	45	3
21	180	46	24
22	397	47	253
23	19	48	163
24	145	49	54
25	36	50	137

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	328	76	863
52	3	77	991
53	9	78	35
54	12	79	9549
55	18	80	249
56	9	81	607
57	75	82	83
58	15	83	614
59	366	84	352
60	428	85	673
61	212	86	4179
62	115	87	111
63	264	88	75
64	269	89	407
65	276	90	288
66	1	91	894
67	999	92	1314
68	30	93	845
69	495	94	55
70	472	95	409
71	344	96	36
72	550	97	15
73	131	98	1960
74	47	99	60
75	92	100	19

ตารางที่ ก-9 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	20	126	2796
102	79	127	3268
103	24	128	3845
104	1737	129	76
105	7984		
106	10		
107	20		
108	338		
109	250		
110	1682		
111	212		
112	287		
113	56		
114	4973		
115	3500		
116	59		
117	98		
118	2439		
119	1812		
120	6203		
121	385		
122	3500		
123	4892		
124	687		
125	62		

ตารางที่ ก-10 แสดงข้อมูลชุดที่ 10 มีจำนวนข้อผิดพลาดที่ตรวจพบ 103 จุด

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
1	33	26	50
2	9	27	10
3	4	28	2
4	66	29	22
5	0.5	30	53
6	18	31	19
7	149	32	58
8	14	33	20
9	15	34	3
10	50	35	92
11	81	36	5
12	34	37	66
13	85	38	289
14	54	39	3
15	3	40	9
16	15	41	12
17	6	42	18
18	8	43	9
19	130	44	75
20	19	45	15
21	19	46	291
22	112	47	212
23	15	48	4
24	16	49	5
25	154	50	308

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
51	269	76	583
52	276	77	60
53	1	78	19
54	400	79	20
55	294	80	79
56	227	81	24
57	118	82	540
58	13	83	52
59	47	84	1596
60	89	85	314
61	242	86	1
62	99	87	763
63	607	88	10
64	83	89	20
65	2	90	144
66	26	91	28
67	586	92	56
68	708	93	476
69	6	94	65
70	4	95	98
71	55	96	884
72	409	97	212
73	36	98	287
74	15	99	53
75	573	100	3

ตารางที่ ก-10 (ต่อ)

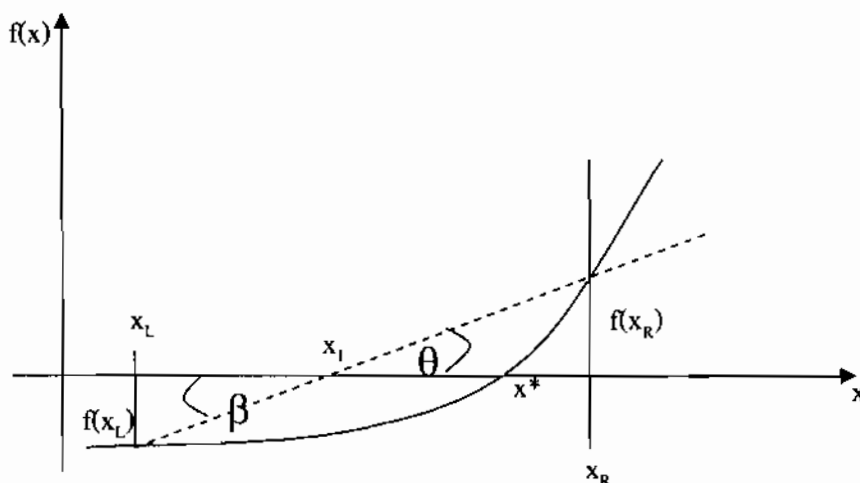
ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด	ข้อผิดพลาด	เวลาการเกิดข้อผิดพลาด
101	831		
102	43		
103	55		

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ สามารถหาได้ Numerical Technique ในงานวิจัย
ฉบับนี้คือ False Position Method

การหารากของสมการ โดยระเบียบวิธี False Position นั้นมีหลักการดังนี้



ภาพที่ ข-1 False Position Method สำหรับการหารากของสมการ $f(x) = 0$

1. เขียนสมการให้อยู่ในรูป $f(x) = 0$
2. กำหนดค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดให้เป็น x_L และ x_R ตามลำดับ
3. หาค่าของฟังก์ชัน $f(x_L)$ และ $f(x_R)$ แล้วเชื่อมค่าทั้งสองเข้าด้วยกัน ตามเส้นประ
ดังภาพที่ ข-1

4. ที่ตำแหน่ง x_1 จะมีความผิดพลาดไปจาก x^* หรือค่า x ที่ทำให้ $f(x^*) = 0$ อยู่
5. จะเห็นว่า มุม $\theta = \beta$ ดังนั้น $\tan \theta = \tan \beta$

$$\text{นั่นคือ } \frac{f(x_R)}{x_R - x_1} = \frac{f(x_L)}{x_L - x_1}$$

$$\text{ดังนั้น } x_L f(x_R) - x_1 f(x_R) = x_R f(x_L) - x_1 f(x_L)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } x_1 = \frac{x_L f(x_R) - x_R f(x_L)}{f(x_R) - f(x_L)}$$

6. เมื่อได้ x_1 และขั้นตอนต่อไปจะทำการจำกัดช่วงให้แคบลงโดยให้ x_1 เป็นค่า x_L หรือ x_R
ตามแต่กรณี ถ้า $f(x_1) \cdot f(x_R) < 0$ ให้ $x_L = x_1$ และ x_R เป็นค่าเดิม
ถ้า $f(x_1) \cdot f(x_R) > 0$ ให้ $x_R = x_1$ และ x_L เป็นค่าเดิม

7. คำนวณ x_1 จาก $x_1 = \frac{x_L f(x_R) - x_R f(x_L)}{f(x_R) - f(x_L)}$
8. เปรียบเทียบค่า x_1 ค่าเดิมและค่าใหม่ว่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.005% (หรือตามที่กำหนด)
หากแตกต่างกันมากกว่าที่กำหนดไว้ จะทำซ้ำขั้นตอนในข้อ 5-ข้อ 7 จนกว่าจะได้เกณฑ์
ความแตกต่างตามที่กำหนดไว้ จึงจะได้ x_1 ตัวที่ใหม่ที่สุดเป็นรากของสมการ


```

if ($file[0] == "03") { $l = 196;} if ($file[0] == "07") { $l = 281;} if ($file[0] == "08") { $l = 22;}
if ($file[0] == "10") { $l = 23;}
for ($len=$l;$len<=$number;$len++) {
sub function {
    my($N)=@_;
    $a[0] = 0 ;      $b[0]= 0 ;      $c[0] = 0;
    for ($i=1;$i<=$len;$i++) {
    $a[$i] = $a[$i-1] + 1/($N-$i+1);
    $b[$i] = $b[$i-1] + $len*$TBF[$i-1];
    $c[$i] = $c[$i-1] + ($N-$i+1)*$TBF[$i-1];
        return $a[$i-1] - $b[$i-1]/$c[$i-1];
    }
    $X0 = $len+3;
    $X1 = $len;
    for ($j=1;$j<=5000;$j++) {
        $F0 = &function($X0);
        $F1 = &function($X1);
        $DF = ($F0-$F1)/($X0-$X1);
        $DX = -$F1/$DF;
        $X0 = $X1;
        $X1 = $X1 + $DX;
        $X1 = &re_($X1,10);
        $TOL = abs($DX*100/$X1);
        if ($TOL < 0.00001) { $j = 5001; }
    }
    for ($i=1;$i<=$len;$i++) {
        $ct[$i] = $ct[$i-1] + ($X1-$i+1)*$TBF[$i-1];
    }
    $phi = $len/$ct[$len] ;
    $U[$len] = 1-exp(-$phi*($X1-$len)*$TBF[$len]);
}

```

```

$ft[$len] = ($X1-$len)*$phi*(exp(-($X1-$len)*$phi*$TBF[$len]));
$ft[$len] = -log($ft[$len]) / log(exp(1));
$pl[$len] = $pl[$len-1]+$ft[$len] ;
$X1 = &re_($X1,10);
$phi = &re_($phi,10);
$U[$len] = &re_($U[$len],10);
$pl[$len] = &re_($pl[$len],10);
$U[$number] = "";
$pl[$number] = "";
print SAVE "$len\t$X1\t$phi\t$U[$len]\t$pl[$len]\n";
}
for ($len=$1;$len<$number;$len++) {
print SAVE_U "$U[$len]\n";
print SAVE_PL "$pl[$len]\n";
}
open (FIN_MLE,">result/$file[0]mle.txt");
print FIN_MLE "$X1\n$phi\n";
close (FIN_MLE);
close (SAVE);
close (SAVE_U);
close (SAVE_PL);
print
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh' CONTENT='0; URL=geo.pl?$file[0]'>";
#####

```

```
#####GE MODEL#####

#!/usr/bin/perl

print "Content-type:text/html\n\n";

require "cgi-lib.pl";

&ReadParse(*input);

$file[0] = $ENV{QUERY_STRING};

print "<html><head>";

print "<title>Thesis</title></head>";

print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";

sub re_
{
    my $num=shift;
    my $digs_to_cut=shift;
    if ($num=~^d+\.(d){$digs_to_cut}/)
    {
        $num=sprintf("%.${$digs_to_cut}f", $num);
    }
    return $num;
}

open (FILE, "data/$file[0].txt");
@TBF = <FILE>;
close (FILE);

open (SAVE, ">result/$file[0]GEO.txt");
open (SAVE_U, ">result/$file[0]GEO_u.txt");
open (SAVE_PL, ">result/$file[0]GEO_pl.txt");

print SAVE "\tk\tD\tU-i\t-ln PL\n";

$number = @TBF;

$g = $number%2 ;

if ($g == 0) { $l = 1+(0.5*$number)} else { $l = ($number+1)/2};
```

```

if ($file[0] == "03") { $l = 196;} if ($file[0] == "07") { $l = 281;} if ($file[0] == "08") { $l = 22;}
if ($file[0] == "10") { $l = 23;}
for ($len=$l;$len<=$number;$len++) {
sub function {
    my($k)=@_ ;
    $a[0] = 0 ;      $b[0]= 0 ;
    for ($i=1;$i<=$len ;$i++) {
$a[$i] = $a[$i-1] + $i*($k**$i)*$TBF[$i-1];
$b[$i] = $b[$i-1] + ($k**$i)*$TBF[$i-1];
    }
return $a[$i-1]/$b[$i-1]-(($len+1)/2;
    }
$X0 = 0.99;
$X1 = 0.95;
for ($j=1;$j<=5000; $j++) {
    $F0 = &function($X0);
    $F1 = &function($X1);
    $DF = ($F0-$F1)/($X0-$X1);
    $DX = -$F1/$DF;
    $X0 = $X1;
    $X1 = $X1 + $DX;
$X1 = &re_($X1,10);
$TOL = abs($DX*100/$X1);
if ($TOL < 0.00001) { $j = 5001; }
}

    $ct[0] = 0;
    for ($i=1;$i<$len+1 ;$i++) {
        $ct[$i] = $ct[$i-1] + ($X1**($i-1))*$TBF[$i-1];
    }

$D = $len/$ct[$len] ;

```

```

$U[$len] = 1-exp(-$D*($X1**($len))*$TBF[$len]);
$ft[$len] = $D*($X1**$len)*exp(-$D*($X1**$len))*$TBF[$len] ;
$ft[$len] = -log($ft[$len]) / log(exp(1));
$pl[$len] = $pl[$len-1]+$ft[$len] ;
$X1 = &re_($X1,10);
$D = &re_($D,10);
$U[$len] = &re_($U[$len],10);
$pl[$len] = &re_($pl[$len],10);
$U[$number] = "";
$pl[$number] = "";
print SAVE "$len\t$X1\t$D\t$U[$len]\t$pl[$len]\n";
}

for ($len=$1;$len<$number;$len++) {
print SAVE_U "$U[$len]\n";
print SAVE_PL "$pl[$len]\n";
}

open (FIN_MLE,">>result/$file[0]mle.txt");
print FIN_MLE "$X1\n$D\n";
close (FIN_MLE);
close (SAVE);
close (SAVE_U);
close (SAVE_PL);

print
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh' CONTENT='0; URL=lv.pl?$file[0]'>"

#####

```

```
#####LV-MODEL#####

#!/usr/bin/perl

print "Content-type:text/html\n\n";
print "<html><head>";
print "<title>Thesis</title></head>";
print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";
sub re_
{
    my $num=shift;
    my $digs_to_cut=shift;
    if ($num=~^d+\.(\d){$digs_to_cut,}/)
    {
        $num=sprintf("%.{$digs_to_cut}f", $num);
    }
    return $num;
}

open (SAVE, ">result/$file[0]LV.txt");
open (SAVE_U, ">result/$file[0]LV_u.txt");
open (SAVE_PL, ">result/$file[0]LV_pl.txt");
print SAVE "\talpha\tBeta0\tBeta1\tU-i\t-ln PL\n";
open (FILE, "data/$file[0].txt");
@TBF = <FILE>;
close (FILE);
$number = @TBF;
$g = $number%2 ;
if ($g == 0) { $l = 1+(0.5*$number)} else { $l = ($number+1)/2};
if ($file[0] == "06") { $l = 141;} if ($file[0] == "08") { $l = 206;} if ($file[0] == "09") { $l = 69;}
$x1[0] = 1000;
$x2[0] = 1;
for ($len=$l;$len<=$number;$len++) {
```

```

for ($j=0;$j<=1000 ;$j++) {
    for ($i=1;$i<=$l;$i++) {
$A = $x1[$j] + $x2[$j]*$i*$i;
$B = $A + $TBF[$i-1] ;

        $sum1 = $sum1 + log($A)/log(exp(1));
        $sum2 = $sum2 + log($B)/log(exp(1));
        $sum3 = $sum3 + 1/$A;
        $sum4 = $sum4 + 1/$B;
        $sum5 = $sum5 + ($i**2)/$A;
        $sum6 = $sum6 + ($i**2)/$B;
        $sum7 = $sum7 + 1/($A**2);
        $sum8 = $sum8 + 1/($B**2);
        $sum9 = $sum9 + ($i**2)/($A**2);
        $sum10 = $sum10 + ($i**2)/($B**2);
        $sum11 = $sum11 + ($i**4)/$A;
        $sum12 = $sum12 + ($i**4)/$B;
        $sum13 = $sum13 + ($i**4)/($A**2);
        $sum14 = $sum14 + ($i**4)/($B**2);

$f1 = ($l*($sum3-$sum4))/($sum2-$sum1)-$sum4;
$f2 = ($l*($sum5-$sum6))/($sum2-$sum1)-$sum6;
$f11 = (($l*(-$sum7+$sum8))*($sum2-$sum1) + $l*($sum4-$sum3)**2)/(($sum2-$sum1)**2)
+ $sum8;
$f12 = (($l*(-$sum9+$sum10))*($sum2-$sum1) + $l*($sum6-$sum5)**2)/(($sum2-$sum1)**2)
+ $sum10;
$f21 = (($l*(-$sum9+$sum10))*($sum2-$sum1) + $l*($sum6-$sum5)**2)/(($sum2-$sum1)**2)
+ $sum10;
$f22 = (($l*(-$sum13+$sum14))*($sum2-$sum1) + $l*($sum12-$sum11)**2)/(($sum2-$
$sum1)**2) + $sum14;

        $dx1[0]=0.1;
        $dx2[0]=0.1;

```

```

for ($k=0;$k<=10001;$k++) {
    $dx1[$k+1] = (-$f1-$f12*$dx2[$k])/$f11;
    $dx2[$k+1] = (-$f2-$f21*$dx1[$k+1])/$f22;
}
$det_x = $f11*$f22 - $f21*$f12;
$det_x1 = (-$f1)*$f22 - (-$f2)*$f12;
$det_x2 = $f11*(-$f2) - $f21*(-$f1);
$dx1 = $det_x1/$det_x;
$dx2 = $det_x2/$det_x;
$x1[$j+1] = $x1[$j] + $dx1[$k];
$x2[$j+1] = $x2[$j] + $dx2[$k];
$f1 = &re_($f1,10);
$f2 = &re_($f2,10);
$x1[$j+1] = &re_($x1[$j+1],10);
$x2[$j+1] = &re_($x2[$j+1],10);
$x1[$j] = &re_($x1[$j],10);
$x2[$j] = &re_($x2[$j],10);
$dx1[$k] = &re_($dx1[$k],10);
$dx2[$k] = &re_($dx2[$k],10);
$err = sqrt($x1[$j+1]**2 + $x2[$j+1]**2);
    if ($err<0.0001) {      $j = 10001 ;      }
}
$B0[$len] = $x1[10001];
$B1[$len] = $x2[10001] ;
$alpha[$len] = $l/($sum2 - $sum1);
$U[$len] = 1 - (($B0[$len] + $B1[$len]*$len*$len)/($B0[$len] +
$B1[$len]*$len*$len+$TBF[$len-1]))**$B0[$len];
$ft[$len] = ($alpha[$len]*(($B0[$len] + $B1[$len]*$len*$len)**$alpha[$len]))/((($B0[$len] +
$B1[$len]*$len*$len+$TBF[$len-1]))**$alpha[$len]);
$ft[$len] = -log($ft[$len]) / log(exp(1));

```

```

$pl[$len] = $pl[$len-1]+$ft[$len] ;
open (FIN_MLE,">>result/$file[0]mle.txt");
print FIN_MLE "$alpha[$len]\n$B0[$len]\n$B1[$len]\n";
close (FIN_MLE);
for ($i=1;$i<=$len;$i++) {
    print SAVE "$j\t$alpha[$i]\t$B0[$i]\t$B1[$i]\t$U[$i]\t$pl[$i]\n";
    print SAVE_U "$U[$i]\n";
    print SAVE_PL "$pl[$i]\n";
}
close (SAVE);
close (SAVE_U);
close (SAVE_PL);
print
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh'  CONTENT='0; URL=mb.pl?$file[0]'\n>";
#####

```

```
#####MB MODEL#####
```

```
#!/usr/bin/perl
```

```
print "Content-type:text/html\n\n";
```

```
require "cgi-lib.pl";
```

```
&ReadParse(*input);
```

```
$file[0] = $ENV{QUERY_STRING};
```

```
print "<html><head>";
```

```
print "<title>Thesis</title></head>";
```

```
print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";
```

```
sub re_
```

```
{
```

```
my $num=shift;
```

```
my $digs_to_cut=shift;
```

```
if ($num=~^/d+\\.(\d){$digs_to_cut,}/)
```

```
{
```

```
    $num=sprintf("%.${$digs_to_cut}f", $num);
```

```
}
```

```
return $num;
```

```
}
```

```
open (FILE, "data/$file[0].txt");
```

```
@TBF = <FILE>;
```

```
close (FILE);
```

```
open (SAVE, ">result/$file[0]MB.txt");
```

```
open (SAVE_U, ">result/$file[0]MB_u.txt");
```

```
open (SAVE_PL, ">result/$file[0]MB_pl.txt");
```

```
print SAVE "i\tBeta0\tBeta1\tU-i\t-ln PL\n";
```

```
$number = @TBF;
```

```
$g = $number%2 ;
```

```
if ($g == 0) { $l = 1+(0.5*$number)}else{ $l = ($number+1)/2};
```

```

if ($file[0] == "03") { $l = 196;} if ($file[0] == "07") { $l = 281;} if ($file[0] == "08") { $l = 22;}
if ($file[0] == "10") { $l = 23;}

for ($len=$l;$len<=$number;$len++) {
    $XN[0] = 0 ;    $X[0] = 0 ;
    for ($i=1;$i<=$len;$i++) {
        $XN[$i] = $XN[$i-1] + $TBF[$i-1];
        $X[$i] = $X[$i-1] + $XN[$i];
    }

sub function {
    my($k)=@_;
    return ($len/$k)-(($len*$XN[$len])/(exp($k*$XN[$len])-1))- $X[$len];
}

$xl = -1;
$xr = 1;
sub test {
    $fxl = &function($xl);
    $fxr = &function($xr);
    $xl = ($xl*$fxr - $xr*$fxl)/($fxr - $fxl);
    $fxl = &function($xl);
}

&test;
$t = 1;
until ($t>5000)
{
    if ($fxl*$fxr<0) {    $xl = $xl; &test;
    } else { $xr = $xl; &test;};
    $t++;
    if (abs($fxl)<0.00001) {$t=5001;}
}

$B0 = $len/(1-exp(-$xl*$XN[$len]));

```

```

$tempi = $B0*exp(-$x1*$XN[$len]);
$tempi2 = 1-exp(-$x1*$TBF[$len]);
$tempi3 = $tempi*$tempi2;
$tempi4=exp(-$tempi3);
$U[$len] = 1 - $tempi4;
$XN[$number+1]=0;
$tempi5 = exp(-$x1*$XN[$len]);
$tempi6 = exp(-$x1*$TBF[$len]);
$ft[$len] = $B0*$x1*$tempi5*$tempi6*$tempi4;
$ft[$len] = -log($ft[$len]) / log(exp(1));
$pi[$len] = $pi[$len-1]+$ft[$len] ;
$x1 = &re_($x1,10);
$B0 = &re_($B0,10);
$U[$len] = &re_($U[$len],10);
$pi[$len] = &re_($pi[$len],10);
$pi[$number] = "";
$U[$number] = "";

print SAVE "$len\t$B0\t$x1\t$U[$len]\t$pi[$len]\n";
}

for ($len=$1;$len<$number;$len++) {
print SAVE_U "$U[$len]\n";
print SAVE_PL "$pi[$len]\n";
}

open (FIN_MLE,">>result/$file[0]mle.txt");
print FIN_MLE "$B0\n$x1\n";
close (FIN_MLE);

close (SAVE);
close (SAVE_U);
close (SAVE_PL);

```

```
print
```

```
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";
```

```
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh'  CONTENT='0; URL=mo.pl?$file[0]';>";
```

```
#####
```

```
#####MO MODEL#####
```

```
#!/usr/bin/perl

print "Content-type:text/html\n\n";

require "cgi-lib.pl";

&ReadParse(*input);

$file[0] = $ENV{QUERY_STRING};

print "<html><head>";

print "<title>Thesis</title></head>";

print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";

sub re_
{
    my $num=shift;
    my $digs_to_cut=shift;
    if ($num=~^d+\.(d){$digs_to_cut,}/)
    {
        $num=sprintf("%.${$digs_to_cut}f", $num);
    }
    return $num;
}

open (FILE, "data/$file[0].txt");
@TBF = <FILE>;
close (FILE);

open (SAVE, ">result/$file[0]MO.txt");
open (SAVE_U, ">result/$file[0]MO_u.txt");
open (SAVE_PL, ">result/$file[0]MO_pl.txt");
print SAVE "i\tBeta0\tBeta1\tU-i\t-ln PL\n";

$number = @TBF;

$g = $number%2 ;

$XN[0] = 0 ;

for ($i=1;$i<=$number;$i++) {
```

```

$XN[$i] = $XN[$i-1] + $TBF[$i-1];

    }

if ($g == 0) { $l = 1+(0.5*$number)}else{ $l = ($number+1)/2};
if ($file[0] == "03") { $l = 196;} if ($file[0] == "07") { $l = 281;} if ($file[0] == "08") { $l = 22;}
if ($file[0] == "10") { $l = 23;}
for ($len=$l;$len<=$number;$len++) {
    sub function {
        my($k)=@_;
        $a[0] = 0 ;
        for ($i=1;$i<=$len;$i++) { $a[$i] = $a[$i-1] + 1/($k*$XN[$i]+1); }
        $tem1 = $k*$XN[$len]+1;
        $tem2 = log($tem1)/log(exp(1));
        $tem3 = $len*$XN[$len];
        return ($a[$len]/$k) - ($tem3/($tem1*$tem2)) ;
    }

    $xl = 0.000005; $xr = 0.5/$len;
    if ($file[0] == "05") { $xl = 1/120000000; $xr = 1/120000000; }
    if ($file[0] == "06") { $xl = 1/120000000; $xr = 1/120000000; }
    sub test {
        $fxl = &function($xl);
        $fxr = &function($xr);
        $x1 = ($xl*$fxr - $xr*$fxl)/($fxr - $fxl);
        $fx1 = &function($x1);
    }
    &test;
    $t = 1;
    until ($t>10000)
    {
        if ($fx1*$fxr<0) { $xl = $x1; &test;
        } else { $xr = $x1; &test;};
    }

```

```

        $t++;
        if (abs($fx1)<0.001) {$t=10001; }
    }

    $B0 = $len*log(exp(1))/log($x1*$XN[$len]+1);
    $U[$len] = 1-((($x1*$XN[$len]+1)/($x1*$XN[$len+1]+1))**$B0;
    $ft[$len] =
    ($B0*$x1*((($x1*$XN[$len]+1)/($x1*$XN[$len+1]+1))**$B0)/($x1*$XN[$len+1]+1);
    $ft[$len] = -log($ft[$len]) / log(exp(1));
    $pl[$len] = $pl[$len-1]+$ft[$len];
    $x1 = &re_($x1,10);
    $B0 = &re_($B0,10);
    $U[$len] = &re_($U[$len],10);
    $pl[$len] = &re_($pl[$len],10);
    $pl[$number] = "";
    $U[$number] = "";
    print SAVE "$len\t$B0\t$x1\t$U[$len]\t$pl[$len]\n";
}

for ($len=$1;$len<$number;$len++) {
    print SAVE_U "$U[$len]\n";
    print SAVE_PL "$pl[$len]\n";
}

open (FIN_MLE,">>result/$file[0]mle.txt");
print FIN_MLE "$B0\n$x1\n";
close (FIN_MLE);
close (SAVE);
close (SAVE_U);
close (SAVE_PL);
close (TEMP);
print
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";

```

```
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh' CONTENT='0; URL=ksd.pl?$file[0]';>";  
#####
```

```
#####KS-STATISTIC#####

#!/usr/bin/perl

print "Content-type:text/html\n\n";

require "cgi-lib.pl";

&ReadParse(*input);

$file[0] = $ENV{QUERY_STRING};

print "<html><head>";

print "<title>Thesis</title></head>";

print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";

sub re_
{
    my $num=shift;
    my $digs_to_cut=shift;
    if ($num=~^d+\\.(\d){$digs_to_cut,}/)
    {
        $num=sprintf("%.${$digs_to_cut}f", $num);
    }
    return $num;
}

open (JM, "result/$file[0]JM_u.txt");
@jm = <JM>;
close (JM);

open (GEO, "result/$file[0]GEO_u.txt");
@geo = <GEO>;
close (GEO);

open (LV, "result/$file[0]LV_u.txt");
@lv = <LV>;
close (LV);

open (MB, "result/$file[0]MB_u.txt");
@mb = <MB>;
```

```

close (MB);
open (MO, "result/$file[0]MO_u.txt");
@mo = <MO>;
close (MO);
@sorted_jm = sort { $a <=> $b } @jm;
@sorted_geo = sort { $a <=> $b } @geo;
@sorted_lv = sort { $a <=> $b } @lv;
@sorted_mb = sort { $a <=> $b } @mb;
@sorted_mo = sort { $a <=> $b } @mo;
$long = @jm;
$len = $long*2;
$cdf[0] = 0;
$cdf[$len-1] = $long/($long+1);
for ($i=1;$i<$len-1;$i++) {
    $j = $i%2;
    if ($j == 0) {$cdf[$i] = ($i/2)/($long+1);}
    if ($j == 1) {$cdf[$i] = (($i+1)/2)/($long+1);}
}
for ($i=0;$i<$len;$i++) {
    $j = $i%2;
    if ($j == 0) {$jm[$i] = $sorted_jm[$i/2];
                                     $geo[$i] = $sorted_geo[$i/2];
                                     $lv[$i] = $sorted_lv[$i/2];
                                     $mb[$i] = $sorted_mb[$i/2];
                                     $mo[$i] = $sorted_mo[$i/2];
    }
    if ($j == 1) {$jm[$i] = $sorted_jm[(($i-1)/2)];
                                     $geo[$i] = $sorted_geo[(($i-1)/2)];
                                     $lv[$i] = $sorted_lv[(($i-1)/2)];
                                     $mb[$i] = $sorted_mb[(($i-1)/2)];
    }
}

```

```

$mo[$i] = $sorted_mo[(i-1)/2];
}

$ks_jm[$i] = abs($cdf[$i] - $jm[$i]);
$ks_geo[$i] = abs($cdf[$i] - $geo[$i]);
$ks_lv[$i] = abs($cdf[$i] - $lv[$i]);
$ks_mb[$i] = abs($cdf[$i] - $mb[$i]);
$ks_mo[$i] = abs($cdf[$i] - $mo[$i]);
}

@sorted_ks_jm = sort { $b <=> $a } @ks_jm;
@sorted_ks_geo = sort { $b <=> $a } @ks_geo;
@sorted_ks_lv = sort { $b <=> $a } @ks_lv;
@sorted_ks_mb = sort { $b <=> $a } @ks_mb;
@sorted_ks_mo = sort { $b <=> $a } @ks_mo;

$ksd_jm = &re_($sorted_ks_jm[0],5);
$ksd_geo = &re_($sorted_ks_geo[0],5);
$ksd_lv = &re_($sorted_ks_lv[0],5);
$ksd_mb = &re_($sorted_ks_mb[0],5);
$ksd_mo = &re_($sorted_ks_mo[0],5);

open (SAVE,">result/$file[0]UPlot.mtw");
print SAVE
"JM\GEO\LV\MB\MO\CDF\KS_JM\KS_GEO\KS_LV\KS_MB\KS_MO\Failure
Probability - CDF\Failure Probability -
u(i)\t",$ksd_jm,"\t",$ksd_geo,"\t",$ksd_lv,"\t",$ksd_mb,"\t",$ksd_mo,"\n";

$cf=1/($long+1);

$cf = &re_($cf, 5);

print SAVE

$sorted_jm[0]+0,"\t",$sorted_geo[0]+0,"\t",$sorted_lv[0]+0,"\t",$sorted_mb[0]+0,"\t",$sorted_m
o[0]+0,"\t",$cf,"\t";

print SAVE $ksd_jm,"\t",$ksd_geo,"\t",$ksd_lv,"\t",$ksd_mb,"\t",$ksd_mo,"\t0\t0\n";

$cf=2/($long+1);

```



```
#####PLR#####

#!/usr/bin/perl

print "Content-type:text/html\n\n";

require "cgi-lib.pl";

&ReadParse(*input);

$file[0] = $ENV{QUERY_STRING};

print "<html><head>";

print "<title>Thesis</title></head>";

print "<body bgcolor=ffffff text=000000>\n";

sub re_
{
    my $num=shift;
    my $digs_to_cut=shift;
    if ($num=~^d+\\.d){$digs_to_cut,}/)
    {
        $num=sprintf("%.${$digs_to_cut}f", $num);
    }
    return $num;
}

open (JM, "result/$file[0]JM_pl.txt");
@jm = <JM>;
close (JM);

open (GEO, "result/$file[0]GEO_pl.txt");
@geo = <GEO>;
close (GEO);

open (LV, "result/$file[0]LV_pl.txt");
@lv = <LV>;
close (LV);

open (MB, "result/$file[0]MB_pl.txt");
@mb = <MB>;
```

```

close (MB);
open (MO, "result/$file[0]MO_pl.txt");
@mo = <MO>;
close (MO);
$len = @jm;
open (FILE, "data/$file[0].txt");
@TBF = <FILE>;
close (FILE);
$num = @TBF;
open (SAVE, ">result/$file[0]PLR.mtw");
print SAVE
"i\tGEO:JM\tLV:JM\tMB:JM\tMO:JM\tJM:GEO\tLV:GEO\tMB:GEO\tMO:GEO\tJM:LV\tGEO
:LV\tMB:LV\tMO:LV\tJM:MB\tGEO:MB\tLV:MB\tMO:MB\tJM:MO\tGEO:MO\tLV:MO\tMB
:MO\n";
for ($i=0;$i<$len;$i++) {
    $LN_PLR_GEO_JM[$i] = -$geo[$i] + $jm[$i];
    $LN_PLR_LV_JM[$i] = -$lv[$i] + $jm[$i];
    $LN_PLR_MB_JM[$i] = -$mb[$i] + $jm[$i];
    $LN_PLR_MO_JM[$i] = -$mo[$i] + $jm[$i];
    #####
    $LN_PLR_JM_GEO[$i] = -$jm[$i] + $geo[$i];
    $LN_PLR_LV_GEO[$i] = -$lv[$i] + $geo[$i];
    $LN_PLR_MB_GEO[$i] = -$mb[$i] + $geo[$i];
    $LN_PLR_MO_GEO[$i] = -$mo[$i] + $geo[$i];
    #####
    $LN_PLR_JM_LV[$i] = -$jm[$i] + $lv[$i];
    $LN_PLR_GEO_LV[$i] = -$geo[$i] + $lv[$i];
    $LN_PLR_MB_LV[$i] = -$mb[$i] + $lv[$i];
    $LN_PLR_MO_LV[$i] = -$mo[$i] + $lv[$i];
    #####

```

```

$LN_PLR_JM_MB[$i] = -$jm[$i] + $mb[$i];
$LN_PLR_GEO_MB[$i] = -$geo[$i] + $mb[$i];
$LN_PLR_LV_MB[$i] = -$lv[$i] + $mb[$i];
$LN_PLR_MO_MB[$i] = -$mo[$i] + $mb[$i];
#####
$LN_PLR_JM_MO[$i] = -$jm[$i] + $mo[$i];
$LN_PLR_GEO_MO[$i] = -$geo[$i] + $mo[$i];
$LN_PLR_LV_MO[$i] = -$lv[$i] + $mo[$i];
$LN_PLR_MB_MO[$i] = -$mb[$i] + $mo[$i];
$j = $num-$len+$i+1;

print SAVE
"$j\t$LN_PLR_GEO_JM[$i]\t$LN_PLR_LV_JM[$i]\t$LN_PLR_MB_JM[$i]\t$LN_PLR_MO_J
M[$i]\t$LN_PLR_JM_GEO[$i]\t$LN_PLR_LV_GEO[$i]\t$LN_PLR_MB_GEO[$i]\t$LN_PLR
_MO_GEO[$i]\t$LN_PLR_JM_LV[$i]\t$LN_PLR_GEO_LV[$i]\t$LN_PLR_MB_LV[$i]\t$LN
_PLR_MO_LV[$i]\t$LN_PLR_JM_MB[$i]\t$LN_PLR_GEO_MB[$i]\t$LN_PLR_LV_MB[$i]\t
$LN_PLR_MO_MB[$i]\t$LN_PLR_JM_MO[$i]\t$LN_PLR_GEO_MO[$i]\t$LN_PLR_LV_M
O[$i]\t$LN_PLR_MB_MO[$i]\n";
}

close(SAVE);

print
"<BR><BR><BR><BR><BR><BR><BR><CENTER><h1>Computing...</h1></CENTER>";
print "<META HTTP-EQUIV='Refresh' target='_top' CONTENT='2; URL=index.pl'>";
#####

```

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายมนต์ชัย ร้าวกระโทก

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การเปรียบเทียบความแม่นยำของตัวแบบความเชื่อถือได้ของซอฟต์แวร์

สาขาวิชา : สถิติประยุกต์

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี บัณฑิต ก.บ.(จุฬา ฯ)

จากภาควิชามัธยมศึกษา สาขามัธยมศึกษา เอกวิชาคณิตศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใน

ปี พ.ศ. 2545 และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสถิติประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547